



**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

PEDRO MIGUEL
VENTURA
CARDOSO

**ENSAIOS POR ULTRASSONS EM
COMPÓSITOS LAMINADOS DE
PAREDE FINA COM TECNOLOGIA
DE *PHASED ARRAY***

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia de Produção

ORIENTADOR

Prof. Doutor José Filipe Castanheira Pereira
Antunes Simões

Novembro de 2025

PEDRO MIGUEL
VENTURA
CARDOSO

**ENSAIOS POR ULTRASSONS EM
COMPÓSITOS LAMINADOS DE
PAREDE FINA COM TECNOLOGIA
DE *PHASED ARRAY***

JÚRI

Presidente: Prof. Doutor, Pedro Filipe do Carmo
Cunha, ESTSetúbal/IPS;

Orientador: Prof. Doutor, José Filipe Castanheira
Pereira Antunes Simões, ESTSetúbal/IPS;

Vogal: Prof^a Doutora, Teresa Leonor Ribeiro
Cardoso Martins Morgado, ISEL/IPL.

Dezembro de 2025

*CVM SACRIFICIO ET HONORE.
PER TEMPORA OBSCVRA ET INCERTA.
SPES RENASCITVR IN LVCE REPERTA.
AD VICTORIAM ET LIBERTATEM.*

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Eng.º Fernando Brandão e ao Eng.º António Moreira. O seu apoio e orientação foram fulcrais para o início do desenvolvimento da parte experimental do trabalho. A sua disponibilidade e assistência em dúvidas técnicas e operacionais, tal como o suporte dado em problemas de equipamento, foram fulcrais para a realização dos ensaios experimentais.

Queria agradecer também ao Eng.º Daniel Leitão, pela sua ajuda no início do decorrer dos trabalhos. A sua experiência do “mundo real” permitiu ganhar perceção de alguns pormenores e fatores muito importantes, quer na parte experimental, quer na exposição teórica do documento.

Ao meu orientador, o professor José Simões, gostaria de agradecer pela orientação e atenção durante o desenvolvimento do meu trabalho final de mestrado.

Por fim, à minha família, amigos de longa data e aos colegas mais chegados, que sempre me apoiaram do início ao fim, a todos um muito obrigado.

Resumo

A sustentabilidade é, cada vez mais uma prioridade da indústria e da sociedade. Isto leva à utilização mais extensiva de materiais compósitos laminados de Polímero Reforçado por Fibra. Isto permite reduzir o peso de estruturas, melhorando propriedades mecânicas acrescentando a maior eficiência energética de transportes. Por outro lado, o seu controlo, apresenta novos desafios para a indústria. Para dar resposta a este estímulo industrial, é necessário criar *know-how* no ensino, relativo a estes materiais e aos processos que o tratam. Este trabalho atua na vertente de começar a aprofundar este conhecimento. Para se conseguir garantir a qualidade de algo é preciso saber-se o que pode correr mal tendo-se listado e especificado os diferentes “defeitos” típicos deste tipo de materiais. Seguidamente, elaborou-se uma exposição relativa ao funcionamento dos ensaios por ultrassons, quer convencionais, quer por “*Phased Array*”. Nesta foram exibidos alguns exemplos teóricos, mostrados equipamentos, e comparados métodos. Para possibilitar o início da experimentação e testagem, foi estudado um conjunto de parâmetros que pudesse ser utilizado como ponto de partida para futuros trabalhos académicos. Estes foram especificados para defeitos de delaminação e danos de pequenas dimensões. Este estudo foi realizado com recurso a *phased array* em provetes de fibra de carbono. Por fim, concluiu-se que, com uma abertura entre os 6 e os 8 elementos e com frequências de 10MHz de processamento do sinal, seria possível detetar todos os patamares-teste de delaminação e a maioria dos defeitos de pequena dimensão.

Palavras-chave: “Ensaio por Ultrassons”, “*Phased Array*”, “Polímeros Reforçados por Fibra”,
Delaminação

Abstract

Sustainability is, increasingly, becoming a priority, both for industry and society. This results in the rampant use of laminate composite materials such as Fiber Reinforced Composites. This allows a drastic weight reduction in structures, while improving both mechanical properties, and energy efficiency in transportation. However, Quality control is presented with new challenges. To answer this industrial stimulus, the creation of academic knowhow, regarding these materials and processes, is critical. This essay aims to fill the knowledge gap between academia and Industry. To ensure the quality of something, there needs to be a notion of what might go wrong with it, requiring the listing and specification of those possible non-conformities typical of those materials. Then, an exposition was made, regarding the elemental functioning of Ultrasound testing, both conventional and using Phased Array technology. Here were exposed machines, capabilities, examples and comparisons using both methods. To allow the beginning of further experimentation, a study allowed the creation of a window of parameters, which would serve as a launch point for further academic studies. These parameters were studied for delamination and low velocity impact damage defects in carbon fiber specimens, using phased array ultrasound methods. In the end, using apertures between 6 and 8 elements, and frequencies ranging around 10MHz, it was possible to detect all the delamination test defects, as well as the low volume test defects.

Keywords: "Fiber Reinforced Composites", "Ultrasound Testing", "Phased Array", Delamination

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Índice	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do documento	3
Capítulo 2	4
Descontinuidades/malformações em materiais compósitos	4
2.1. Considerações Iniciais.....	5
2.2. Descontinuidades/malformações na matriz	5
2.2.1. Tensões residuais.....	5
2.2.2. Vazios	5
2.2.3. Zonas deficientes em fibra.....	6
2.3. Problemas no reforço	6
2.3.1. Enrugamento das fibras.....	6
2.3.2. Danos na fibra	7
2.4. Problemas de Interface	7
2.4.1. Delaminação de camadas	7
2.4.2. Interface Fibra-Matriz.....	8
2.5. Descontinuidades/Malformações de maquinagem	8
2.5.1. Furação.....	8
2.5.2. Corte	9
Capítulo 3	10
Análise por Ultrassons Convencionais Versus <i>Phased Array</i>	10
3.1. Ultrassons em Compósitos	11
3.2. Ensaios por ultrassons convencionais	11
3.2.1. Funcionamento	12
3.2.2. Tipos de sondas	17
3.2.3. Parametrização UT	19
3.2.4. <i>Particularidades UT</i>	21

3.3. Ensaio por Ultrassons com Phased Array	21
3.3.1. Funcionamento	21
3.3.2. Tipos de sondas	24
3.3.3. Particularidades do PAUT	25
3.4. Comparação qualitativa PAUT vs UT Convencional	26
Capítulo 4	29
Ensaio experimental	29
4.1. Introdução experimental	30
4.1.1. Problema a tratar	30
4.1.2. Objetivo	30
4.1.3. Equipamentos utilizados	30
4.1.4. Peças em estudo	32
4.2. Parametrização	33
4.2.1. Frequência	33
4.2.2. Número de Elementos - Abertura	34
4.2.3. Ganho sonoro	35
4.2.4. Calibração	36
4.3. Delaminações	38
4.3.1. Objetivos	38
4.3.2. Planeamento e parâmetros	39
4.3.3. Testagem	42
4.3.4. Observações	51
4.4. Furos	52
4.4.1. Objetivos	52
4.4.2. Planeamento e Parâmetros	52
4.4.3. Testagem	54
4.4.4. Observações	60
4.5. Discussão de resultados	61
4.5.1. Matriz	61
4.5.2. Frequência	61
4.5.3. Abertura	61
4.5.4. UT convencional	62
4.5.5. Parâmetros	63
Capítulo 5	65
Conclusão e proposta de trabalhos futuros	65
5.1. Conclusões	65
5.2. Proposta de trabalhos futuros	66
Referências Bibliográficas	67
Apêndice I	1
Jig/Banco de Ensaio	1

Apêndice II.....	7
Procedimento de Utilização/Calibração PAUT.....	7
Apêndice III.....	17
Ensaio de Delaminação.....	17
Apêndice IV.....	47
Ensaio de Furação.....	47
Apêndice V.....	73
Proposta de Trabalhos Futuros.....	73

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Porosidades num laminado de fibra de carbono.....	6
Figura 2.2 - Zona deficiente em fibras, ou " <i>Resin Rich</i> ".	6
Figura 2.3 - Enrugamento numa placa de PRF.	7
Figura 2.4 - Exemplo de processo de ruína por delaminação.	8
Figura 2.5 - Exemplos de delaminação induzida por furação.....	9
Figura 3.1 - Modelos de análise de PRF.....	11
Figura 3.2 - Detecção de defeitos com UT convencional].	12
Figura 3.3 - Funcionamento de uma sonda UT angular.	13
Figura 3.4 - Como obter curva DAC.....	14
Figura 3.5 - Curvas DAC com campo próximo.	14
Figura 3.6 - Zonas do feixe ultrassónico.	15
Figura 3.7 - Efeito do tamanho do defeito.....	16
Figura 3.8 - Efeito de fronteira.	17
Figura 3.9 - Demonstração do efeito de fronteira da Figura 3.8.	17
Figura 3.10 - a) sonda linear simples; b) sonda angular simples; c) sonda de alta frequência; d) exemplos de blocos de calibração.	18
Figura 3.11 - Sonda convencional com calço da sonda PAUT.	19
Figura 3.12 - Provete em PRFC com degrau de 2 para 1 mm.	19
Figura 3.13 - Teste de parâmetros para UT convencional: a) calço 40mm t=2; b) calço 40mm t=1; c) calço 35,5mm t=2; d) calço 35,5mm t=1.	20
Figura 3.14 - Leitura de placa de 1mm com gama 0,5-20 MHz	20
Figura 3.15 - Sonda PAUT de 64 elementos	21
Figura 3.16 - Emissão e orientação de sinal em "Phased Array".	22
Figura 3.17 - Representação do modelo BRM.	23
Figura 3.18 - Detecção e medição de dois furos com PAUT.....	23
Figura 3.19 - Modos de scanning com phased array.....	24
Figura 3.20 - Leitura de descontinuidades numa peça de PRF.	25
Figura 4.1 - Calço de 40mm para PAUT	31
Figura 4.2 - Primeiro provete para testes preliminares de calibração	32
Figura 4.3 - Peça real em fibra de vidro.....	32
Figura 4.4 - Frequência de leitura a a) 5 MHz e b) 3 MHz num provete com 2mm de espessura	33
Figura 4.5 - Leituras com nº de elementos a) 16, b) 12, c) 10 e d) 8.	34
Figura 4.6 - Leituras com ganho de a) 32dB, b) 26dB e c) 20dB	35
Figura 4.7 - Varrimento de abertura reduzida	37
Figura 4.8 - Efeito de redução da abertura	38

Figura 4.9 - Representação de defeitos no provete.....	39
Figura 4.10 - Provete de delaminação	40
Figura 4.11 - Jig/Gabarito de suporte para os ensaios experimentais.	41
Figura 4.12 - Setup utilizado para os ensaios experimentais	41
Figura 4.13 - Leitura DEL_10MHz com a) 24 db; b) 36db; c) 30db	43
Figura 4.14 - Comparação de Leitura a 5MHz (a) e 10 MHz (b).....	44
Figura 4.15 - Comparação entre leituras a 48 elementos a) e a 32 elementos b).....	45
Figura 4.16 - Comparação de leitura com abertura de 6 PZTs a) e com 10 PZTs b).....	46
Figura 4.17 - Leitura do defeito DEL4 com abertura de 6, 36db, 10MHz e matriz de 48.	47
Figura 4.18 - Ensaios de janela útil de parâmetros num componente real.....	48
Figura 4.19 - Focagem do provete com UT convencional	48
Figura 4.20 - Leitura UT convencional do Def. 3.	49
Figura 4.21 - Leituras com sondas direitas da espessura do provete (a), e do Defeito 3 (b).	50
Figura 4.22 - Provete de Furação.	53
Figura 4.23 - Layout dos furos no provete de delaminação.....	54
Figura 4.24 - Leituras a 8MHz a) e a 10 MHz b).....	56
Figura 4.25 - Comparação de ensaios com abertura de 8 a), 12 b) e 16 c).	56
Figura 4.26 - Comparação entre leituras com abertura de 6 (a) e 9 (b) PZTs.....	57
Figura 4.27 - Comparação de leituras com parâmetros: a) abertura de 8 c/ matriz de 32; b) A. de 8 c/ matriz de 40; c) A. de 6 c/ matriz de 32.	58
Figura 4.28 - Medição Def. B HOLPF-32-6-M.....	59
Figura 4.29 - Ensaios finais de Furação.....	59
Figura 4.30 - Impacto de alteração do número de elementos ativos na abertura [60].	62
Figura 4.31 - Figura de comparação de parâmetros.....	63
Figura 5.1 - Folha de cálculo de parâmetros PAUT em excel.	74
Figura 5.2 - Simulação para parâmetros ótimos experimentais.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Comparações qualitativas entre os diferentes métodos.....	27
Tabela 3.2 - Comparação geral entre UT e PAUT.....	28
Tabela 3.3 - Normas Utilizadas na regulação de UT e PAUT	28
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.4	34
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.5	35
Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.6	36
Tabela 4.4 - Testes Preliminares de Delaminação – 64 elementos	42
Tabela 4.5 - Testes Preliminares de Delaminação – 48 elementos	42
Tabela 4.6 - Testes intermédios de delaminação.	44
Tabela 4.7 - Parâmetros de impacto da abertura em leituras de delaminação	46
Tabela 4.8 - Parâmetros de ensaios de delaminação num componente real (matriz de 48 elementos).	47
Tabela 4.9 - Janela de parâmetros para defeitos de delaminação.....	51
Tabela 4.10 - Parâmetros iniciais furação 8MHz.	55
Tabela 4.11 - Parâmetros iniciais furação 10MHz.	55
Tabela 4.12 - Parâmetros utilizados na segunda fase de ensaios de furação.	57
Tabela 4.13 - Parâmetros para teste de janela útil em furação 10MHz e matriz de 32 PZTs.	58
Tabela 4.14 - Janela de parâmetros Furação.....	60
Tabela 4.15 - Janela geral de parâmetros para PAUT em PRFC.	63

Lista de Siglas e Acrónimos

AESA	<i>Active Electronic Scan Array</i>
BRM	<i>Backwall Reflection Method</i> (Método de Reflexão de Parede de Fundo)
DAC	<i>Distance Amplitude Correction</i>
FMC	<i>Full Matrix Capture</i>
IRT	<i>Infra-Red Thermography</i>
PAUT	<i>Phased Array Ultrasound Testing</i>
PESA	<i>Passive Electronic Scan Array</i>
PRF	Polímero Reforçado por Fibra
PRFC	Polímero Reforçado por Fibra de Carbono
PZT	<i>PieZoelectric Transducer</i>
SAFT	<i>Synthetic Aperture Focusing Technique</i>
TFM	<i>Total Focusing Method</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UT	<i>Ultrasound Testing</i>

Lista de Símbolos

α	Coeficiente de atenuação acústica [dB/m]
$\Delta\phi$	Varição do ângulo de emissão da fase [rad]
λ	Comprimento de Onda [m]
v	Velocidade de vibração da partícula [m/s]
ρ	Densidade do material [Kg/m ³]
c	Velocidade de propagação do som no material [m/s]
D	Diâmetro do PZT [m]
D_{eff}	Diâmetro efetivo [m]
d	Profundidade/Espessura [m]
f	Frequência [Hz]
N	Distância de campo próximo [m]
P	Pressão do sinal sonoro à profundidade d [Pa]
P_0	Pressão do sinal sonoro à superfície [Pa]
p	Pressão sonora [Pa]
$p(\delta)$	Passo, ou distância entre os centros dos elementos numa sonda PAUT [m]
V	Velocidade de propagação do som no meio [m/s]
Z	Impedância acústica característica [Rayl]
z	Impedância acústica específica [Rayl]

Lista de Artigos Publicados no Âmbito da Dissertação

No âmbito do desenvolvimento desta dissertação, foram desenvolvidos dois trabalhos, sob a forma de artigos:

- Cardoso, P., & Simões, J. (2024, May 28). Ensaio por Ultrassons em compósitos laminados de polímero reforçado por fibras. RIQUAL 2024.
- Cardoso, P., & Simões, J. (2025). Comparação de métodos de inspeção de materiais compósitos com ensaios por ultrassons. TMQ - TECHNIQUES, METHODOLOGIES AND QUALITY, N°16, 159–188, ISSN: 2183-0940.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita uma introdução ao trabalho realizado, no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa.

Primeiramente, será feito um enquadramento do tema, enaltecendo a importância do tema e o âmbito do seu desenvolvimento. Seguidamente, vão ser apresentados os objetivos principais do desenvolvimento deste trabalho. Por fim, vai ser apresentada a estrutura do documento, especificando-se os conteúdos de cada parte.

1.1. Enquadramento

Cada vez mais, os materiais compósitos são utilizados na indústria. Com isto, surge a necessidade de se verificar se estes componentes se encontram em conformidade com as especificações impostas. Na indústria aeronáutica, onde cada vez mais se procuram fazer estruturas mais leves e eficientes, sem comprometer a segurança e resistência das mesmas, há a preocupação de desenvolver métodos de controlo destes componentes. A isto, alia-se a necessidade de controlo a 100% da produção, inviabilizando qualquer tipo de ensaios destrutivos.

Estas necessidades, presentes em vários setores, já levaram a desenvolvimentos de vários métodos de controlo em compósitos, sendo alguns, adaptados da indústria metalomecânica. De estes, os ensaios por ultrassons (UT ou "*Ultrasound Testing*"), já testados e utilizados em outros materiais, já provaram ser capazes de ser adaptados para utilização em compósitos de Polímero Reforçado por Fibra (PRFs). O baixo custo de operação e o impacto nulo nos componentes inspecionados torna este método num dos mais indicados para múltiplos tipos de indústrias, que trabalhem com este tipo de materiais.

Como uma parte importante, no futuro leque de métodos, utilizáveis, no futuro dos ensaios não destrutivos, é importante começar a criar bases para investigação e desenvolvimento destas metodologias, permitindo criar o *know-how* necessário para utilização e melhoramento de processos futuros. Embora haja algum *know-how*, no que toca à inspeção de materiais metálicos e a utilização de métodos convencionais, ainda não há bases sólidas na inspeção de compósitos, nem na utilização de técnicas mais avançadas de inspeção, como o exemplo na tecnologia de *phased array* (*Phased Array Ultrasound Testing* ou PAUT). Isto não é auxiliado pelo facto de o equipamento disponível não ser indicado, nem configurável, para um modo de inspeção em materiais compósitos de parede fina. Logo, é preciso encontrar e/ou criar um fundamento teórico-prático, que permita a execução de futuros trabalhos de pesquisa dentro desta área.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é preencher a lacuna de capacidades, no que toca à inspeção de materiais compósitos com ensaios por ultrassons, no Instituto Politécnico de Setúbal. Isto possibilita a criação de uma base para início da parte experimental e prática, a partir da qual poderão ser iniciados outros trabalhos, sobre ensaios não destrutivos por ultrassons em componentes fabricados com material compósito.

Para isto, é preciso cumprir três importantes objetivos:

- Primeiramente, é preciso conhecer todos os diferentes tipos de defeitos, que são inerentes aos materiais compósitos laminados. A categorização e especificação destes defeitos será importante para poder identificar possíveis estratégias de inspeção e reconhecimento desses mesmos defeitos. Preferencialmente, devem ser listados os tipos mais frequentes de defeitos e as suas causas.

- É importante acudir à necessidade de uma detalhada, mas resumida base teórica sobre o funcionamento deste tipo de tecnologia de ensaios não destrutivos. Primeiro na vertente do seu funcionamento fundamental, seguindo-se depois de uma especificação de ambas as suas vertentes mais convencionais e mais atuais.

- Por fim, com base no conhecimento recolhido, é preciso criar uma metodologia experimental, que permita criar métodos e ferramentas que proporcionem condições iniciais favoráveis a futuros trabalhos. Coisas como procedimentos, conhecimento sobre manuseamento de equipamentos e janelas de parâmetros utilizáveis, são fatores fulcrais para o objetivo final.

1.3. Estrutura do documento

O presente documento, encontra-se dividido em 6 partes principais, respetivamente:

- A introdução permite enquadrar o leitor no âmbito do desenvolvimento do restante trabalho. Enunciam-se os objetivos, a estrutura do documento e a justificação para o desenvolvimento do mesmo.

- O segundo capítulo serve como uma lista de todos os possíveis de feitos, que podem ocorrer/estar contidos neste tipo de materiais.

- O terceiro capítulo serve como a principal base teórica do trabalho. Neste são explicados os fundamentos do funcionamento da tecnologia de ensaios por ultrassons (UT). A seguir desta introdução, são diferenciados e aprofundados dois dos métodos de UT. Primeiro, os ensaios convencionais e as suas particularidades, seguindo-se a utilização de sondas multi-elemento de *phased array*.

- O quarto capítulo é composto pela parte experimental. Este passa por uma introdução primária, seguindo-se um estudo de parametrização e os seus efeitos. Depois são realizados ensaios experimentais para aproximação a uma janela de parâmetros, capazes de detetar dois dos defeitos mais críticos em PRFs. Por fim, é feita uma análise aos resultados obtidos, anunciando-se as capacidades dos procedimentos e métodos elaborados durante o trabalho.

- A Conclusão permite indicar se os objetivos do trabalho foram cumpridos, como realizar observações finais dos resultados obtidos. Serão ainda propostos alguns trabalhos futuros a desenvolver, no seguimento desta dissertação.

- Por fim, nos apêndices, é possível observar-se todos os ensaios realizados no decorrer da parte experimental e consultar alguns documentos, pertinentes, também, ao desenvolvimento da parte experimental.

Capítulo 2

Descontinuidades/malformações em materiais compósitos

Nesta segunda parte do trabalho, são enumerados alguns tipos de defeitos comuns em componentes de PRF. Estes são descritos um a um e agrupados, relativamente à maneira como influenciam negativamente o funcionamento, ou a integridade, do material compósito.

2.1. Considerações Iniciais

Os PRF são compostos por dois tipos de materiais. As fibras, que vão garantir as propriedades de resistência mecânica do material, e a matriz polimérica, que é responsável por agregar o reforço de fibra, tornando o compósito num corpo sólido.

Os PRF laminados são materiais que, mantendo um peso inferior ao aço, possuem uma melhor resistência à tração [1], à corrosão [2] e ao desgaste [3]. Isto resulta numa maior fiabilidade e longevidade nas estruturas e componentes. Por outro lado, a natureza laminada dos PRF leva a que sejam menos resistentes a esforços de compressão, no entanto, existem maneiras de mitigar isto, como utilização de múltiplas orientações na disposição da fibra [4].

O tipo de fibras utilizadas, como vidro, carbono e *kevlar*, que são as mais empregues na indústria aeronáutica, influenciam bastante a resistência a esforços mecânicos. [5][6]. A fibra de vidro, embora seja a mais pesada das três, possui um baixo custo e uma resistência aceitável para componentes menos críticos, como chapas, carenagens, etc. A ductilidade da fibra de vidro também permite o seu uso em componentes sujeitos a deformações mais acentuadas. A fibra de carbono, já tem uma maior resistência, a troco de uma menor ductilidade [5]. No entanto, a fibra de carbono garante uma maior estabilidade dimensional e maior resistência à corrosão, mantendo uma densidade muito baixa [7]. As fibras de *kevlar* possuem uma resistência à tração elevada, mas inferior ao carbono. No entanto, a fibra de *kevlar* possui melhor ductilidade, pelo que é utilizada em aplicações estruturais sujeitas a fadiga [8].

A utilização de mais que um destes reforços permite jogar com as propriedades dos materiais, obtendo-se peças mais leves, resistentes a vários tipos de esforços, etc.[6][9].

2.2. Descontinuidades/malformações na matriz

Estas ocorrem na parte polimérica do compósito e ocorrem durante a cura, injeção, ou aplicação do polímero

2.2.1. Tensões residuais

Os diferentes coeficientes de expansão térmica no compósito podem originar zonas de concentração de tensões. Isto resulta na perda de propriedades mecânicas e pode causar outro tipo de malformações. [10].

2.2.2. Vazios

Vazios, ou poros, visíveis na Figura 2.1, ocorrem durante o processo de fabrico do compósito. Devem-se ao aprisionamento de bolhas de ar, ou à má adesão entre a matriz e a fibra. Estas porosidades levam à perda de propriedades [11] e à propagação de fendas por fadiga [12].

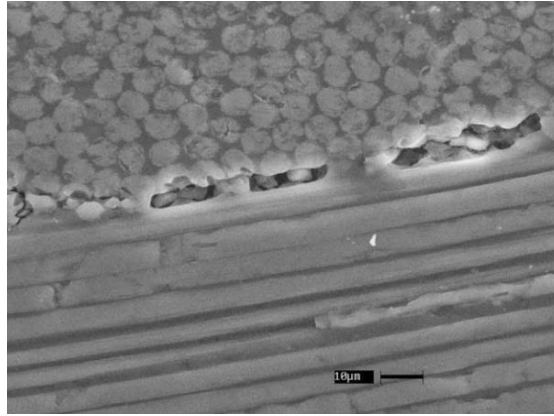


Figura 2.1 - Porosidades num laminado de fibra de carbono [12].

2.2.3. Zonas deficientes em fibra

As zonas deficientes em fibra, ou *resin rich*, presente na Figura 2.2, são zonas preenchidas maioritariamente por matriz polimérica, existindo uma baixa concentração de fibra de carbono no material. Este tipo de defeitos leva à criação de “pontos fracos” no material e redução na capacidade de resistir a esforços e facilita a iniciação de falhas no material [13].

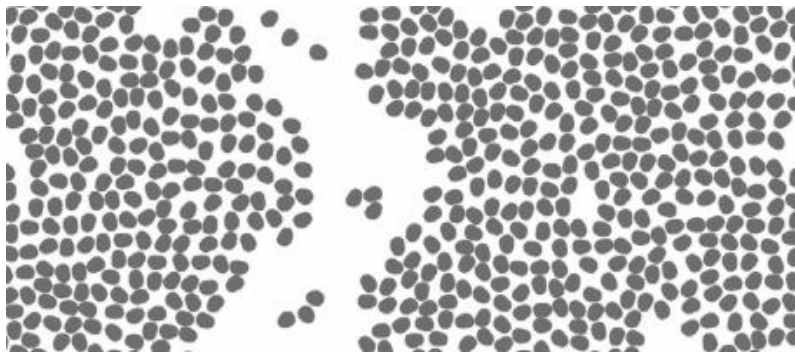


Figura 2.2 - Zona deficiente em fibras, ou "*Resin Rich*" [13].

2.3. Problemas no reforço

Os defeitos na fibra podem ocorrer, desde a sintetização da mesma, à produção e cura do componente em PRF, comprometendo as propriedades do compósito.

2.3.1. Enrugamento das fibras

O enrugamento do tecido de fibra altera o ângulo de serviço das fibras, levando ao enfraquecimento do reforço e consequente fratura ou dano do componente [14]. Estes defeitos, Figura 2.3, devem-se à má orientação/estabilização das fibras durante a produção [10].

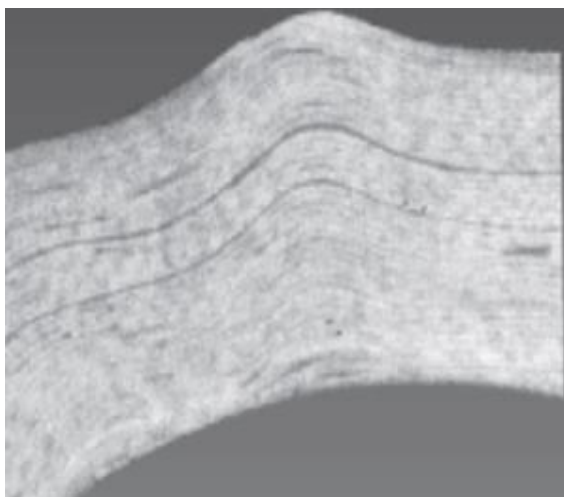


Figura 2.3 - Enrugamento numa placa de PRF [14].

2.3.2. Danos na fibra

A fibra é responsável pela resistência mecânica do componente, logo, se esta estiver danificada, vai colocar em causa a capacidade do componente [15].

2.4. Problemas de Interface

Os problemas de interface ocorrem quando os componentes do compósito possuem problemas de adesão. Isto pode ocorrer entre as camadas do material laminado, ou, entre a fibra e a matriz. A perda de coesão do material leva ao não-aproveitamento das valências da fibra, o que leva à ruína do PRF.

2.4.1. Delaminação de camadas

A acumulação de tensões na peça, levam à separação das camadas da peça, quando sujeita a forças de compressão constantes [16]. A delaminação reduz a resistência à compressão, levando à instabilização e ruína do componente. Isto é visível na Figura 2.4.

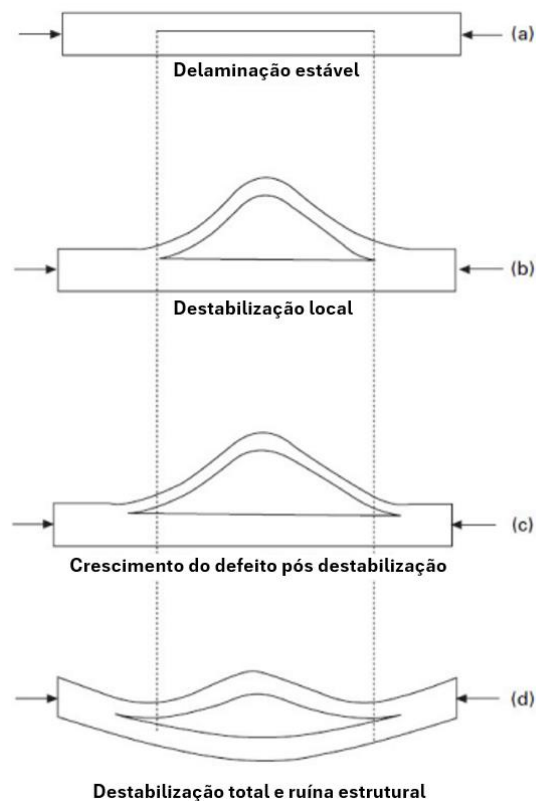


Figura 2.4 - Exemplo de processo de ruína por delaminação [14].

2.4.2. Interface Fibra-Matriz

As fibras são, maioritariamente, inertes e possuem uma baixa superfície de contacto, levando à dificuldade de criar ligações sólidas. Isto é agravado por infiltrações de humidade durante a produção do compósito, que aumenta a capacidade da matriz de molhar o reforço [16]. Pela modificação das fibras, este problema pode ser mitigado, aumentando a superfície de contacto entre a fibra e a matriz polimérica [17].

2.5. Descontinuidades/Malformações de maquinagem

Estas descontinuidades ocorrem durante processos de maquinagem, como furação e corte/desbaste.

2.5.1. Furação

A furação, utilizada no processamento de componentes em PRF, cria imperfeições nas superfícies maquinadas. A aplicação de força, ou outro tipo de esforços, durante a furação, cria a separação das camadas do material. Isto deve-se às forças envolvidas na furação e a forma da broca, como se vê na Figura 2.5 [18].

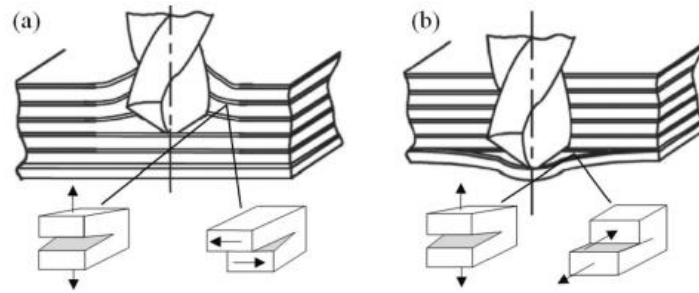


Figura 2.5 - Exemplos de delaminação induzida por furação [18].

Na Figura 2.5 a), as lâminas da broca forçam uma separação das camadas do composto através da rotação da ferramenta. Essas camadas são depois puxadas para cima pelos sulcos de remoção de aparado da broca. Na Figura 2.5 b), a força, que a broca faz na peça, cria uma delaminação nas camadas inferiores mais finas. Estas são depois puxadas para a frente e para baixo, resultando numa maior área de descontinuidade.

2.5.2. Corte

Noutras operações de corte, como fresagem e corte com serrote, também é possível observar a ocorrência dos mesmos defeitos observados para o caso da furação. No entanto, na fresagem, a maquinagem da superfície da peça leva à deformação da superfície e ao aparecimento de falhas superficiais microscópicas. Estas podem dar origem a fendas, que podem propagar por fadiga e/ou originar delaminação no componente. [19]

Capítulo 3

Análise por Ultrassons Convencionais Versus *Phased Array*

Nesta terceira parte, é feita uma pequena introdução à utilização de UT em PRF. De seguida vão ser explicados os conceitos de UT e da tecnologia de *phased array*, PAUT, explicando o funcionamento, equipamentos utilizados e algumas particularidades relativas a cada um dos métodos.

3.1. Ultrassons em Compósitos

Existem várias técnicas e métodos utilizados no controlo de peças em compósito, como Termografia por Infravermelhos (*IRT* em inglês) [20], Correntes Induzidas [21], Líquidos Penetrantes, Shearografia [22], Ultrassons [23], entre outros. Os ultrassons têm-se provado capazes de detetar defeitos em aeroestruturas/componentes em aeronaves.

Um compósito laminado, ao contrário de um material metálico, não é homogéneo. Os diferentes materiais que o compõem possuem propriedades acústicas distintas, requerendo uma análise segundo modelos de análise específicos, apresentados na Figura 3.1 [23].

O modelo de análise isotrópica assume que o provete de PRF é um material homogéneo com uma velocidade de propagação do som constante. Isto permite uma análise rápida, no entanto, pode levar a medições pouco precisas. O modelo Homogéneo, onde, embora se assumam diferentes velocidades do som ao longo do PRF, despreza os efeitos de reflexão e refração do feixe sonoro no material. Por fim, o modelo Anisotrópico Heterogéneo assume diferentes velocidades de propagação nos diferentes materiais e os resultantes fenómenos de refração do feixe sonoro. Assim, é possível obter uma ótima localização e medição dos defeitos. No entanto, é um processo moroso envolvendo maiores recursos de processamento de dados [23].

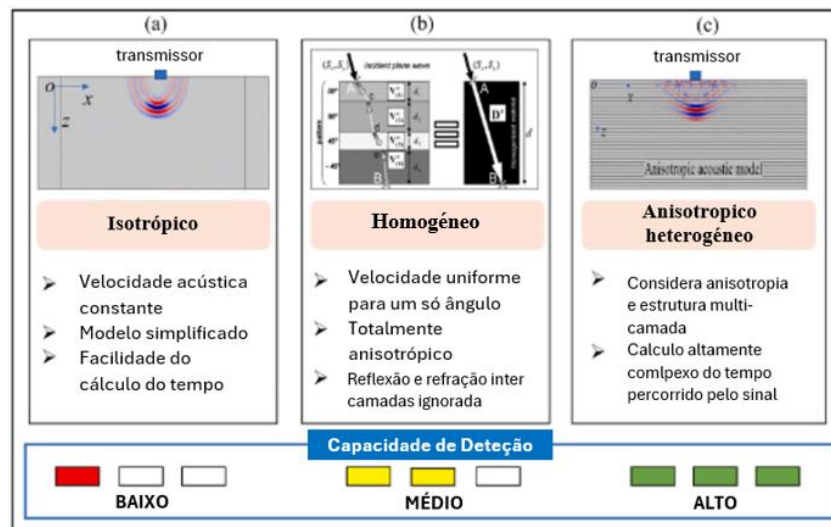


Figura 3.1 - Modelos de análise de PRF [23].

3.2. Ensaios por ultrassons convencionais

Os ultrassons são ondas sonoras com frequências superiores a 20kHz, situando-se acima do espectro auditivo humano. A emissão de ultrassons, permite ter perceção de discontinuidades, formas, distâncias e outros fatores no interior de sólidos através da análise do eco do sinal inicial.

O funcionamento deste tipo de testes necessita de um gerador de sinal, um transdutor, um

recetor e um equipamento de leitura. Quando o sinal é gerado, é depois transformado em som e emitido para a peça. Seguidamente, o eco gerado pelo sinal inicial é captado pelo recetor e processado pelo aparelho de leitura [24]. O eco resulta na reflexão do sinal ultrassónico em descontinuidades, anomalias, mudanças de fase e faces do componente em estudo.

Embora o princípio de funcionamento da inspeção por ultrassons, tenha sido elaborado muito antes, nos anos 1930 foram realizados testes experimentais que permitiram a criação de equipamentos capazes de emitir sinais e processar o eco recebido. Surgiram, em 1945, os primeiros equipamentos de ensaios por ultrassons [25]. No entanto, só após 20 anos, com o desenvolvimento dos estudos da propagação de ondas sonoras em sólidos, e com o desenvolvimento dos computadores, é que esta tecnologia começou a ser mais utilizada [26].

Desde então os ensaios por ultrassons têm sido utilizados em vários setores, incluindo no ramo aeronáutico. Isto deve-se, não só ao elevado grau de exigência no controlo da produção, mas também, na inviabilidade de controlo destrutivo em todos os componentes.

3.2.1. Funcionamento

O som propaga-se na peça, com uma velocidade conhecida, onde embate nas descontinuidades, interfaces fibra-matriz e paredes de fundo [27], sendo refletido de volta para a sonda. Estes ecos são recebidos pela sonda e é registado o tempo de propagação do som, ou *ToF* (*Time of Flight*). Tendo o *ToF* e a velocidade de propagação, é calculada a distância para cada eco recebido, conforme Figura 3.2.

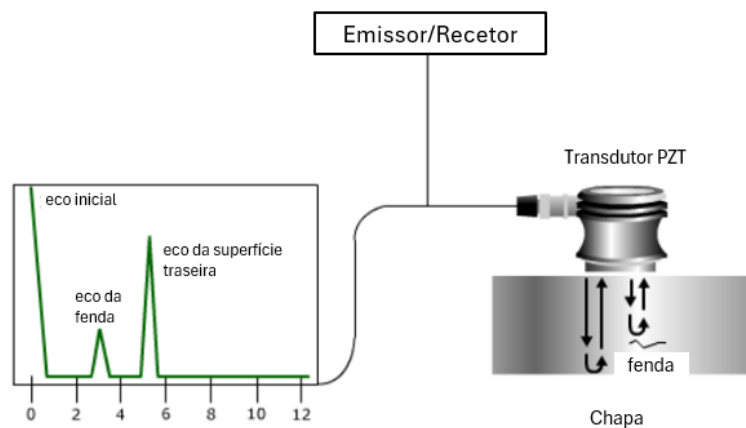


Figura 3.2 - Detecção de defeitos com UT convencional [28].

No caso de uma sonda angular, o feixe é refletido em ângulo, continuando a percorrer o interior do material, refletindo o feixe nas extremidades opostas do componente. Isto possibilita a incidência do sinal ultrassónico em zonas de difícil acesso, como se vê na Figura 3.3.

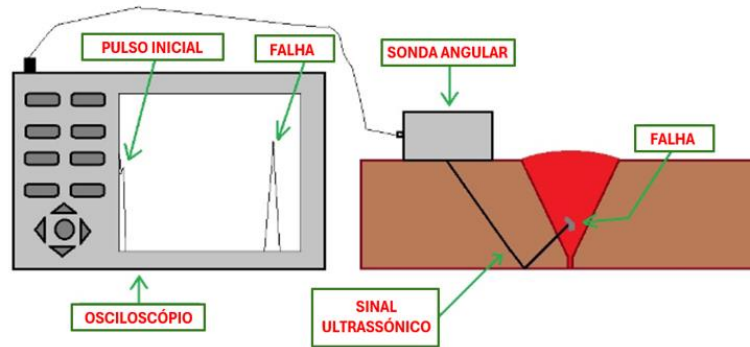


Figura 3.3 - Funcionamento de uma sonda UT angular [29].

Os UT são dependentes das propriedades acústicas do material. No caso de se testar um material com diferentes tipos de fibra, ou proporções de fibra-polímero, é preciso realizarem-se testes para se saber as suas propriedades. Isto acontece, pois, a velocidade de propagação do som varia, dependendo do material em questão [30].

Independentemente do material a analisar, a capacidade de detetar defeitos reduz-se com o aumento da profundidade do defeito. Isto designa-se de impedância ultrassónica e deve-se à capacidade de absorção e difusão sonora do material em teste [31]. A atenuação do sinal, dada pela impedância acústica calculada pelas equações 3.1 e 3.2, pode ser registada numa curva, permitindo identificar, para defeitos da mesma dimensão, a perda do sinal de retorno em função da profundidade, na equação 3.3 [32]. Estas curvas de Correção de Amplitude em Distância, ou *Distance Amplitude Correction* (DAC), são visíveis na Figura 3.4 abaixo.

$$z = \rho c \quad (3.1)$$

$$z = \frac{p}{v} \quad (3.2)$$

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\alpha(f)d} \quad (3.3)$$

Z - Impedância acústica característica [Rayl]

c - Velocidade do som no material [m/s]

ρ - Densidade do material [Kg/m³]

z - Impedância acústica específica [Rayl]

p - Pressão sonora [Pa]

v - Velocidade de vibração da partícula [m/s]

P - Pressão do sinal sonoro à profundidade d [Pa]

P₀ – Pressão do sinal sonoro à superfície (d=0) [Pa]

$\alpha(f)$ – Coeficiente de atenuação em função da frequência [Np/m ou dB/m]

f - Frequência

d – Profundidade [m]

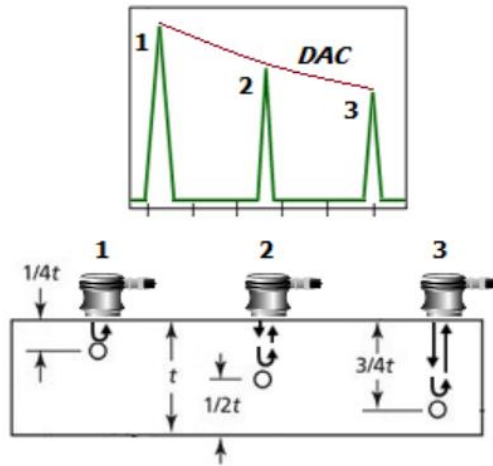


Figura 3.4 - Como obter curva DAC [28].

Estas curvas são obtidas, utilizando valores fixos para a emissão sonora, no entanto, aparelhos mais recentes são capazes de efetuar ajustes, automaticamente, após mudanças no ganho.

Na Figura 3.5 abaixo, é possível observar várias curvas de correção de amplitude. Na parte inicial (esquerda) da curva de cima pode observar-se uma reduzida amplitude do sinal recebido. Esta redução do sinal recebido é efeito de medições dentro do campo próximo da sonda de ultrassons.



Figura 3.5 - Curvas DAC com campo próximo [33].

Um feixe ultrassónico, devido à dimensão do Transdutor Piezoelétrico (PZT), possui fraca capacidade de leitura a baixas profundidades. Isto deve-se ao facto de o sinal sonoro não ter tido espaço para se concentrar num feixe mais denso. Assim, o feixe sonoro encontra-se dividido em 3 partes, como é possível verificar na Figura 3.6.

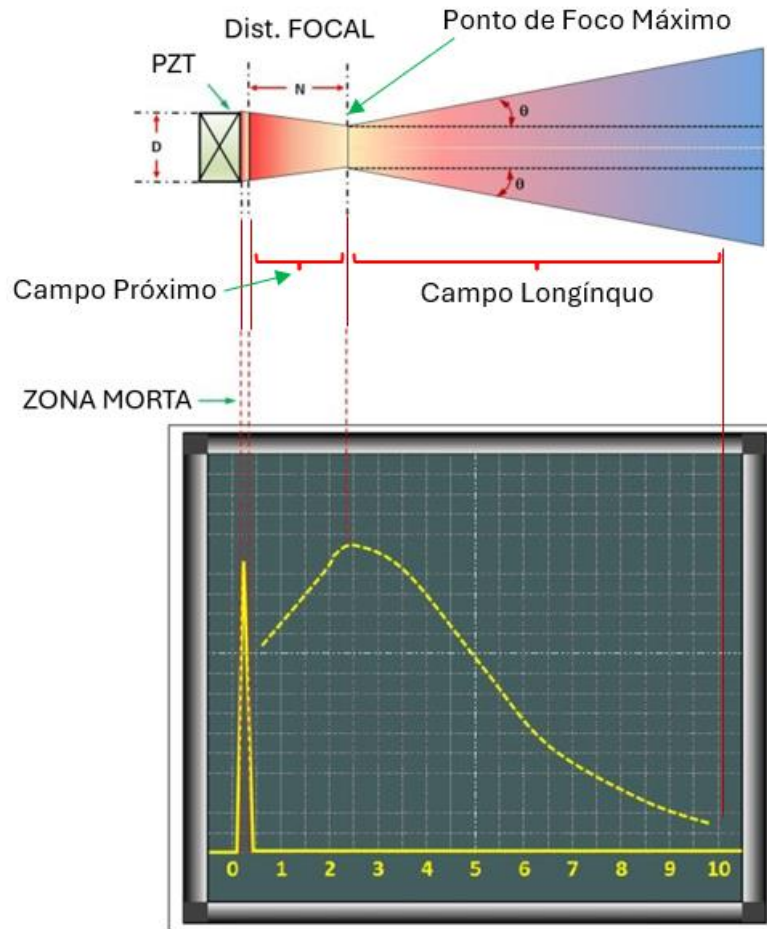


Figura 3.6 - Zonas do feixe ultrassónico [34].

Na zona de campo próximo, não é possível obter um retorno muito elevado pois o feixe ainda não se encontra focado. Esta distância é calculável pelas equações 3.4 e 3.5, apresentadas abaixo [35][36].

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (3.4)$$

$$N = \frac{D^2 f}{4V} \quad (3.5)$$

N - campo próximo (m)

D - diâmetro do PZT (m)

λ – Comprimento de onda (m)

V - velocidade de propagação do som (m/s)

f – Frequência (Hz)

Consequentemente, esta zona não é aconselhada para realização de testes pois a fraca recepção do sinal leva à possibilidade de não deteção de defeitos.

A zona de foco é o ponto de maior concentração do feixe sonoro e de maior retorno de qualquer reflexão num defeito interno. A partir daí entra-se na zona de transição para o campo distante, onde, por atenuação do sinal e redução do foco do feixe, o retorno do sinal original é cada vez menor. Este ponto encontra-se na distância N , ou seja, no fim da zona de campo próximo [37].

Os componentes fabricados em compósito possuem, maioritariamente, espessuras bastante reduzidas. Isto implica que a maioria dos defeitos se encontrem dentro do campo próximo das sondas. Para mitigar este fator, é necessário utilizar sondas especializadas, ou alterar as existentes, de modo a possibilitar a execução de testes em componentes de baixa espessura.

Alguns defeitos podem ser inferiores, ou maiores, que o perímetro da secção de corte do feixe ultrassónico. Isto vai influenciar a intensidade da resposta ao sinal emitido na peça, como é visto na Figura 3.7. No caso de apenas parte do feixe estar a incidir na descontinuidade, o sinal de retorno é menor do que se o feixe estivesse a incidir a 100% no defeito, como se vê na Figura 3.8. A isto chama-se o efeito de fronteira e é visível na Figura 3.9, em que a) é o feixe a incidir a 100% e b) a 50%, notando-se a perda de metade do sinal de retorno [38].

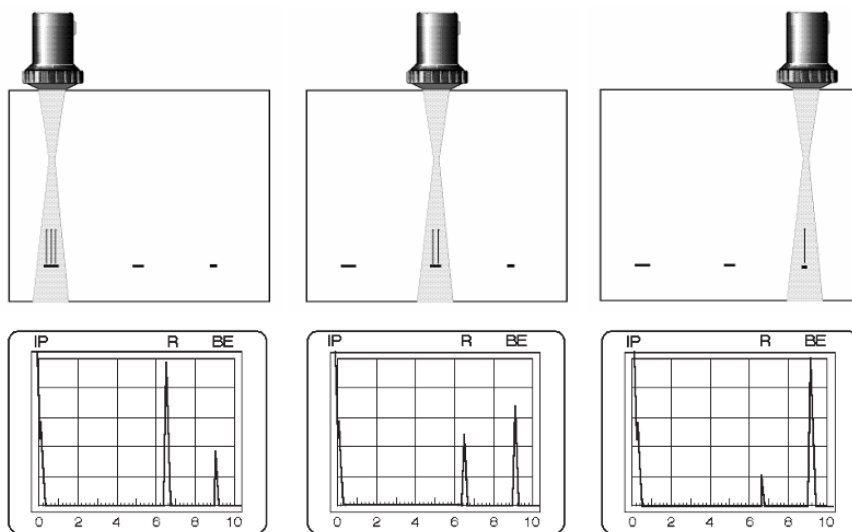


Figura 3.7 - Efeito do tamanho do defeito [38].

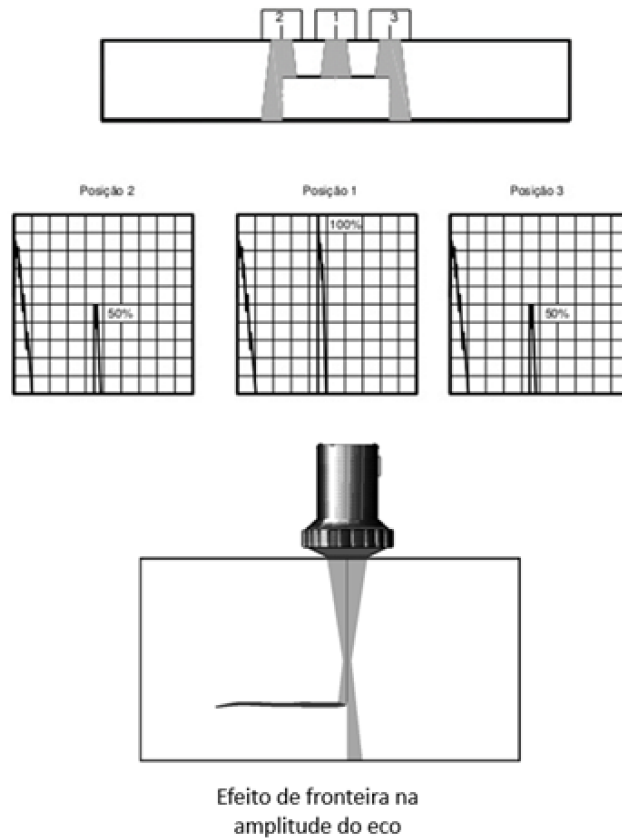


Figura 3.8 - Efeito de fronteira [38].

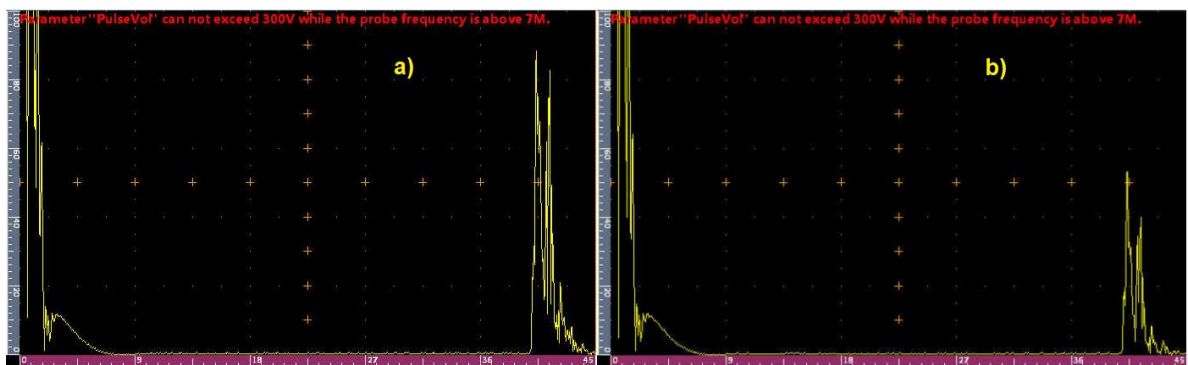


Figura 3.9 - Demonstração do efeito de fronteira da Figura 3.8.

3.2.2. Tipos de sondas

Para os diversos tipos de testes, existem diversos tipos de sondas. Neste caso, as sondas em estudo são sondas utilizadas em testes convencionais, utilizando um transdutor ligado por um acoplador líquido na superfície do componente. Este acoplador permite a passagem do sinal ultrassónico para a peça em teste.

As sondas lineares simples são utilizadas para fazer leituras perpendicularmente à superfície. A sonda, na Figura 3.10 a), possui apenas um cristal piezoelétrico. Esta funciona como transdutor e recetor, emitindo e recebendo o eco vindo da peça, respetivamente.

Sondas angulares simples, na Figura 3.10 b), são semelhantes às lineares, pois também têm apenas um cristal piezoelétrico. Por outro lado, este cristal encontra-se acoplado a um calço com um ângulo. No entanto, tendo em conta as diferentes propriedades acústicas do material e do calço, este ângulo sofre refração [23][39]. Para isto é realizado o procedimento de ajuste do ângulo de leitura, utilizando o bloco de teste da Figura 3.10 d).

As sondas de alta frequência, na Figura 3.10 c), possuem 2 cristais piezoelétricos. Estes permitem realizar leituras com frequências entre 20MHz e 225MHz, já dentro do espectro de Frequências Ultra Altas (UHF). Isto permite a redução da zona morta, leituras para espessuras mais pequenas e melhor resolução [40].

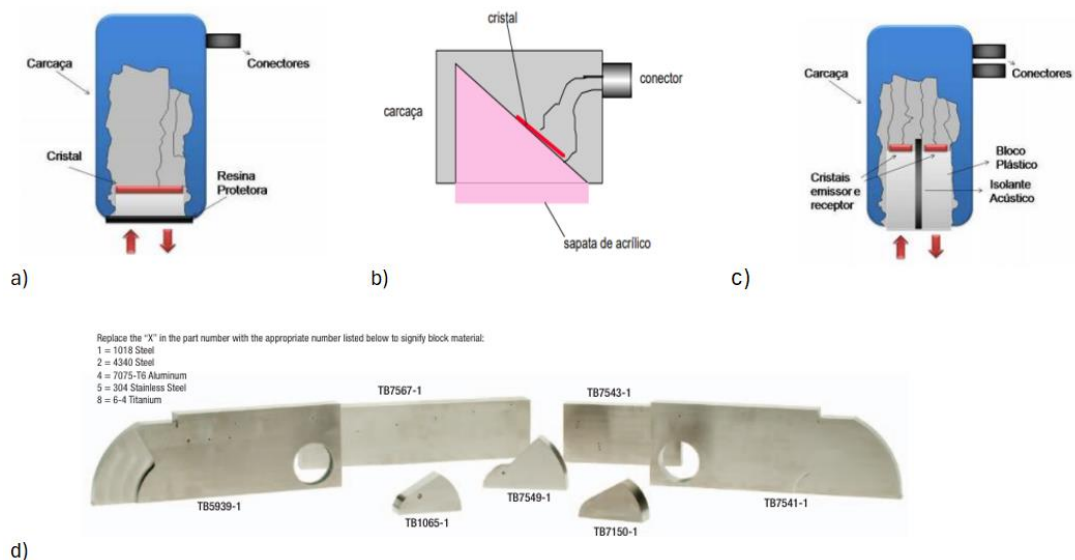


Figura 3.10 - a) sonda linear simples; b) sonda angular simples; c) sonda de alta frequência; d) exemplos de blocos de calibração [26] [41].

Em alguns casos, são acoplados calços nas sondas para proteção, para dar ângulo ao feixe ultrassônico ou para mitigar os efeitos da passagem do som da sonda para a peça. Nos ensaios por ultrassons são gerados ecos significativos na interface sonda-material, pelo que são utilizados calços para reduzir o eco inicial da leitura. Isto permite detetar defeitos à superfície e de componentes de espessura reduzida, como a grande parte de componentes em compósito

3.2.3. Parametrização UT

Para se conseguir obter focagens específicas, ou aumentar a sensibilidade a certo tipo de descontinuidades, é preciso configurar parâmetros no equipamento. Isto vai permitir amplificar as capacidades do equipamento utilizado para melhor desempenhar uma determinada função de controlo.

Para ver os efeitos de manipulação de parâmetros de medida, foram efetuados alguns testes que permitem ver os efeitos de manipulação dos mesmos. Neste caso, variou-se a espessura do calço, utilizado na anulação da zona morta da sonda (Figura 3.11), para detetar perda de sinal, para a leitura de um provete em PRFC com 2 e 1mm de espessura, visível na Figura 3.12.

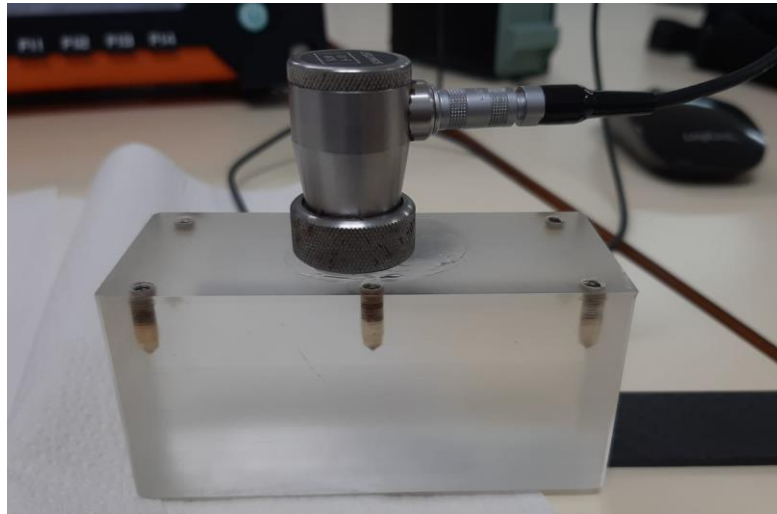


Figura 3.11 - Sonda convencional com calço da sonda PAUT.



Figura 3.12 - Provete em PRFC com degrau de 2 para 1 mm.

Na Figura 3.13, em a) e b) tem-se uma espessura de calço de 40mm. Em c) e d) é utilizado um calço de 35,5. EN a) e c) foi ensaiado o provete de 2mm. Depois, em b) e d) é o provete de 1mm. A leitura foi realizada com uma sonda convencional direita SONATEST SLM 5-10 e a gama de frequências utilizada é de 5 a 9 MHz.

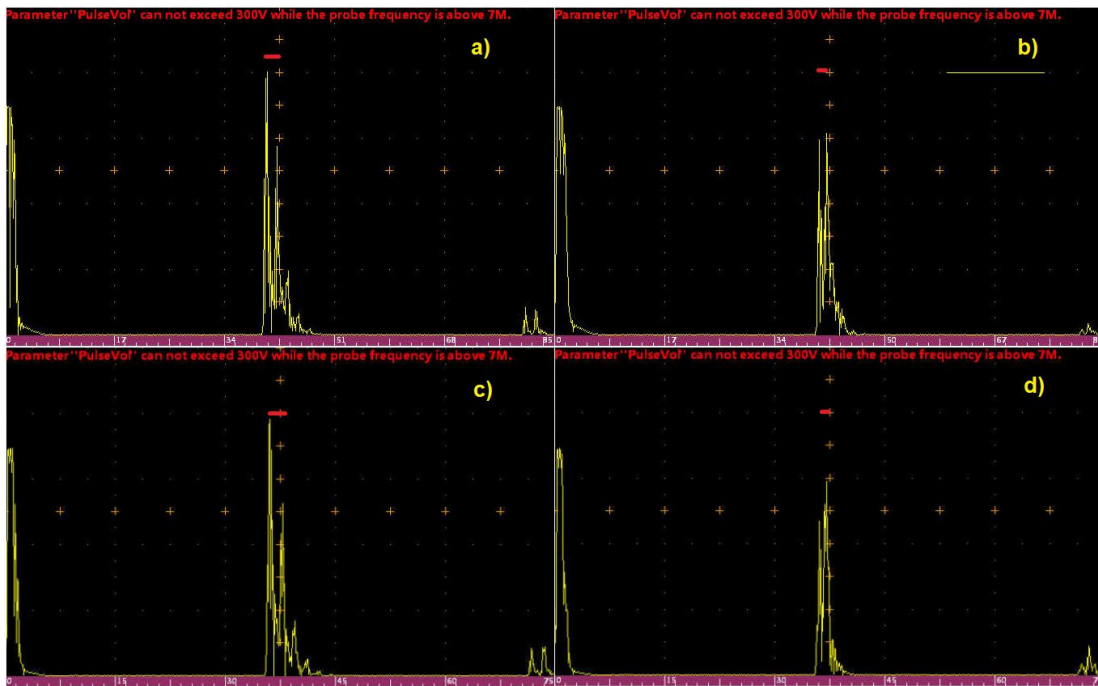


Figura 3.13 - Teste de parâmetros para UT convencional: a) calço 40mm t=2; b) calço 40mm t=1; c) calço 35,5mm t=2; d) calço 35,5mm t=1.

Para as leituras com calço de 40mm, registou-se uma maior perda de sinal, pois foram precisos valores maiores para o ganho. Foi possível focar, tanto a placa de 1mm, como a de 2mm. No entanto, foi realizada outra leitura, visível na Figura 3.14, onde se conseguiu obter uma melhor focagem da placa de 1mm, utilizando frequências mais elevadas.

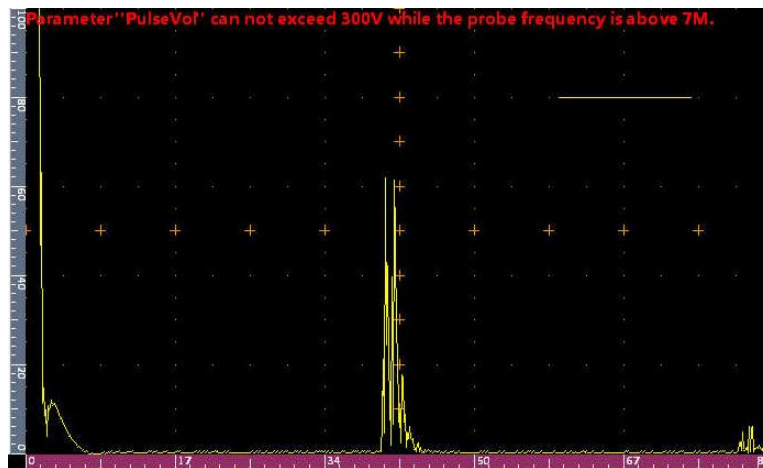


Figura 3.14 - Leitura de placa de 1mm com gama 0,5-20 MHz

Os resultados vêm a comprovar a capacidade superior de altas frequências para focar objetos de baixa espessura, referida na literatura [40].

3.2.4. Particularidades UT

O UT convencional, embora tenha vindo a ser desenvolvido, ainda possui alguns problemas relacionados com a refração no material. No caso de não possuir um controlador digital, que faça o pós-processamento do sinal, adaptando-o aos modelos de análise, não permite obter leituras claras. Isto pode reduzir a capacidade de medição de descontinuidades e pode dificultar a inspeção com sondas angulares. No entanto, é possível detetar descontinuidades como algumas porosidades e delaminações [42].

No caso de se utilizarem acoplantes e calços adequados, é possível medir espessuras de componentes. A utilização de sondas de alta frequência permite medir componentes com espessuras mais reduzidas e detetar/medir danos à superfície.

A representação crua dos ecos recebidos dificulta a compreensão da leitura, podendo resultar em controlos deficientes.

3.3. Ensaio por Ultrassons com Phased Array

O método *phased array* é utilizado num amplo leque de aplicações e tipos de utilização. Desde radares AESA/PESA, a sondas de ultrassons multi-elementos. Esta tecnologia emprega um conjunto de diversos emissores que emitem feixes ultrassónicos mais fortes e concentrados.

O PAUT utiliza tecnologia de *imaging*, ou seja, em vez de se obterem pulsos de eco, que tem de ser interpretados, aqui são obtidas imagens da secção da peça. Isto permite uma melhor perceção e deteção de descontinuidades no interior dos componentes.[23].

3.3.1. Funcionamento

A sonda de *phased array* é composta por entre 16 e 256 transdutores piezoelétricos (PZTs) [43]. Ao contrário do UT convencional, este tipo de sondas, na



Figura 3.15, possui uma menor zona morta e um feixe mais concentrado. Isto é possível através do disparo coordenado e sincronizado dos elementos.



Figura 3.15 - Sonda PAUT de 64 elementos

Através do método de interferência construtiva, o conjunto dos diversos sinais resulta num feixe com maior intensidade. As diferentes emissões, quando sincronizadas, amplificam-se numa direção, anulando-se em todas as outras. Através do controlo do desfaseamento da fase do sinal dos emissores, é possível redirecionar o feixe emitido, sem orientar fisicamente a matriz de PZTs. Martin Heck [44] fez uma breve explicação de como a alteração da fase de emissão do sinal permite obter uma alteração na direção do feixe, marcado como A na Figura 3.16.

O número de elementos da matriz afeta a capacidade de foco do feixe pois caso os elementos se encontrem demasiado dispersos, podem surgir feixes acidentais, que podem reduzir a eficácia do estudo. A distância entre estes encontra-se dependente do comprimento de onda do sinal. Isto é visível na Figura 3.16 B, C e D.

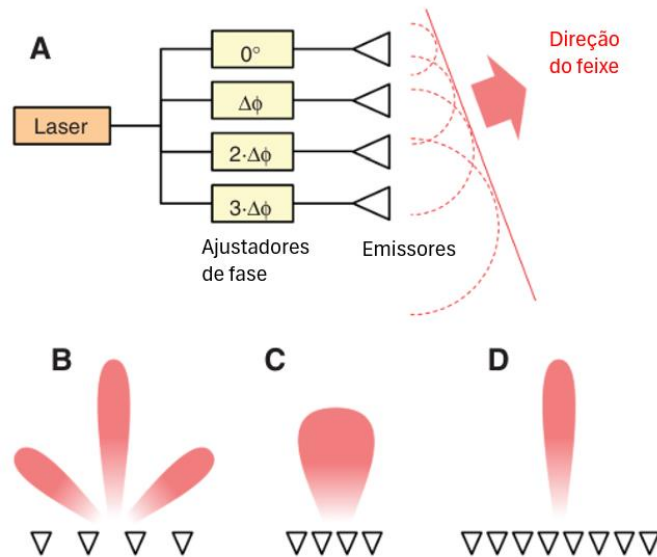


Figura 3.16 - Emissão e orientação de sinal em "Phased Array" [44].

Tendo em conta todo o controlo eletrónico e digital necessário, é utilizado um dispositivo de controlo de Emissão/Recessão. Este é responsável pela emissão do sinal sincronizado para a

peça e pela organização do sinal recebido. A criação de imagem com PAUT está dependente da aquisição destes sinais e na sua conversão em dados. Estes são depois analisados utilizando o *software* de processamento de imagem.

A criação da imagem da secção transversal do componente em teste é realizada através do método de *Full Matrix Capture* (FMC). Este método baseia-se na emissão faseada de cada elemento e a análise de ecos recebidos pelos restantes, que compõem a matriz. No teste de compósitos, o TFM (*Total Focusing Method*) permite obter dados fidedignos do posicionamento dos defeitos. Isto é possível através da utilização da geração de modelos de análise anisotrópicos, que permitem ter em conta as variações de ângulo do feixe ao longo das camadas do PRF [45]. No caso do *phased array*, o modelo do método do reflexo do eco de fundo, ou *BRM*, permite arbitrar a refração ultrassónica no compósito, realizando testes de variação de ângulo de emissão/receção, com grupos separados de elementos da sonda [46]. A Figura 3.17, exemplifica perfeitamente o modelo BRM. Os dados obtidos da leitura são depois concatenados numa matriz de dados, que é interpretada segundo os modelos anteriores, e passada a um algoritmo que utiliza a Técnica de Focagem de Abertura Sintética (conhecido como SAFT)[47]. Estas técnicas, aplicadas em softwares, por focar a imagem, mitigando os efeitos da difusão do sinal com o aumento da distância percorrida [48]. Após este processamento é possível obter uma imagem do corte da peça, como a da Figura 3.18.

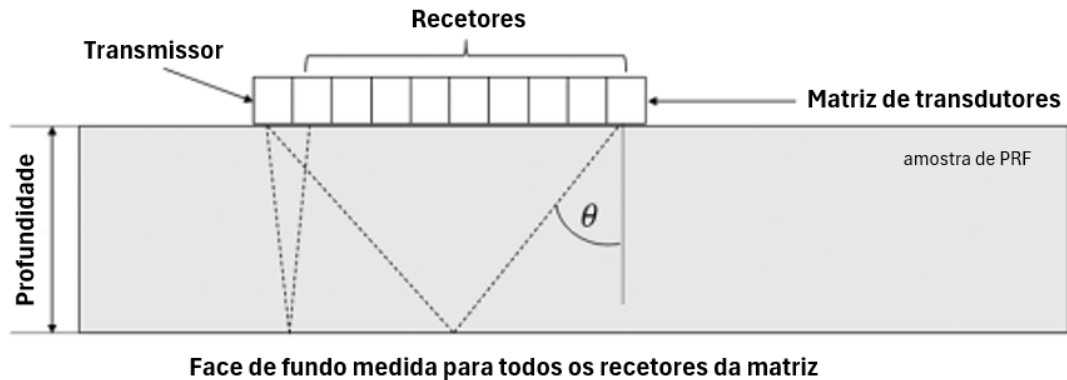


Figura 3.17 - Representação do modelo BRM [46]

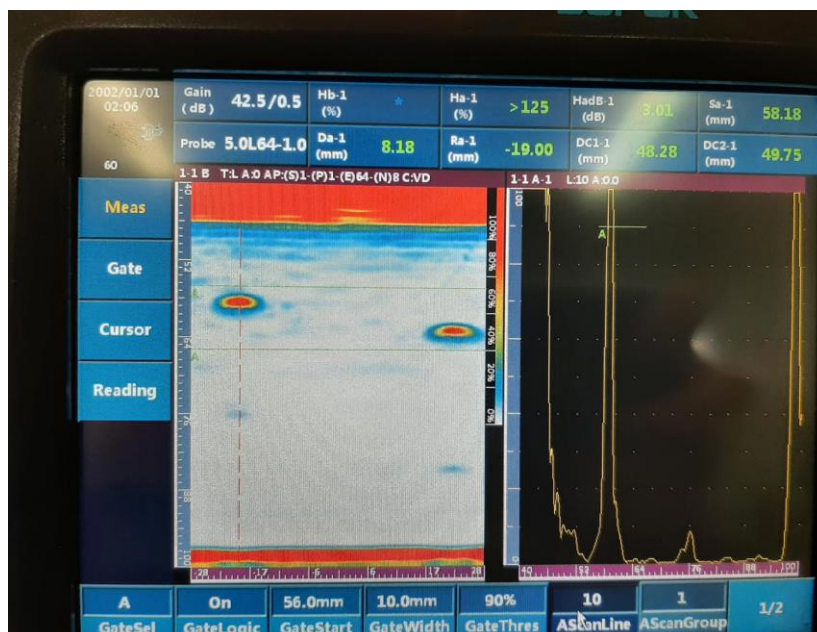


Figura 3.18 - Detecção e medição de dois furos com PAUT

Na Figura 3.19 encontram-se os diversos métodos de scan com PAUT, sendo estes o *A-scan*, *B-scan*, *C-scan* e *D-scan*. A representação *A-scan* mostra uma representação convencional dos ecos registados pelas discontinuidades. Os restantes são cortes da peça em diversos planos. Estes são gerados através da tecnologia de processamento de imagem descrita anteriormente.

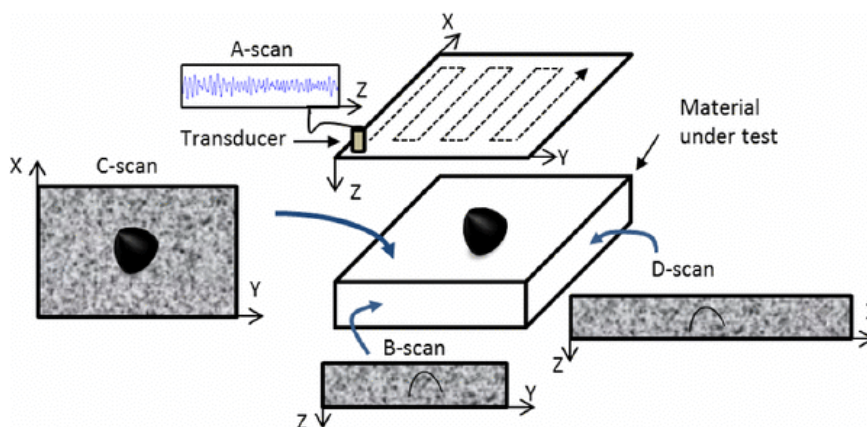


Figura 3.19 - Modos de scanning com phased array [49].

3.3.2. Tipos de sondas

O número de elementos da matriz vai depender do equipamento de geração e interpretação de sinais utilizado e o tipo de controlo a realizar. O equipamento tem de ter resolução suficiente para conseguir detetar defeitos, de acordo com as especificações de controlo do componente

testado. Para além disto, existem sondas de *phased array* mais adequadas para materiais compósitos. Isto deve-se a muitas peças de PRF terem espessuras na ordem dos 2 a 5 mm.

As sondas lineares, quando adaptadas com calços e programadas no equipamento, são capazes de detetar delaminações e porosidades em componentes de fibra vidro. Como é possível ver na Figura 3.20, foi detetada uma descontinuidade numa peça de fibra de vidro com 3mm de espessura, utilizando um osciloscópio digital SIUI Supor e uma sonda *phased array* de 64 elementos SIUI TL5F64 - 6MHz. Embora não seja impossível de obter leituras, pelos resultados obtidos, confirmou-se que esta sonda seja mais adequada para inspeções em a compósitos de maior espessura.

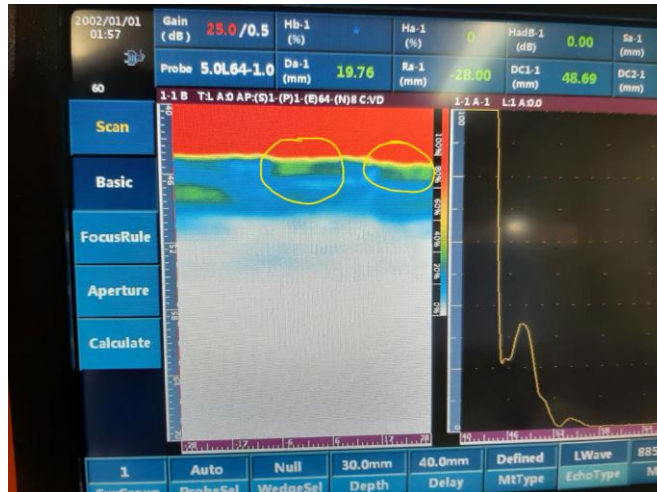


Figura 3.20 - Leitura de descontinuidades numa peça de PRF.

Com o método PAUT é possível realizar leituras em varrimento ao longo de uma linha, obtendo-se uma digitalização do interior do componente. Para isto é utilizado um *encoder*, que captura o movimento linear da sonda e atribui um perfil de leitura a cada coordenada dessa linha. Esse varrimento é depois sintetizado em computador e torna visível, num espaço 3D, o interior do componente.

3.3.3. Particularidades do PAUT

Um fator importante, em inspeção de compósitos com PAUT é o tamanho do calço. Este deve ser capaz de eliminar a zona morta da sonda, sem comprometer muito a intensidade do feixe sonoro, de modo a manter uma capacidade ótima de inspeção do componente.

O PAUT pode ser utilizado para deteção de descontinuidades de delaminação de compósitos [50][45][51]. No entanto, é importante ter em consideração a calibração e parametrização da sonda, de modo a obterem-se medidas precisas dos defeitos [52]. Com as modificações adequadas, o método de *phased array* é capaz de detetar porosidades internas no material. Por outro lado, embora existam possibilidades, PAUT e UT de modo geral, não são indicados para detetar ondulações nas fibras [53].

A vertente de criação de imagem da secção transversal do componente é uma vantagem considerável. Esta permite visualizar claramente descontinuidades e outros defeitos, assim,

facilita a leitura para operadores menos classificados.

A matriz de elementos permite obter diversos ecos do mesmo defeito que, após a filtragem e processamento dos mesmos, segundo um dos modelos de análise falados anteriormente, leva a uma melhor deteção e medida de descontinuidades internas.

A utilização de um *encoder* permite realizar leituras de varrimento ao longo da peça. Isto permite observar a peça em volume, em vez de uma leitura bidimensional, ou até unidirecional como a UT convencional. Assim, é possível observar compreensivamente a extensão e morfologia de descontinuidades internas.

3.4. Comparação qualitativa PAUT vs UT Convencional

Em termos de utilização, a geração de imagem no PAUT simplifica a identificação de possíveis defeitos. Para além disto, o *phased array* permite criar feixes mais concentrados, obtendo-se a posição exata dos defeitos. Ambos os métodos conseguem detetar descontinuidades e porosidades, no entanto, a qualidade de medição com PAUT é bastante superior. É importante referir que nenhum dos métodos consegue detetar defeitos como acumulações de tensão, nem rugosidades no reforço de fibra [54].

O método PAUT é, de modo geral, mais adequado para o controlo de componentes em compósito [55]. Outra vantagem é a capacidade de ser adaptada a novos conceitos/técnicas de controlo de PRF na indústria. No entanto, a inspeção convencional pode ter utilizações em tarefas de controlo mais simples e controladas.

As comparações anteriores, e outras adicionais, encontram-se na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 - Comparações qualitativas entre os diferentes métodos.

	UT	PAUT
defeitos/malformações na matriz		
tensões residuais	1	1
vazios	4	4
resin rich	2A	2A
problemas no reforço		
enrugamento na fibra	1	2C
danos na fibra	1	1
problemas de interface		
delaminação	4	5
interface	1	1
descontinuidades de maquinações		
furação	4	4
desbaste	3	4
Danos de superfície		
-	3B	4
Utilização		
criação de imagem	1	5
direcionamento do feixe	1	5
facilidade de identificação de descontinuidades	3	4
capacidade de adaptação	2	4
leitura em varrimento	1	5C
leitura em ângulo	4B	5B
medição de espessura	5B	5

Legenda	
Capacidade/adequação do método	
1	Impossível
2	Possível mas não satisfatório
3	Satisfatório
4	Muito satisfatório
5	Perfeito
grau de adaptação do método	
A	Requer algumas adaptações ao modelo de análise
B	Requer algumas adaptações ao equipamento
C	Requer adaptações profundas

Nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3, encontram-se uma comparação geral sintetizada entre ambos os métodos e algumas normas e padrões que regulam a utilização de UT e PAUT neste tipo de aplicações, respetivamente [56][57].

Tabela 3.2 - Comparação geral entre UT e PAUT

	UT	PAUT
Vantagens	Simplicidade, Custo, Setup	Capacidade de análise; Possibilidade de inovação; Controlo mais apertado
Limitações	Difícil de interpretar; Treino avançado	Parametrização extensiva; Hardware específico
Custos Associados	Custo elevado no treino de operadores; baixo custo relativo dos equipamentos;	Custo elevado dos equipamentos; Equipamentos de pós-processamento de sinal; Adereços para leituras especializadas

Tabela 3.3 - Normas Utilizadas na regulação de UT e PAUT

Designação	Título
ISO 16810:2024	Ensaios Não Destrutivos - Ensaios por Ultrasons - Princípios Gerais
ASTM 3370-24	Práticas Standard para Ensaios por Ultrasons Com Emissão Matricial

O PAUT permite uma maior compreensão de descontinuidades no interior dos componentes e, devido à sua capacidade de geração de imagem, permitirá desenvolver novos métodos e substituir outros processos de controlo já existentes [58][59]. Por outro lado, os UT convencionais continuam a ter um lugar na indústria de compósitos em processos/componentes menos críticos, devido ao seu custo e simplicidade.

Capítulo 4

Ensaaios experimentais

Neste Capítulo são descritos os trabalhos referentes à parte experimental do trabalho. Aqui vai ser exposto o problema a resolver, os objetivos, os equipamentos utilizados na experimentação e os resultados que se pretendem obter. Seguidamente, são descritos, cada um dos três testes, sendo depois apresentados os resultados obtidos em cada um deles.

4.1. Introdução experimental

Primeiramente, será realizada uma introdução à parte experimental onde são descritas as condições gerais de realização dos ensaios

4.1.1. Problema a tratar

Os componentes aeronáuticos, fabricados em compósito, possuem espessuras bastante reduzidas. Isto traz algumas complicações na sua inspeção, potenciadas pela regulação deficiente dos equipamentos, e, pela má utilização dos mesmos.

A zona morta nas leituras com ultrassons, tanto como a distância focal interferem com a focagem e inspeção destes compósitos de baixa espessura. Para além disto, existe ainda a questão da parametrização e calibração dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Caso estes fatores não estejam devidamente programados e controlados, será difícil detetar quaisquer tipos de descontinuidades/danos nas peças em teste.

4.1.2. Objetivo

A parte experimental deste trabalho tem como objetivo descobrir qual o método de ensaio mais aconselhado para deteção de descontinuidades em componentes de baixa espessura e conjuntos de parâmetros que levam aos melhores resultados de inspeção. Para isto vão ser realizados vários testes, para deteção de diferentes tipos de descontinuidades e defeitos simulados.

4.1.3. Equipamentos utilizados

O equipamento de ensaios por ultrassons, utilizado no decorrer da experimentação, é o SIUI SUPOR. Este osciloscópio digital consegue realizar inspeção convencional, com sondas de feixe reto, angulares e alta frequência, e inspeção com sondas multi-elementos. Associada à sonda de *phased array*, é possível utilizar um *encoder* (SIUI SW64L2-P05 No.493101008) para se obter leituras tridimensionais de varrimento. O osciloscópio digital é capaz de representar A-scan, B-scan, C-scan e D-scan e trabalhar com sondas até 128 elementos.

A sonda *phased array* utilizada é a sonda multi-elementos SIUI 5.0L64-1.0-10. Esta sonda possui uma matriz de 64 elementos em linha e uma frequência de 5.0 MHz. O número de elementos e a frequência de leitura podem ser alteradas no equipamento digital, de acordo com as necessidades impostas pelo procedimento.

Para se reduzir os efeitos da zona morta e do campo próximo, vai ser utilizado um calço no decorrer dos ensaios. Este é visível na Figura 2.1 e possui uma espessura de 40mm.



Figura 4.1 - Calço de 40mm para PAUT

Embora seja possível ajustar o ponto de foco de uma sonda PAUT, através do controlo das leis focais da mesma, existe uma cota, a partir da qual a sonda não tem mais capacidade de leitura em proximidade. Para isto, são utilizadas as equações 4.1 [60] e 4.2 [61], permitindo calcular a zona de foco e a perda sonora, respetivamente, para o equipamento descrito acima.

$$N = \frac{D_{eff}^2}{4\lambda} = \frac{(n*p)^2}{4\lambda} = \frac{(n*p)^2 f}{4V} \quad (4.1)$$

N - campo próximo (m)

D_{eff} - Diâmetro efetivo [m]

n - Número de elementos

p - Distância entre os centros dos elementos [m]

V- velocidade de propagação do som (m/s)

f - Frequência (Hz)

λ - Comprimento de onda (m)

$$\frac{P}{P_o} = e^{-\alpha(f)d} \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow \ln \frac{P_o}{P} = \alpha * d$$

$$\Rightarrow \text{Perda (dB)} = \alpha * d \quad (4.2)$$

α – Coeficiente de atenuação acústica [dB/mm];

d – Espessura do calço [mm]

P- Pressão do sinal sonoro à profundidade d [Pa]

Po – Pressão do sinal sonoro à superfície (d=0) [Pa]

Segundo o fornecedor do equipamento, a grande desvantagem na utilização deste equipamento é o facto de este não ser adequado para ensaios em peças de parede fina. No entanto, no decorrer da parte experimental desta dissertação, foi desenvolvido trabalho com o objetivo criar um conjunto de parâmetros e procedimentos, que permitam dar algum uso a este equipamento para este tipo de ensaios.

4.1.4. Peças em estudo

Como alvo de estudo, foram criados alguns provetes, em PRFC, com defeitos premeditados em zonas conhecidas. Isto permitiu testar as capacidades do PAUT em ambiente conhecido e controlado. O primeiro dos provetes foi maquinado, de modo a ter um degrau numa das pontas e um rasgo ao meio. Esta peça encontra-se visível na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Primeiro provete para testes preliminares de calibração

Para além do provete de testes, também vai ser utilizada uma peça real em fibra de vidro, com aproximadamente 2mm de espessura. Neste caso, o exemplar, visível na Figura 4.3, reprovou no controlo de qualidade devido a delaminações, sabendo-se os locais das mesmas.



Figura 4.3 - Peça real em fibra de vidro.

A utilização de componentes reais permite estabelecer um paralelismo entre os resultados experimentais e resultados em condições reais.

4.2. Parametrização

O PAUT deve o seu funcionamento a uma parametrização mais controlada e específica, devido à existência de mais que um elemento e às leis focais que controlam a matriz.

O ajuste destes parâmetros é fulcral, pois, leva à otimização da leitura para um determinado material, profundidade, defeito, entre outros [62]. Por outro lado, exige um processo de calibração do equipamento mais específico, de modo a garantir uma boa resolução de imagem sem amplificar “artefactos” sonoros que possam resultar da propagação sonora na peça.

Foram efetuados alguns testes, relativos à parametrização para compósitos de baixa espessura, com recurso ao provete de PRFC, da Figura 4.2, com espessuras de 1 e 2 milímetros utilizado para os ensaios com UT convencional. Assim foi possível ver alterações na leitura, alterando parâmetros como frequência, número de elementos e ganho sonoro.

4.2.1. Frequência

Observou-se que, na espessura de 2mm, a diferença, na qualidade da imagem, aparentou ser marginal, no entanto, para 1mm, a utilização de frequências mais elevadas resulta num melhor foco da peça. Estas observações estão em conformidade com a literatura, onde é referido que maiores frequências possuem melhor focalização a baixas espessuras. As observações

feitas são visíveis na

Figura 4.4 e os parâmetros utilizados na Tabela 4.1.

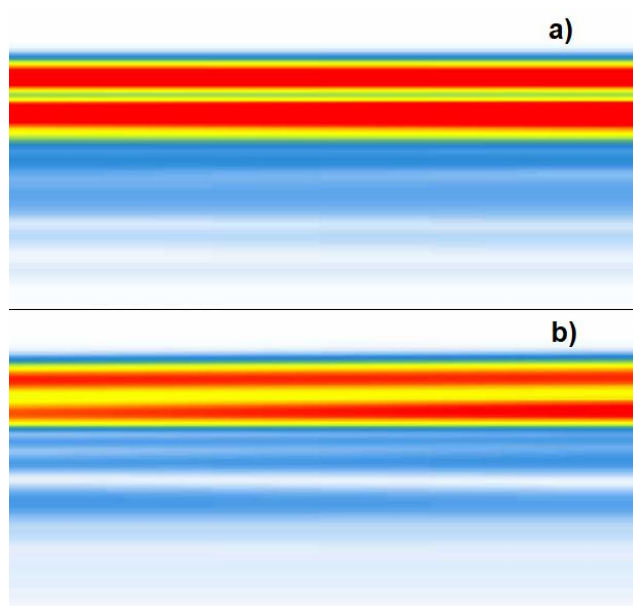


Figura 4.4 - Frequência de leitura a a) 5 MHz e b) 3 MHz num provete com 2mm de espessura

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.4

Imagem	Frequência (MHz)		nº elementos	distância de foco (mm)
	Emissão	Recessão		
a)	5	5	10	41
b)	3	3	10	41

4.2.2. Número de Elementos - Abertura

O número de elementos influencia a distância de foco, pois, para matrizes mais largas, é necessário amplificar a fase de emissão das leis focais em uso. Isto pode resultar em problemas de focalização a baixa profundidade/espessura. Para visualizar este efeito foram realizadas leituras com diferentes aberturas, estando estas visíveis na Figura 4.5 e os respetivos parâmetros na Tabela 4.2.

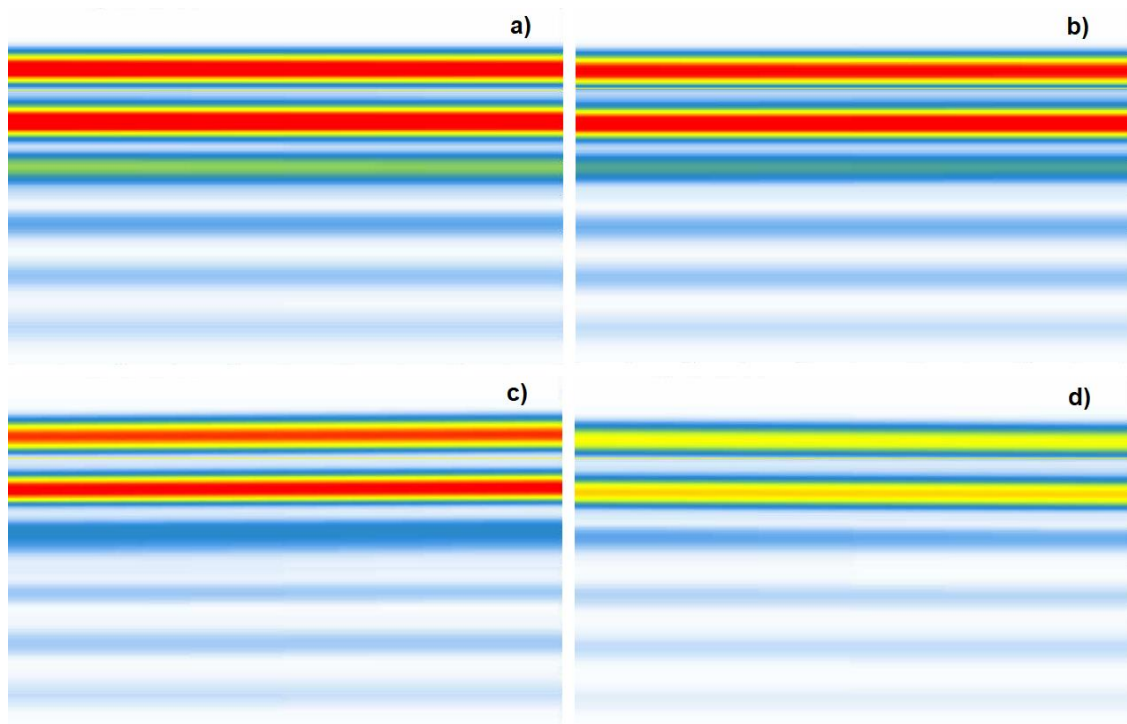


Figura 4.5 - Leituras com nº de elementos a) 16, b) 12, c) 10 e d) 8.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.5 em PRFC de t=2mm.

Imagem	Frequência (MHz)		nº elementos	distância de foco (mm)	ganho (dB)
	Emissão	Recessão			
a)	3	3	16	42	30
b)	3	3	12	42	30
c)	3	3	10	42	30
d)	3	3	8	42	30

Em a) e b), é possível ver que as repetições de eco de fundo são bastante notáveis e que o interior da placa de PRF não se encontra decentemente focada. Em d) os ecos de parede de fundo e de superfície de contacto são fracos, o que pode demonstrar uma baixa sensibilidade à deteção de discontinuidades. Em c), é visível uma zona interior de placa bem definida, tal como os limites da mesma. Isto mostra que a existência de uma abertura menor pode resultar em melhores leituras, no entanto, devem ser o necessário para não ocorrer perda de definição do foco.

4.2.3. Ganho sonoro

O ganho do sinal sonoro leva ao realce de discontinuidades no material. O aumento, ou decréscimo, no valor do ganho pode facilitar no foco de defeitos mais pequenos. Por outro lado, isto pode aumentar alguns ecos, ocultando defeitos mais pequenos [63]. Para observar o efeito

do ganho, foram realizadas três leituras, com intervalos de 6dB. Estas leituras encontram-se na Figura 4.6 e os parâmetros utilizados na Tabela 4.3.

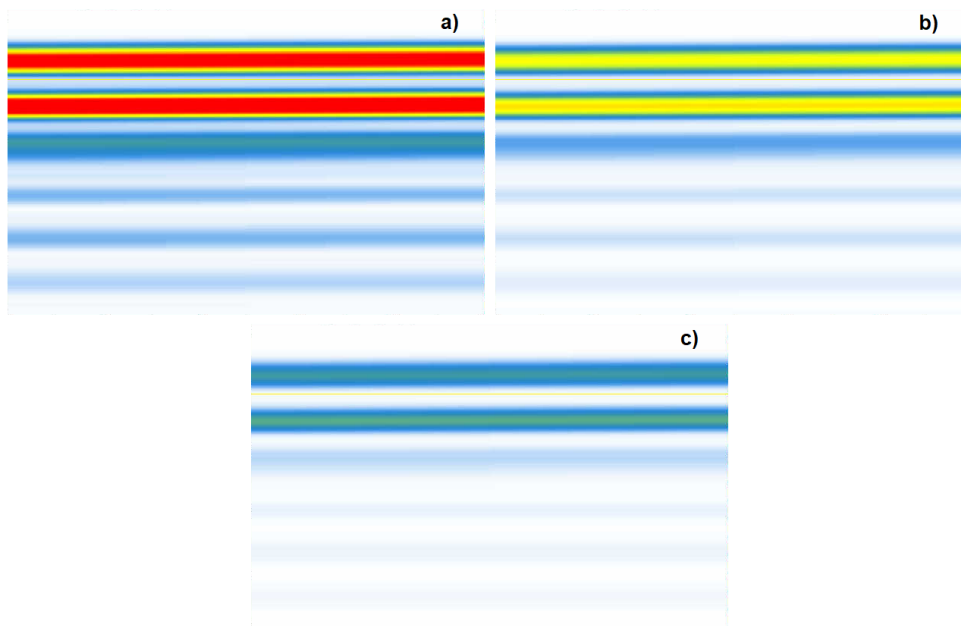


Figura 4.6 - Leituras com ganho de a) 32dB, b) 26dB e c) 20dB

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para leituras da figura 4.6

Imagem	Frequência (MHz)		nº elementos	distância de foco	ganho (dB)
	Emissão	Recessão			
a)	3	3	10	42	32
b)	3	3	10	42	26
c)	3	3	10	42	20

4.2.4. Calibração

Durante uma fase preliminar de ensaios, foram testados alguns métodos de calibração para testagem de parâmetros de inspeção. Isto serviu como primeiro passo para a elaboração de um procedimento de calibração para inspeção em componentes de parede fina.

Numa primeira fase, foi testada uma parametrização de baixas frequências com ganhos sonoros reduzidos [64]. No entanto, após resultados não-satisfatórios, decidiu-se optar por uma parametrização de mais altas frequências, seguindo a bibliografia, e o que é dito no subcapítulo 3.2.3 [40]. Isto permitiu obter um foco maior do interior das peças de teste, obtendo-se leituras, menos difusas, das discontinuidades/defeitos artificiais induzidos.

Tendo em conta as desvantagens do equipamento em uso, a velocidade do som no equipamento foi influenciada, de modo, a ler uma espessura do provete com 10mm. Isto foi feito para aumentar a janela de visualização do interior do provete de 2mm, possivelmente, facilitando a deteção dos defeitos induzidos

Tendo em conta as desvantagens do equipamento em uso, aquando de um processo de

inspeção, o provete em teste aparece representado como uma linha fina e impercetível. Para isto, foram utilizadas técnicas de controlo de janela de parâmetros, semelhantes às utilizadas com UT convencional analógico. Durante a fase de calibração da velocidade de propagação do sinal sonoro, alterou-se, no equipamento digital, a espessura do provete de 2 para 10mm de profundidade. Isto permitiu criar uma “ampliação” artificial da peça observada, através do controlo da velocidade do som para valores superiores. Isto resulta num deslocamento aparente maior e uma leitura de profundidades superiores às reais. Assim, consegue-se distorcer a imagem, obtendo-se uma maior ampliação. [65]

A matriz de elementos da sonda foi utilizada de duas maneiras distintas na obtenção das leituras experimentais.

Primeiramente, alguns testes, falando em componentes reais, são realizados em peças de maiores dimensões, sendo necessária uma matriz com um número maior de elementos. Desta maneira é possível “subdividir” o componente em secções maiores, tornando o processo de inspeção mais expedito.

Por outro lado, esta matriz não poderá ser demasiado grande. Isto deve-se à possibilidade de aumentar a distância de campo próximo da matriz em uso. Isto faz com que o provete se afaste da distância ótima de focagem, resultando numa imagem desfocada e pouco compreensível. A equação 4.1 permite calcular a zona morta de uma sonda multi-elementos.

É importante fazer um balanço entre área de varrimento e capacidade focal, de modo a otimizar a parametrização para deteção de possíveis defeitos.

Outro fator importante, associado à matriz de elementos a utilizar, é a abertura. Este parâmetro trata o grupo de elementos que dispara faseadamente ao longo da matriz. Ou seja, numa matriz de 64 elementos, tanto se pode ter os 64 elementos a emitir em “simultâneo”, como se pode ter um grupo, numericamente restrito, de PZTs que se vai deslocando incrementalmente pela matriz. Isto encontra-se exemplificado na Figura 4.7. Este parâmetro vai permitir resolver, parcialmente, o problema mencionado anteriormente, pois, será possível ter uma maior linha de varrimento, com conjunto de emissões menos difusas e, conseqüentemente, com uma capacidade focal possivelmente superior (assumindo que não é possível alterar o calço, ou alterar a profundidade do defeito em relação ao ponto de focagem). Isto encontrar-se ilustrado na Figura 4.8.

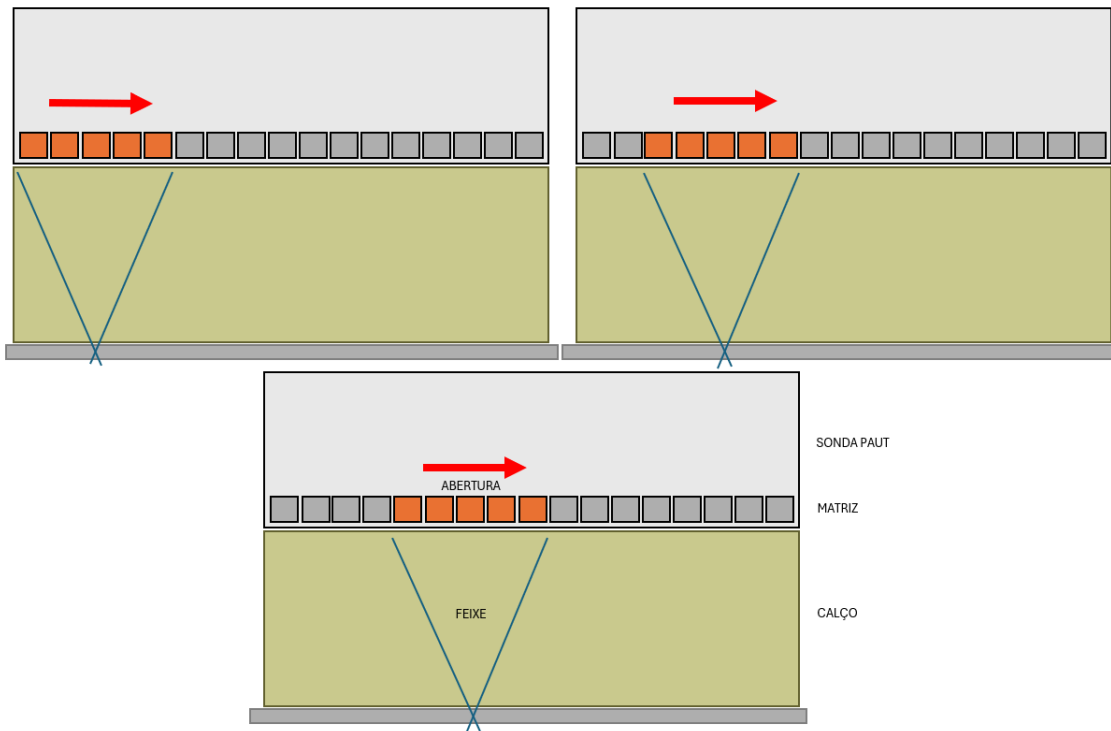


Figura 4.7 - Varrimento de abertura reduzida.

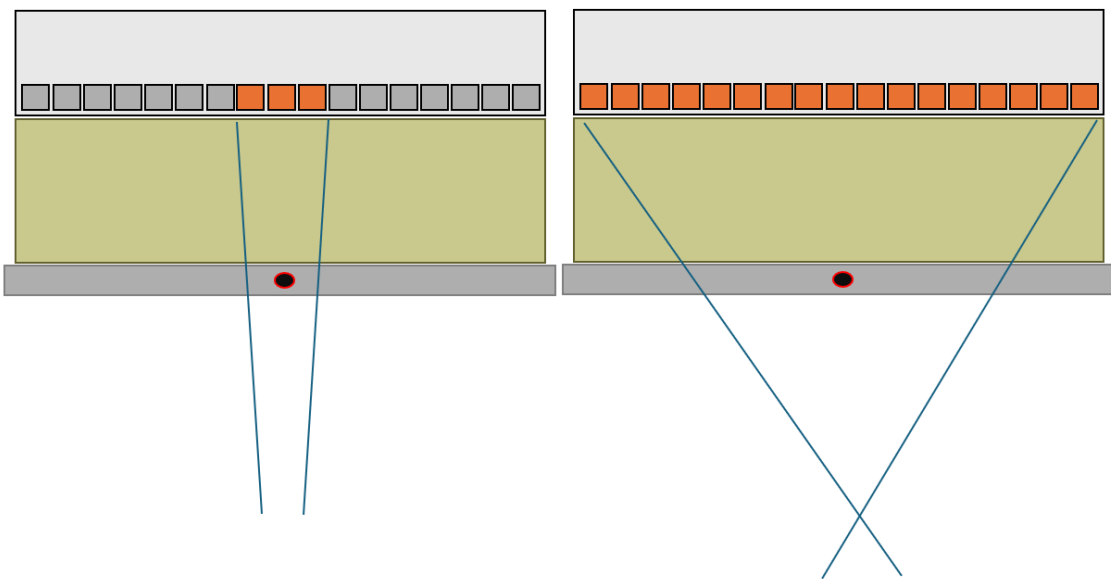


Figura 4.8 - Efeito de redução da abertura

A escolha do número de elementos da abertura deve ser feita em função da geometria e dimensão do defeito e, principalmente, a capacidade focal da sonda, tendo em conta a profundidade do ensaio e o calço utilizado [66].

O ganho sonoro, nas leituras efetuadas foi ajustado, de modo a, qualitativamente, não se ter ecos, nem muito fortes, nem muito fracos. Isto permite a utilização de uma estratégia de

inspeção, que já foi utilizada em observações anteriores, que consiste na variação do valor do ganho em mais ou menos 6db.

4.3. Delaminações

Delaminações são um dos defeitos mais críticos nos PRFs. A perda de aderência entre as camadas reduz a coesão do material, levando à falha e colapso estrutural do componente. Em muitos casos, isto acontece em função de um defeito inicial que leva ao enfraquecimento da união entre camadas, resultando na separação das mesmas.

Com isto, esta parte do estudo vai ser dedicada à simulação, inspeção e análise de defeitos de delaminação em materiais compósitos de parede fina.

4.3.1. Objetivos

Os objetivos da fase de ensaios de defeitos de delaminação assentam em 3 pilares fulcrais.

Primeiramente, trata-se de um defeito que pode possuir alguma extensão, relativamente a área de defeitos. Isto faz com que possa ser detetado com leituras em varrimento, quer com Ensaios de *Phased Array*, quer com sondas de ensaios por ultrassons convencionais. O primeiro objetivo seria a diferenciação de capacidades entre ambas as tecnologias.

Um dos principais objetivos seria encontrar um intervalo, ou janela, de parâmetros para PAUT que permitisse a utilização deste equipamento para a deteção e especificação deste tipo de descontinuidades/defeitos.

Por fim, seria obter uma boa caracterização e representação dos defeitos em estudo, utilizando os parâmetros obtidos no decorrer do estudo. Isto significa que, embora o equipamento não seja o indicado para este tipo de ensaios, é possível otimizar a parametrização, obtendo-se leituras fidedignas e perceptíveis.

4.3.2. Planeamento e parâmetros

O provete utilizado nos ensaios consiste numa placa de fibra de carbono, com espessura de 2mm, com, aproximadamente 30mm de largura e entre 150 a 200mm de comprimento.

Neste provete encontram-se 4 tipos de delaminações, sendo estas:

- DEL1: Este é o primeiro defeito artificial induzido encontrado no varrimento. Esta descontinuidade é composta por dois furos em carga, não passantes, e uma delaminação aberta com um xizato. O objetivo será o de conseguir observar a extensão da delaminação lateral e se existem outros patamares oriundos das furações.

- DEL2: Introdução de delaminação por furação e pretende-se simular uma não-conformidade

originada num processo de maquinação. Este é um furo passante realizado em carga.

- DEL3: Introdução de um patamar extenso de delaminação. Aberto com um maço e um escopro com o objetivo de verificar a redução da profundidade do eco de parede de fundo, como indício de delaminação.

- DEL4: Este defeito artificial começou por ser algo accidental, tendo sido gerado numa primeira tentativa de obter o defeito DEL3. No entanto, tendo em conta a proximidade, em profundidade, de ambos os defeitos, este serve como um teste à capacidade de deteção de diferentes delaminações com diferenças de profundidade mínimas.

Na Figura 4.9 encontra-se uma representação inicial dos defeitos induzidos no provete, que se encontra visível na Figura 4.10.

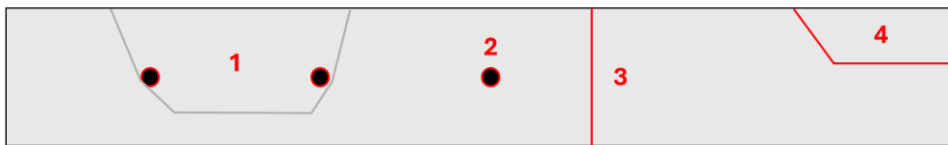


Figura 4.9 - Representação de defeitos no provete.



Figura 4.10 - Provete de delaminação

Como as discontinuidades em estudo, possuem áreas consideráveis, vai ser utilizada uma técnica de inspeção em varrimento [51]. Para isto, vai ser utilizado um *encoder*. A utilização deste dispositivo vai permitir visualizar, não só, a extensão e a morfologia do defeito, mas também, a profundidade a que esta se encontra na peça. Isto deve-se à criação de várias imagens de diferentes planos de corte da peça. O sentido do varrimento será longitudinalmente, do defeito DEL1 para o defeito DEL4.

Aquando da criação dos defeitos artificiais no provete, notou-se que, na zona dos defeitos DEL3 e DEL4, o provete ganhou algum relevo ascendente, na parte superior. Isto provou tornar-se problemático durante a fase de ensaios pois, para além de forçar o calço para cima, cortando o contacto entre a sonda e a peça, também dificultava a passagem do gel acoplante para o meio das superfícies de contacto da sonda e do provete. A solução encontrada foi aplicar mais acoplante, criando um filme mais espesso e aplicar uma pressão uniforme durante todo o varrimento.

Como não havia nenhum calço desenhado especificamente para ensaios com sondas de feixe reto de UT convencional, foi utilizado o calço da sonda multi-elementos. Assim é possível eliminar a zona morta da sonda, permitindo a focagem do provete. Por outro lado, a espessura do calço pode resultar em alguma perda de sinal ultrassónico.

A leitura em varrimento, com a sonda direita convencional, encontra-se bastante condicionada pelo tamanho do calço. Por isto, foi feito apenas um teste de deteção do defeito DEL3. Assim é possível verificar a possibilidade de deteção de patamares de delaminação com UT convencional.

Neste ensaio convencional, foi utilizado o mesmo calço da sonda PAUT, de modo a eliminar o efeito do campo próximo. Também foi escolhido um intervalo de frequências mais elevado para trabalho com paredes finas.

Para conseguir estabilizar os provetes na mesa, foi criado um gabarito de suporte para os ensaios, ou um *jig*, onde o provete seria fixado com fita cola. Este dispositivo tem uma régua em aço, facilitando a leitura de varrimento com o *encoder* magnético. Toda a informação sobre o *jig*, que se encontra na Figura 4.11 abaixo, está disponível no Apêndice 1.

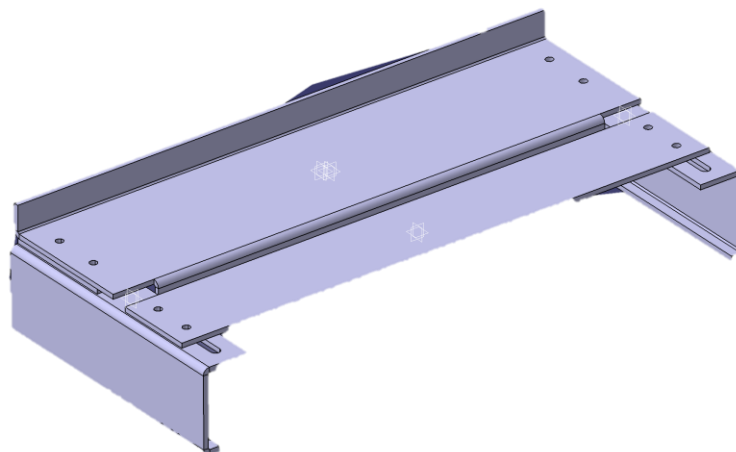


Figura 4.11 - *Jig*/Gabarito de suporte para os ensaios experimentais.

O setup utilizado para as medições encontra-se na Figura 4.12 abaixo. Neste, é possível observar o *jig*, a sonda PAUT com o *encoder* e o osciloscópio digital SIUI-Supor.

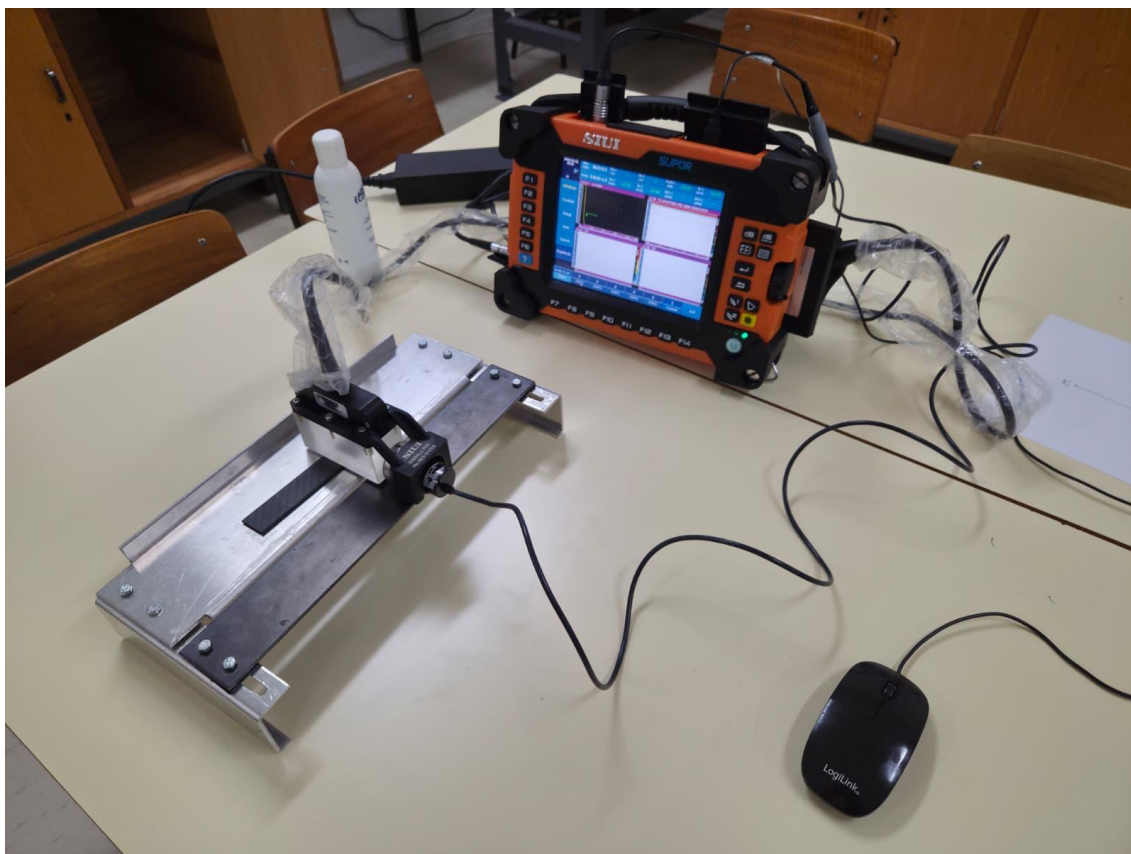


Figura 4.12 - Setup utilizado para os ensaios experimentais

4.3.3. Testagem

Para a execução dos ensaios experimentais, a calibração do equipamento foi realizada de acordo com o procedimento elaborado para o manuseamento e calibração em modo de *phased array*. Este procedimento encontra-se disponível para consulta no Apêndice 2.

Primeiramente foram realizados testes de calibração. Estes serviram para determinar intervalos de parâmetros, onde era possível focar a espessura de um provete de 2mm de fibra de carbono. Estes testes permitiram obter um intervalo de parâmetros para alguns testes preliminares.

Foi decidido que seriam efetuados ensaios com frequências a 5 e a 10 MHz. Embora a sonda SIUI 5.0L64-1.0-10 tenha uma frequência de leitura de 5MHz, esta foi levada até uma frequência máxima de 10MHz, fora da sua faixa ótima. O que acontece é que o Transdutor Piezoelétrico deixa de vibrar fora da sua frequência natural de vibração. Isto leva a uma vibração de menor amplitude, menos eficiente e a uma perda de sensibilidade, traduzida numa perda de ganho sonoro [67]. Porém, este fator foi retificado com o ajuste do valor do ganho para um valor maior, aumentando a energia fornecida para a vibração do cristal, não impossibilitando a execução dos ensaios.

Foi também utilizada a técnica de variação do ganho em $\pm 6\text{db}$ do valor inicial (valor médio).

Assim, será possível testar a técnica de variação do ganho, para realce/contraste de possíveis descontinuidades internas.

Para além disto, foram realizados ensaios com matriz de 64 e de 48 elementos, realçando o efeito do comprimento da matriz nas leituras realizadas.

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo diferenciar a utilização de frequências mais baixas, ou mais altas e ver a diferença entre uma matriz mais longa, de uma matriz mais curta. Com isto, os parâmetros utilizados encontram-se nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Testes Preliminares de Delaminação – 64 elementos

64 elementos		Frequência (MHz)	
		5MHz	10MHz
ganho (dB)	24db	DEL-64-5-8	DEL-64-10-24
	30db	DEL-64-5-14	DEL-64-10-30
	36db	DEL-64-20	DEL-64-10-36

Tabela 4.5 - Testes Preliminares de Delaminação – 48 elementos

48 elementos		Frequência (MHz)	
		5MHz	10MHz
ganho (dB)	24db	DEL-48-5-8	DEL-48-10-24
	30db	DEL-48-5-14	DEL-48-10-30
	36db	DEL-48-5-20	DEL-48-10-36

Após os ensaios, foi possível recolher várias leituras, cortes e medições dos provetes. Devido ao volume de imagens recolhidas, estas vão estar disponíveis no Apêndice 3, sendo apenas comentadas algumas onde se possam realizar algumas observações mais pertinentes.

Após a análise dos resultados preliminares, foi possível chegar a algumas conclusões rápidas.

Qualitativamente, o método de variação do ganho, para realce de defeitos, mostrou ser algo bem-sucedido em frequências mais elevadas. Este método permitiu evidenciar alguma propagação de delaminação, ou irregularidades, na parede de fundo. Também foi possível criar contraste nas zonas de limite de delaminação. Isto encontra-se visível na Figura 4.13.

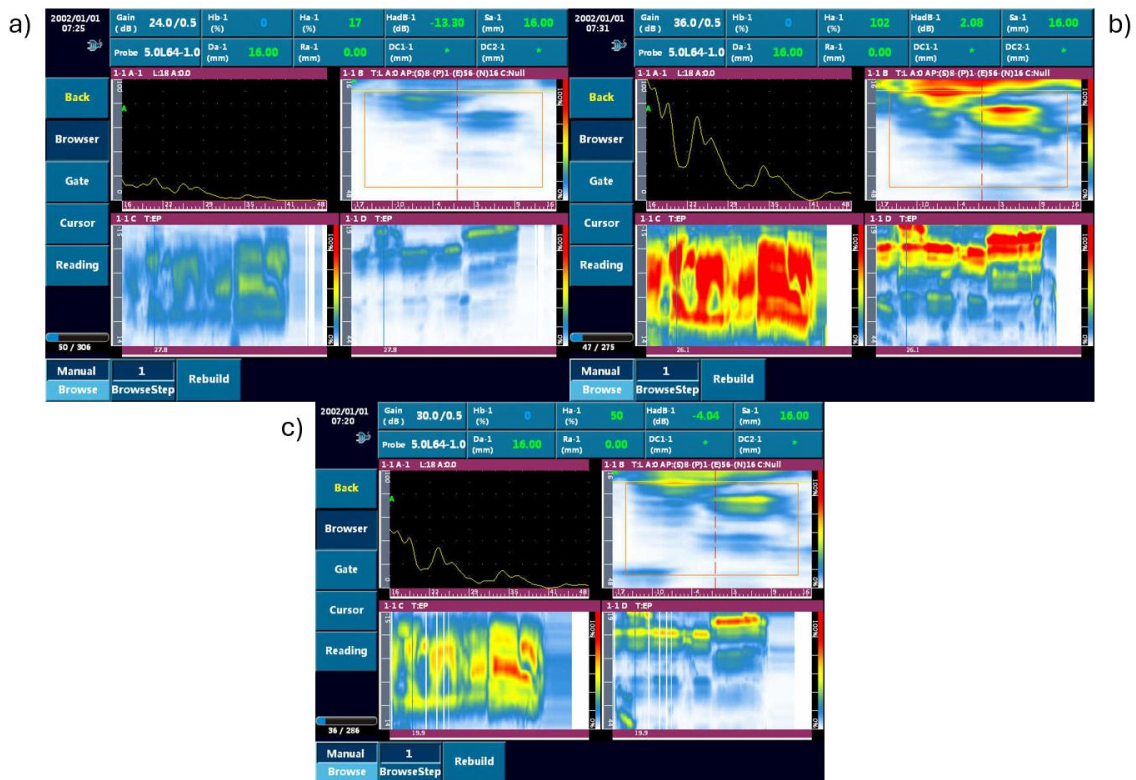


Figura 4.13 - Leitura DEL_10MHz com a) 24 db; b) 36db; c) 30db

Verificou-se, também, que ganhos baixos e intermédios permitiram obter uma melhor leitura da profundidade de descontinuidade. Isto vai permitir efetuar medições da profundidade de defeito com alguma fidelidade à realidade. Os modos de visualização *B-scan* e *D-scan* mostraram ser úteis na visualização em profundidade, e em corte das descontinuidades, tornando mais claro a localização individual de cada patamar de delaminação. Utilizando estes dois tipos de varrimento, será possível especificar o tipo e a profundidade do defeito.

O modo de visualização *C-scan*, provou ser bem-sucedido na deteção dos defeitos e na visualização da extensão do mesmo. Esta ferramenta poderá ser utilizada para a averiguação da gravidade do defeito em questão.

As frequências mais elevadas provaram ter uma definição de imagem e capacidade de deteção maiores. Isto segue o que é dito na bibliografia, relativamente a melhor leitura de secções de parede fina a maiores frequências. Na Figura 4.14 pode ver-se a diferença entre uma leitura do defeito DEL1 a 5MHz (a) e a 10MHz (b). Salienta-se que a leitura em profundidade nas leituras a 10MHz produz sinais mais limpos, embora mais fracos, que nas leituras a 5MHz.



Figura 4.14 - Comparação de Leitura a 5MHz (a) e 10 MHz (b).

Ao contrário dos demais defeitos, as observações do DEL2 foram inconclusivas nesta série preliminar de testagem. Para isso foi decidido realizar leituras com abertura de 8 elementos.

Em adição a esta melhoria, decidiu-se reduzir o comprimento da matriz, pois, a matriz de 64 elementos tornava alguns defeitos difíceis de observar. Para isto, decidiu-se utilizar matrizes mais pequenas, aumentando a imagem.

Com isto, o novo conjunto de parâmetros utilizado foi o seguinte, visível na Tabela 4.6 abaixo:

Tabela 4.6 - Testes intermédios de delaminação.

10MHz		Matriz	
		32 elementos	48 elementos
ganho (dB)	24db	DEL8-32-10-24	DEL8-48-10-24
	30db	DEL8-32-10-30	DEL8-48-10-30
	36db	DEL8-32-10-36	DEL8-48-10-36

Estes parâmetros permitiram obter leituras geralmente superiores às anteriores. Valores de frequência mais altos e abertura de 8 PZTs levaram a leituras com maior definição, limite de defeitos bem delineado e boa capacidade de diferenciação de patamares de delaminação.

De modo geral, embora também tenham uma boa resolução, as leituras feitas com matriz de 48 elementos provaram ser mais compreensíveis, na vertente de localização planar e de percepção da extensão do defeito. Isto auxilia na identificação e especificação dos defeitos encontrados. Isto pode ver-se na Figura 4.15, abaixo.

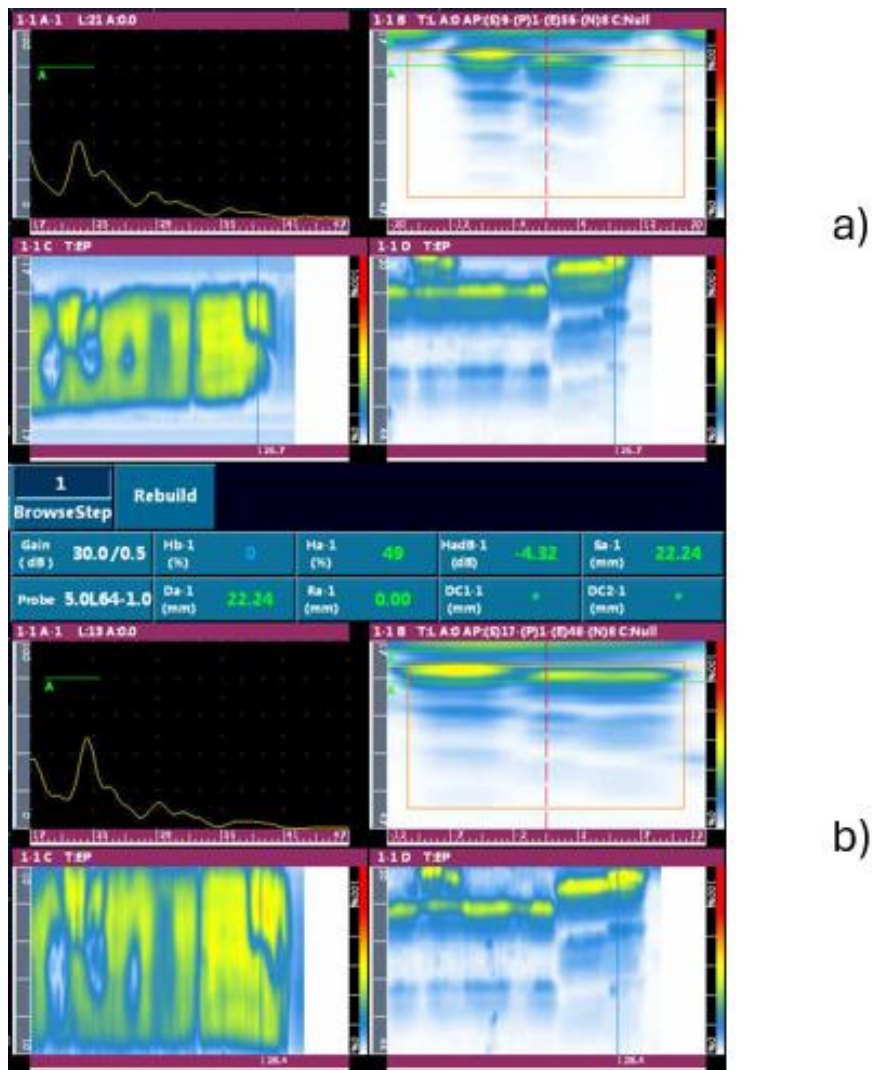


Figura 4.15 - Comparação entre leituras a 48 elementos a) e a 32 elementos b).

Com uma abertura de 8 PZTs, foi possível detetar melhor, não só, ambos os patamares de delaminação, e sua morfologia, em torno de DEL1, mas também, verificar uma perda de sinal em torno de ambos os furos do mesmo defeito. Isto significa que assim é possível detetar facilmente a perda de sinal da parede de fundo, originada em irregularidades na face do provete.

Este conjunto de parâmetros é satisfatório para ensaios em secções de parede fina semelhantes ao provete em questão. No entanto, decidiu-se clarificar o efeito da abertura nas leituras obtidas. Para isto, foram realizados mais alguns ensaios, variando o número de PZTs em torno de 8, com o objetivo de ver o impacto resultante nas medições. Com isto, foram realizados os testes finais, com os parâmetros mostrados na Tabela 4.7 abaixo.

Tabela 4.7 - Parâmetros de impacto da abertura em leituras de delaminação

10MHz		Abertura	
		6 elementos	10 elementos
ganho (dB)	24db	DELP-48-10-24-6	DELP-48-10-24-10
	30db	DELP-48-10-30-6	DELP-48-10-30-10
	36db	DELP-48-10-36-6	DELP-48-10-36-10

Nestas leituras, realizadas com matriz de 48 elementos, notou-se que os varrimentos realizados com abertura de 6 tinham contornos mais definidos. Para além disto, as leituras feitas com ganho mais baixo, embora tenham um retorno sonoro mais baixo, permitem observar melhor os contornos e limites de defeito. Ambas as observações são visíveis na Figura 4.16 abaixo.

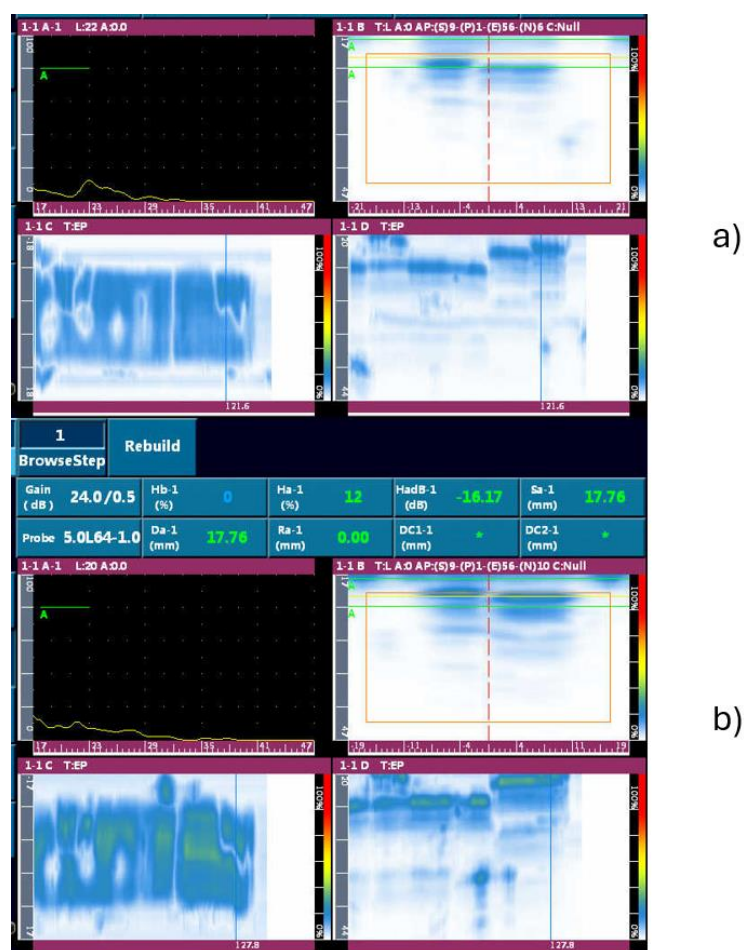


Figura 4.16 - Comparação de leitura com abertura de 6 PZTs a) e com 10 PZTs b)

As leituras de abertura de 6 com 36db também permitem observar melhor o contorno dos defeitos. O ganho superior desta parametrização seria o elevado retorno ultrassónico, pois, este permite realçar as irregularidades nos furos do DEL1. Para além disto, também possui boa

resolução para medição de profundidade dos patamares de delaminação em DEL3 e DEL 4. Isto é visível na Figura 4.17.

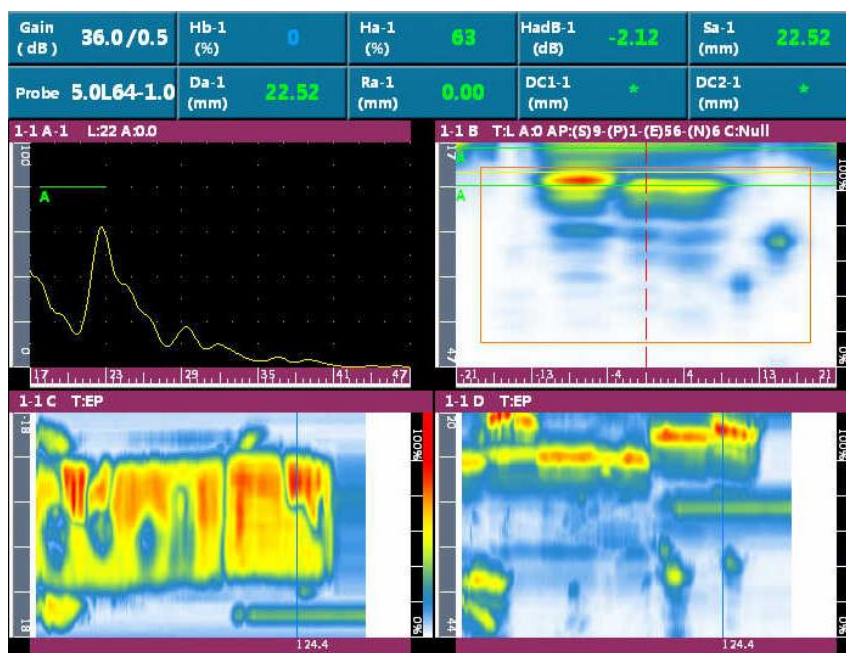


Figura 4.17 - Leitura do defeito DEL4 com abertura de 6, 36db, 10MHz e matriz de 48.

Relativamente ao defeito DEL2, não foi possível observar nenhuma delaminação significativa, ou quaisquer defeitos, junto do furo.

Com os resultados obtidos, foi possível criar uma janela de parâmetros ótimos para ensaios em paredes finas. Os ensaios foram feitos num componente real com pequenos defeitos de delaminação. A diferença desta peça real, para o provete em estudo, é que esta possui uma espessura interior, entre 1 e 1,5mm, é feita de compósito de fibra de vidro (GFRP) e tem uma parede de fundo com superfície ligeiramente irregular. É espectável que os resultados não sejam tão “bons” como nas últimas leituras, no entanto, é importante frisar que os objetivos desta parte experimental são, achar uma janela de parâmetros, que sirva de ponto de partida para futuros ensaios, e validar essa experimentação em componentes reais do setor aeronáutico. Com isto, os parâmetros utilizados nos ensaios foram os visíveis na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Parâmetros de ensaios de delaminação num componente real (matriz de 48 elementos).

10MHz		Abertura	
		6 elementos	8 elementos
ganho (dB)	X-6db	DELF-6-26	DELF-8-24
	Xdb	DELF-6-32	DELF-8-30
	X+6db	DELF-6-38	DELF-8-36

As Leituras com abertura de 6 PZTs foram mais satisfatórias em ganhos mais elevados. Já as leituras com abertura de 8 PZTs mostraram ser geralmente mais bem-sucedidas, se tivermos

em conta a variação de +6db. Esta técnica, como se pode ver na Figura 4.18 abaixo, provou ser muito bem-sucedida na identificação dos pequenos defeitos de delaminação.

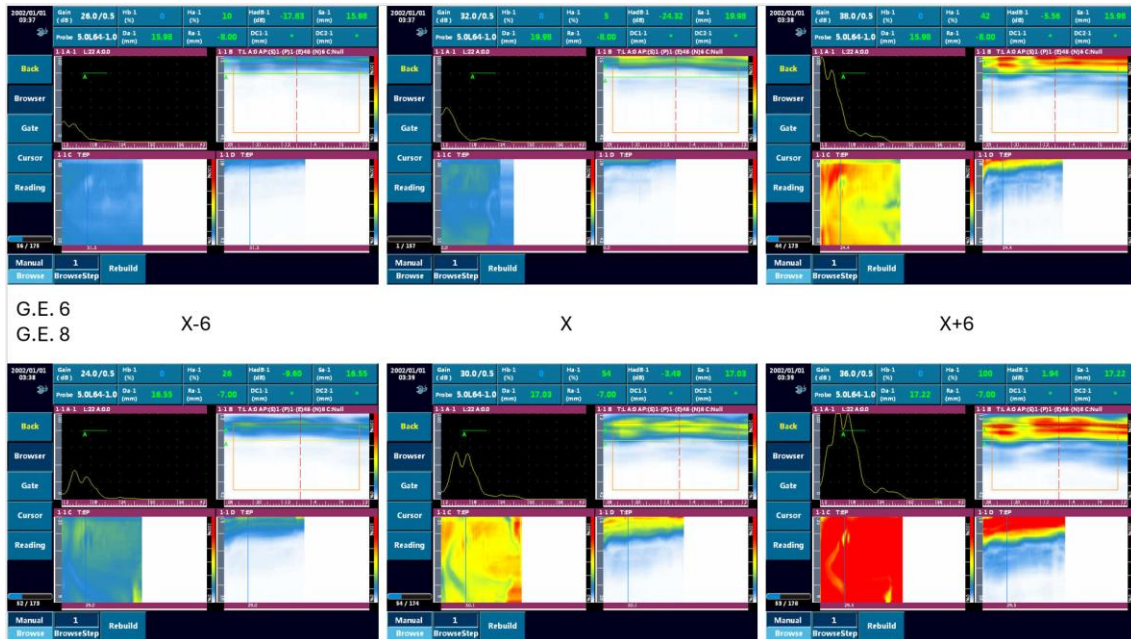


Figura 4.18 - Ensaios de janela útil de parâmetros num componente real.

Os resultados obtidos com UT convencional não deram resultados muito satisfatórios. Nestes ensaios foi utilizado o mesmo calço dos ensaios PAUT, apenas como meio de eliminação da zona de campo próximo. Foi utilizado um intervalo de frequência entre 0.5 e 20 MHz. A sonda utilizada era uma sonda direita convencional SONATEST SLM 5-10.

O objetivo era utilizar um intervalo de frequências mais elevado, que já se tinha provado eficaz em paredes finas. Na Figura 4.19 abaixo, encontra-se visível a primeira tentativa de focagem da placa de PRFC.

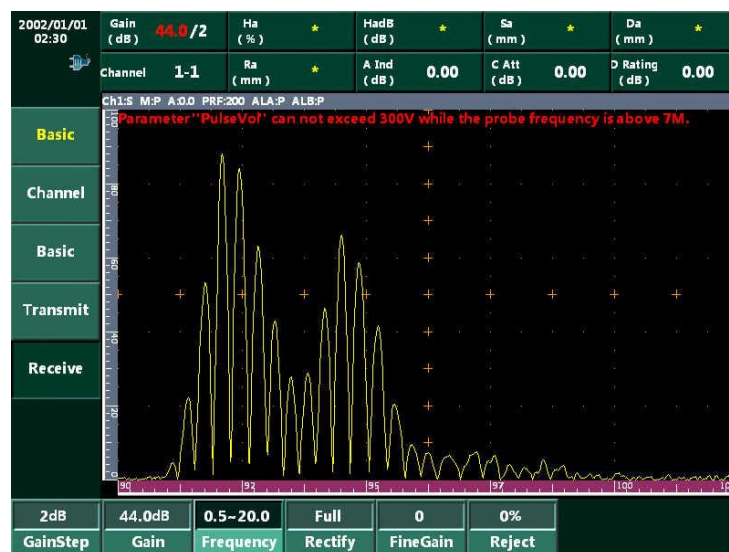


Figura 4.19 - Focagem do provete com UT convencional

Na Figura 4.20 abaixo, encontra-se a leitura do Def. 3. Esta leitura não mostrou ser suficientemente perceptível.

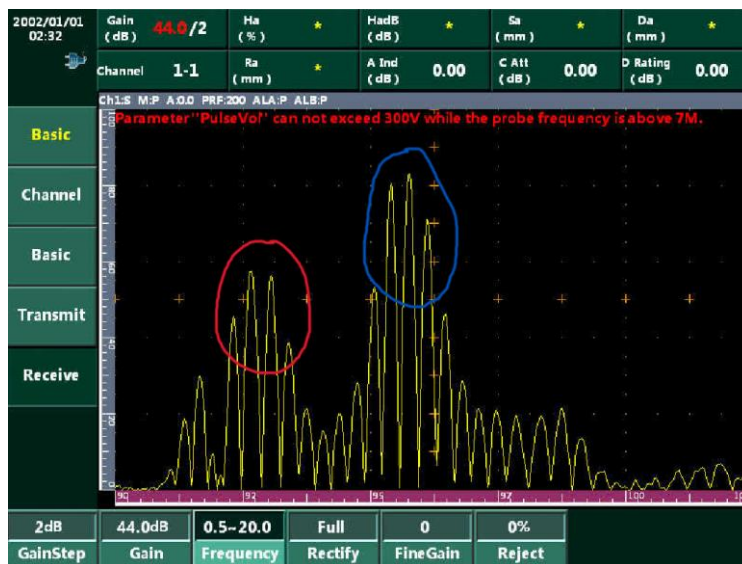
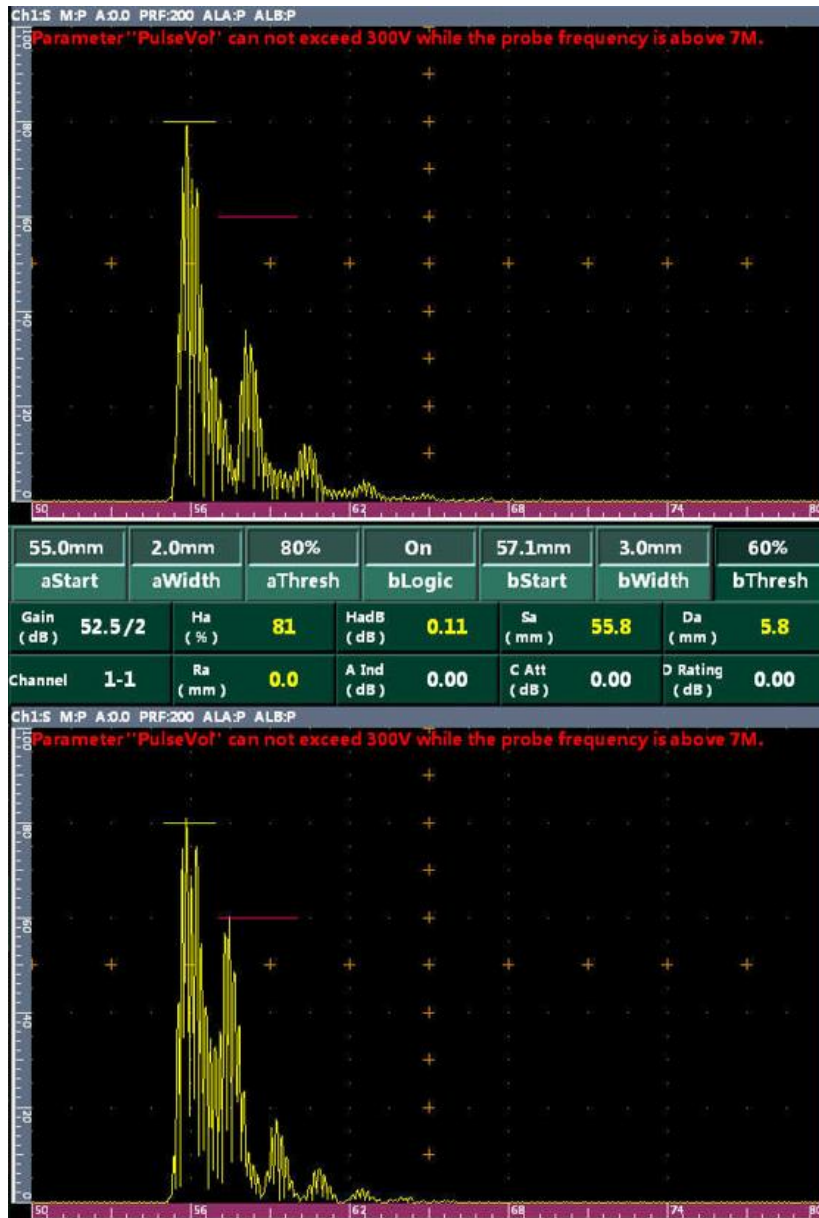


Figura 4.20 - Leitura UT convencional do Def. 3.

A vermelho, pode-se ver, supostamente, o patamar de descontinuidade da delaminação, com um eco menor da face superior da parede à sua esquerda. Assinalado a azul está o eco de parede de fundo do provete. Este encontra-se deslocado para a direita.

Neste ensaio não foi possível obter-se uma leitura compreensível, logo, foi decidido realizar este ensaio com uma frequência entre 5 e 9 MHz. Isto permite trabalhar dentro dos limites de funcionamento da sonda, mas, a troco de frequências mais elevadas.

Nestes ensaios, foi possível focar melhor da espessura da peça, permitindo distinguir a espessura de peça, na Figura 4.21 (a), de um patamar de delaminação (b).



a)

b)

Figura 4.21 - Leituras com sondas direitas da espessura do provete (a), e do Defeito 3 (b).

A diferença de distância entre os picos em (a) e em (b), permite evidenciar uma redução de espessura no meio de propagação do sinal. Isto evidencia a existência de um patamar de delaminação no defeito Def. 3. No entanto, tal como nos ensaios anteriores, a detecção de defeitos mais pequenos encontra-se condicionada pelo correto posicionamento da sonda por cima desses defeitos. Em comparação com os métodos de varrimento com PAUT, este torna-se menos viável para detecção de descontinuidades mais reduzidas.

4.3.4. Observações

O facto do osciloscópio digital utilizado não ser o indicado para ensaios de parede fina levou a algumas dificuldades. Embora tenha sido possível focar minimamente a placa e observar alguns defeitos, é importante frisar que a capacidade de ler fidedignamente a profundidade de defeitos não existe. O único método possível de medição de profundidade será apenas por aproximações, à semelhança dos osciloscópios analógicos convencionais.

De modo geral, foi possível detetar todos os defeitos e analisá-los com algum grau de confiança. Os defeitos Def. 3 e Def. 4 foram fáceis de detetar e de especificar. O Def. 1, após melhoramentos na janela de parâmetros foi facilmente observável e especificável. Já o Def. 2 mostrou ser um defeito mais difícil de analisar, no entanto, foi possível identificar alguma irregularidade no mesmo.

O *C-scan* foi bastante útil na visualização da extensão dos patamares de delaminação e delineação dos seus limites. O *B-scan* e *D-scan* foram bastante úteis na localização em profundidade e na diferenciação de vários patamares diferentes, relativamente à profundidade de defeito.

A matriz de 48 elementos provou ser a melhor, para os ensaios realizados.

Embora os testes finais tenham tido melhores resultados com abertura de 8 PZTs, é possível utilizar uma janela entre 6 a 8 PZTs, para análise de compósitos de parede fina e obter resultados compreensíveis.

A técnica de variação do ganho em ± 6 db provou ser útil. É importante referir que esta foi principalmente útil nos últimos ensaios, realizados na peça real. Este método ajudou a sobressair o defeito, resultando na sua deteção.

Frequências mais elevadas possuem leituras e resultados melhores.

Com isto, os parâmetros considerados ótimos, para inspeção de delaminações, com o aparelho SIUI-Supor estão na Tabela 4.9 abaixo.

Tabela 4.9 - Janela de parâmetros para defeitos de delaminação.

Janela de Parâmetros para Ensaio de Delaminação		
Parâmetro	mínimo	máximo
Frequência	10 MHz	
Matriz	40	48
Abertura	6	8
Int. ganho	Méd. - 6	Méd + 6

4.4. Furos

Para fabrico de peças utilizadas em aeroestruturas, é, em muitos casos, necessário recorrer a processos de maquinação. Processos como fresagem e furação ajudam a dar forma à peça e criar pontos de fixação. No entanto, estes podem levar a defeitos, levando a delaminações e consequente falha do componente.

Em algumas ocasiões de controlo, ou verificação de viabilidade, de alguns componentes/estruturas fabricadas em PRF, é necessário inspecionar secções que não são facilmente acessíveis. Marcações, caixas, furações e algumas marcas de impacto, podem tornar-se alvo de inspeção.

Com isto, este subcapítulo da parte experimental dedica-se ao estudo de possíveis defeitos de dimensões mais reduzidas.

4.4.1. Objetivos

Este tipo de defeitos, embora possa haver necessidade de detetá-los em varrimento, numa maior área, pode localizar-se em zonas mais específicas. Por outro lado, a capacidade de deteção em varrimento, de uma sonda convencional, é algo insuficiente. Isto agrava-se quando passamos a tentar detetar defeitos de pequenas dimensões, quer a baixas profundidades, quer à superfície. Com base nas observações e pesquisa já realizadas anteriormente, não se vai contar com sondas UT convencionais para deteção destes defeitos. No entanto, estas podem ser utilizadas na medição e especificação de defeitos, após uma deteção prévia. Por estes motivos esta parte será mais focada na tecnologia PAUT.

Como já foi referido várias vezes, o osciloscópio digital SIUI-Supor utilizado não é ideal para realizar leituras em componentes de parede fina. Na análise experimental anterior, foi possível chegar a uma janela de parâmetros que permitisse utilizar o equipamento para realizar ensaios em PRFs de parede fina. O objetivo nesta parte experimental foi fazer a mesma coisa, mas, para defeitos de pequenas dimensões.

Secundariamente, outro objetivo seria de diferenciar esses defeitos induzidos. A capacidade de conseguir caracterizar o tipo de defeito, no que toca à sua profundidade e dimensão é crítica para a comparação de um possível defeito com certos critérios de aceitação, fornecidos por uma autoridade competente para tal.

4.4.2. Planeamento e Parâmetros

O provete utilizado neste conjunto de ensaio, à semelhança do anterior, foi maquinado a partir de uma um pedaço de fibra de carbono com 2mm de espessura. Como o utilizado nos

testes de delaminação, este possuía uma largura de aproximadamente 30mm com um comprimento entre 150 a 200mm. Por motivos de simplicidade estes defeitos serão denominados de “furos” e “marcações”. O provete é visível na Figura 4.22 abaixo.



Figura 4.22 - Provete de Furação.

Neste provete encontravam-se três tipos de defeitos. Com estes, pretendia-se verificar e melhorar a capacidade de detecção de marcações à face de um componente, marcações, ou choques de impacto, no outro lado do provete, e pequenos defeitos/maquinações na forma de furos de pequenas dimensões.

Os defeitos em questão são os seguintes:

- Def. A: Este defeito pretende simular uma marcação, ou marca de impacto na superfície da peça. Este tipo de defeitos simula pequenos impactos, ou marcações associadas a etapas de maquinação, em componentes de material compósito. O Def. A foi feito com um punção e um martelo. A sua localização exata não importa, pois, o objetivo da sua existência é apenas ser detetado pelo equipamento, tal como os demais defeitos simulados.

- Furos: Estes furos representam os defeitos B, C, D e F. Variam em diâmetro, de 1 para 2 milímetros [mm] e em profundidade, de 0,5mm para quase 2mm. Não chegam a atingir 2mm de profundidade (da superfície onde é realizado o furo) para não serem furos passantes, o que ia impossibilitar os ensaios. A sua disposição dos furos no provete encontra-se na Figura 4.23 abaixo.

	B	C	D	E
2	○	○	○	○
1,5	○	○	○	○
1	○	○	○	○

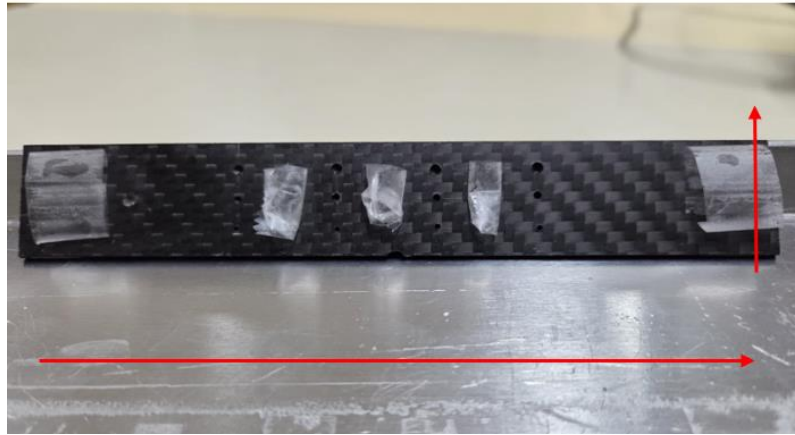


Figura 4.23 - Layout dos furos no provete de delaminação

- Def. F: À semelhança do Def.A, o Def. F também é uma marcação/dano de impacto na face do provete. No entanto, este encontra-se na face contrária onde vai encostar a sonda. O objetivo deste defeito será simular a inspeção de danos em zonas de difícil acesso, onde não é possível chegar com uma sonda. Este defeito simulado também foi feito com um punção e um martelo.

Para a realização destes ensaios, também foi utilizado o *jig*/banco de ensaios, que tinha sido utilizado previamente nos ensaios de delaminação. Assim foi possível realizar a fixação do provete, também, recorrendo a fita cola.

É importante mencionar que, durante os ensaios preliminares de calibração, eram detetadas 5 manchas. Estas localizavam-se em cima de alguns dos defeitos, impossibilitando a sua observação com o equipamento. Após uma vistoria ao equipamento e ao *setup* utilizado, descobriu-se que essas manchas eram causadas pelos pedaços de fita-cola, que fixavam o provete no *jig*. Com isto, a sua localização foi ajustada, de maneira, a que as propriedades de amortecimento sonoro não comprometessem os ensaios. Isto é visível na Figura 4.23 anterior.

4.4.3. Testagem

Para a execução da parte experimental, a calibração do equipamento foi realizada de acordo com o procedimento elaborado para o manuseamento e calibração do equipamento em modo de *Phased Array* do Apêndice 2.

Alguns dos parâmetros desta parte experimental foram escolhidos com base em observações feitas anteriormente. Foi decidido que não se iam utilizar matrizes com mais de 48 elementos, no entanto, era preciso observar o efeito da variação deste parâmetro. Com isto, decidiu-se utilizar matrizes de 48, 40 e 32 elementos. Esta parametrização permite ter uma

ampliação suficiente para compreender as leituras feitas, mantendo toda a largura do provete visível no ecrã do equipamento.

Tendo em conta a reduzida dimensão dos defeitos e a prestação de frequências mais altas, optou-se por testar uma amplitude de frequências altas mais reduzida. Isto trará uma maior definição de imagem e capacidade de deteção do defeito. As frequências usadas foram de 10 e 8 MHz

O ganho, tal como nos ensaios de delaminação, será variado em +-6db, relativamente a um valor médio. Tendo em conta o relativo sucesso deste método nos ensaios anteriores, decidiu-se continuar com esta prática.

Tendo em conta resultados prévios, decidiu-se ver a influência de valores baixos, intermédios e altos para o número de PZTs da abertura. Para isto, vão realizar-se ensaios para GE de 8,12 e 16 elementos. Assim vai ser possível ver a influência da variação deste parâmetro neste tipo de defeitos. Segundo os ensaios anteriores, é expectável que uma abertura de 8 elementos tenha uma resolução melhor e maior probabilidade de detetar defeitos.

Com isto, os parâmetros utilizados para ensaios a 8MHz encontram-se na Tabela 4.10, e os parâmetros para ensaios a 10MHz na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 - Parâmetros iniciais furação 8MHz.

8MHz		Matriz		
		Matriz 32	Matriz 40	Matriz 48
Abertura	8 elementos	HOL-8-32-8	HOL-8-40-8	HOL-8-48-8
	12 elementos	HOL-8-32-12	HOL-8-40-12	HOL-8-48-12
	16 elementos	HOL-8-32-16	HOL-8-40-16	HOL-8-48-16

Tabela 4.11 - Parâmetros iniciais furação 10MHz.

10MHz		Matriz		
		Matriz 32	Matriz 40	Matriz 48
Abertura	8 elementos	HOL-10-32-8	HOL-10-40-8	HOL-10-48-8
	12 elementos	HOL-10-32-12	HOL-10-40-12	HOL-10-48-12
	16 elementos	HOL-10-32-16	HOL-10-40-16	HOL-10-48-16

Relativamente à frequência, os ensaios a 8MHz conseguiram detetar, tanto os furos, como as marcas de LVI (*Low Velocity Impact*). No entanto, estas leituras são um pouco mais difíceis de compreender. Já as medições com 10MHz provaram ter um desempenho parecido, mas, conferindo uma maior perceptibilidade. Isto encontra-se visível na Figura 4.24 abaixo. Isto levou a que se realizassem as próximas leituras apenas a 10MHz de frequência.

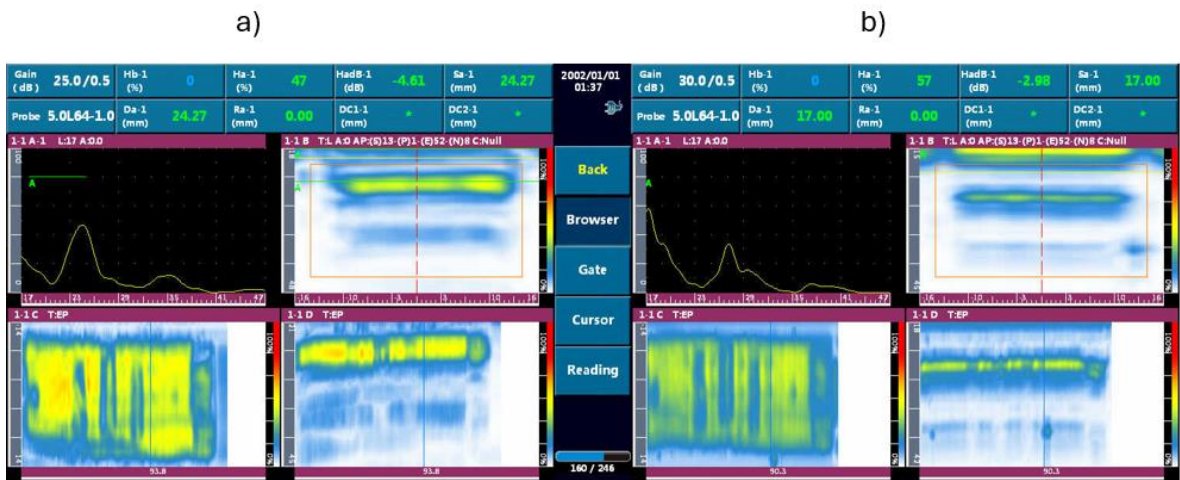


Figura 4.24 - Leituras a 8MHz a) e a 10 MHz b)

Tal como nos ensaios de delaminação, leituras com aberturas menores mostraram ter melhores resoluções. Na Figura 4.25, é possível ver várias imagens, retiradas com frequência de 10MHz, onde se observam leituras a 8 (a), 12 (b) e 16 (c) PZTs. Em “(a)” é possível ver claramente todos os defeitos bem delineados. No entanto, nas restantes pode observar-se que a definição de imagem é inferior á anterior. Por isto, decidiu-se realizar outros testes, variando a quantidade de elementos em torno de 8.

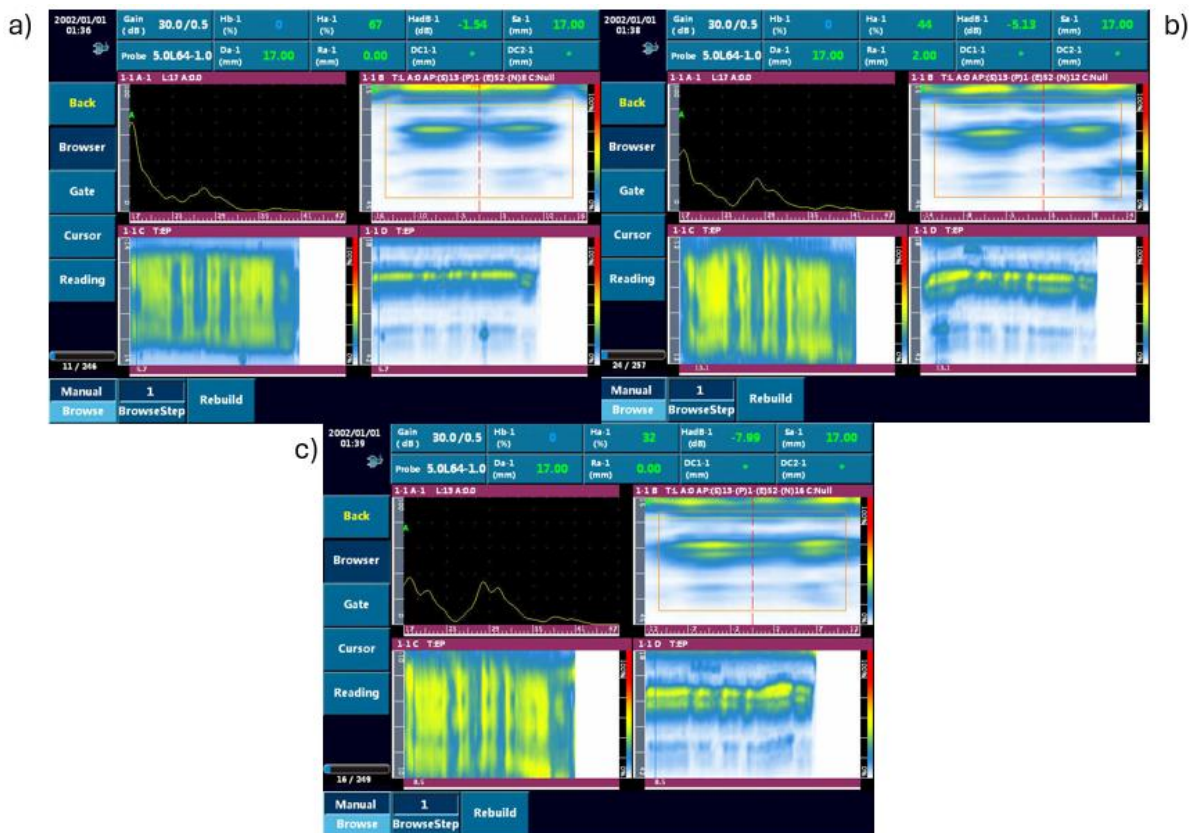


Figura 4.25 - Comparação de ensaios com abertura de 8 a), 12 b) e 16 c).

Os Ensaios com 48 elementos criavam alguma distorção na imagem, portanto decidiu-se prosseguir apenas com leituras com matrizes de 40 e 32 elementos.

Os parâmetros utilizados na fase experimental seguinte encontram-se visíveis na Tabela 4.12 abaixo. É importante frisar que não foi realizada variação no valor do ganho, sendo que todas as passagens foram realizadas a 30db.

Tabela 4.12 - Parâmetros utilizados na segunda fase de ensaios de furação.

10MHz		Matriz	
		Matriz 32	Matriz 40
Abertura	6 elementos	HOLF-10-32-6	HOLF-10-40-6
	8 elementos	HOLF-10-32-8*	HOLF-10-40-8*
	9 elementos	HOLF-10-32-9	HOLF-10-40-9

Leituras com aberturas menores mostraram ter retorno sonoro inferior, no entanto, mostraram ter uma maior capacidade de detecção, especificação e posicionamento do defeito. O ponto menos positivo poderá ser solucionado, ajustando o ganho. Já os ensaios com 9 elementos mostraram ser marginalmente piores que os ensaios com 6 e 8 PZTs. Na Figura 4.26, é possível ver a comparação entre abertura de 6 (a) e de 9 (b). Os furos começar a sofrer algum tipo de distorção, tornando a sua localização menos evidente.



Figura 4.26 - Comparação entre leituras com abertura de 6 (a) e 9 (b) PZTs

Tirando o facto de o ganho não estar ajustado como deveria, a leitura feita com menos PZTs apresenta menos distorção de imagem e uma melhor definição das laterais do provete. Tendo em conta que a parametrização com abertura de 9 elementos mostra uma redução na capacidade de focagem, vai comparar-se as leituras de 6 e 8, com uma nova leitura com abertura com 7 PZTs.

As leituras com matrizes mais reduzidas apresentam alguma distorção, no entanto, trabalhando com aberturas menores, obtêm-se leituras mais claras. Por outro lado, matrizes,

tanto de 32, como de 40 elementos, podem ser utilizadas na detecção de furos. Isto pode ser observado na Figura 4.27 abaixo.

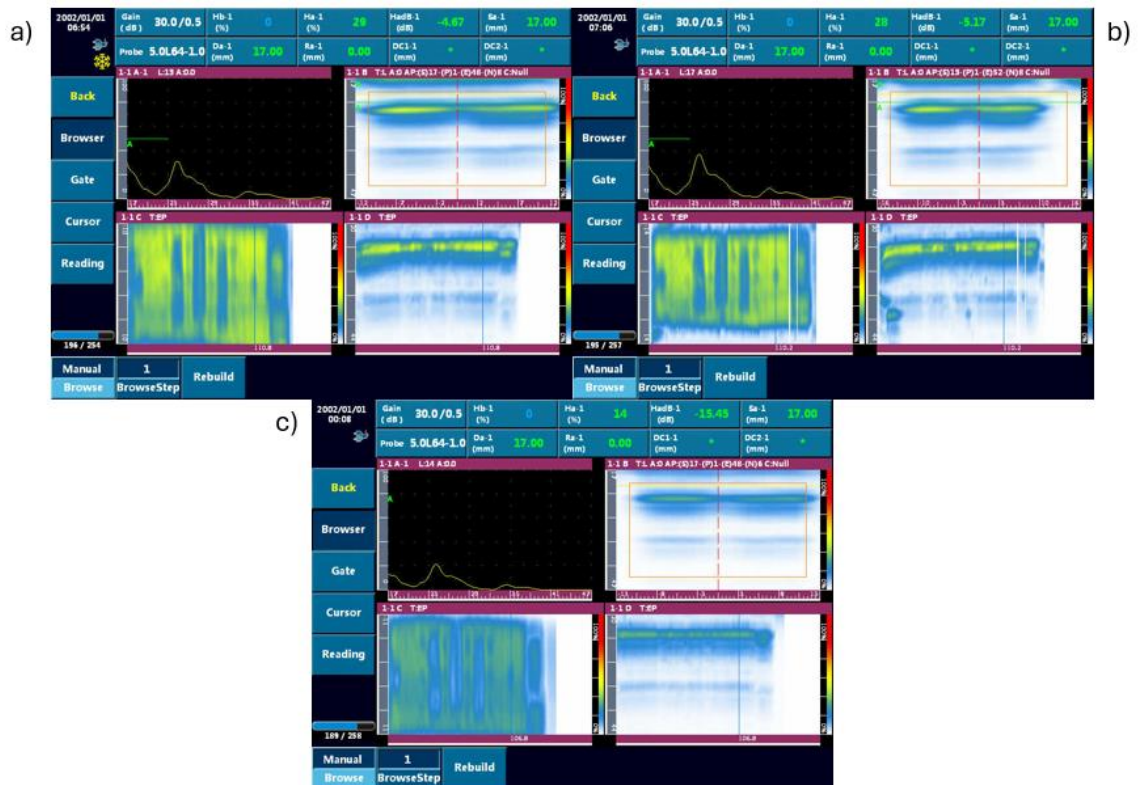


Figura 4.27 - Comparação de leituras com parâmetros: a) abertura de 8 c/ matriz de 32; b) A. de 8 c/ matriz de 40; c) A. de 6 c/ matriz de 32.

Nos próximos ensaios, vão ser realizadas leituras apenas matriz de 32 elementos, já que mostrou ter um bom desempenho com aberturas menores.

Para além disto, o valor médio do ganho vai ser ajustado em cada conjunto de parâmetros, fazendo-se variar ± 2 db desse valor. Isto deve-se à maior sensibilidade registada, relativamente a alterações no ganho.

Com isto, a Tabela 4.13 apresenta os parâmetros utilizados para a última análise de parâmetros para furações.

Tabela 4.13 - Parâmetros para teste de janela útil em furação 10MHz e matriz de 32 PZTs.

10MHz		Abertura		
		6 elementos	7 elementos	8 elementos
ganho (dB)	X - 2db	-	HOLPF-32-7-L	HOLPF-32-8-L
	X	HOLPF-32-6-M	HOLPF-32-7-M	HOLPF-32-8-M
	X + 2db	-	HOLPF-32-7-H	HOLPF-32-8-H

Nas novas leituras já há uma maior noção de dimensão de defeitos. Há uma clara diferença entre os Def. B e os Def. E, o que pode significar uma diferença de profundidade. Isto é visível

na Figura 4.28 abaixo.

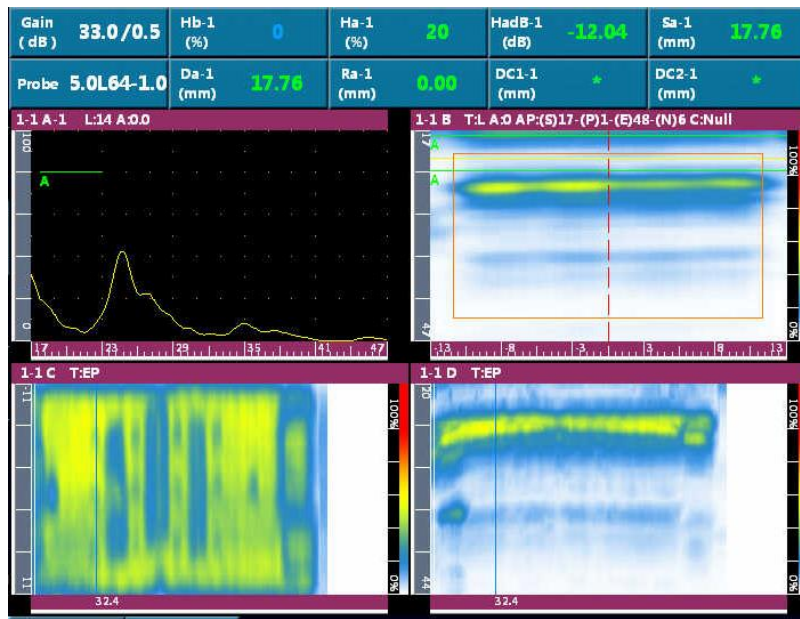


Figura 4.28 - Medição Def. B HOLPF-32-6-M

Por outro lado, em nenhuma das leituras, é possível medir a profundidade dos furos, quer com *B-scan*, quer com *D-scan*.

Há também uma diferença no retorno sonoro dos furos. Isto evidencia, em algumas leituras, a diferenciação de dimensão dos diversos furos. Isto encontra-se visível na Figura 4.29, também presente no Apêndice 4.

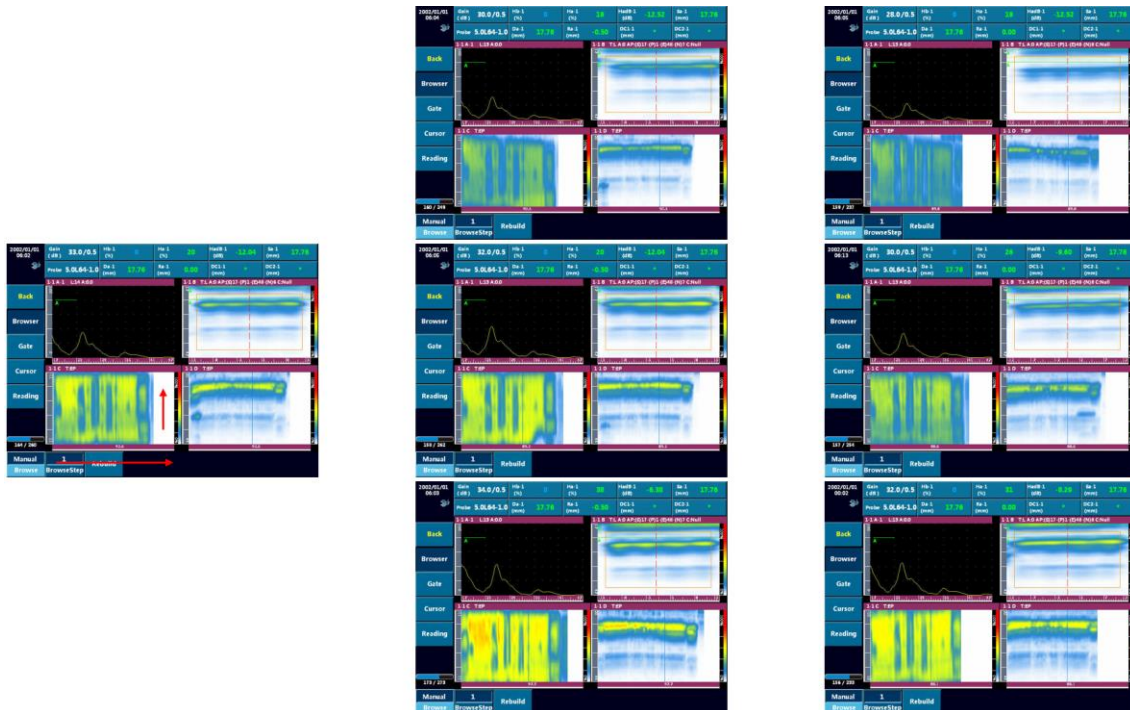


Figura 4.29 - Ensaios finais de Furação

Na Figura 4.29 acima é ainda possível observar que as variações superiores no ganho produziram resultados inferiores às restantes, no entanto, com uma abertura de 8 elementos a qualidade mostrou ser aceitável.

Os furos de diâmetros mais reduzidos mostraram ser mais difíceis de detetar. Isto pode dever-se a serem demasiado pequenos para serem apanhados pelo feixe ultrassónico.

4.4.4. Observações

Após a recolha de informação, e o seu processamento, é possível retirar as seguintes observações.

Com a janela de parâmetros final, pode-se proceder à verificação de espessuras ou profundidade de caixas, utilizando *B-scan* e, até certo ponto, *D-scan*.

Há menor facilidade em detetar, consistentemente, furos de menores dimensões, quer em diâmetro, quer em profundidade.

Observou-se alguma diferenciação entre furos, relativamente à sua dimensão.

Parametrização de alta frequência, com aberturas entre os 7 e os 6 elementos, produziram os melhores resultados.

A matriz, que melhores resultados deu, foi a de 32, no entanto, tal como o ganho, são parâmetros que devem ser ajustados, com base na utilização/tarefa em questão.

A deteção dos furos pode ter sido conseguida pelo método de perda de sinal.

Com isto, a janela de parâmetros ótima para este tipo de ensaios, utilizando os equipamentos do IPS, encontra-se na Tabela 4.14 abaixo.

Tabela 4.14 - Janela de parâmetros Furação.

Janela de Parâmetros para Ensaio de Furação		
Parâmetro	mínimo	máximo
Frequência	10 MHz	
Matriz	32+-	<40
Abertura	6	7
Int. ganho	Méd. - 2	Méd + 2

4.5. Discussão de resultados

Neste subcapítulo, vão ser discutidos, analisados e explicados os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Vai ser feita uma comparação entre os dois tipos de defeitos e, no fim, será criada uma tabela com parâmetros ótimos gerais para inspeção de PRFs de paredes finas com o equipamento SIUI-Supor do Instituto Politécnico de Setúbal.

4.5.1. Matriz

O tamanho de matriz, para ambos os testes, é diferente. Isto deve-se ao tipo de defeitos ser diferente. No caso das delaminações, trata-se de um defeito de grandes dimensões que pôde ser visto com matrizes maiores. Num caso como estes é importante ter uma matriz maior, embora neste caso, a matriz de 64 “encolhesse” as descontinuidades. No entanto, os ensaios nas furações mostraram que para defeitos de dimensões mais reduzidas, utilizando este equipamento, levam à necessidade de utilizar matrizes mais pequenas, que ajudem na “ampliação” artificial dos defeitos.

4.5.2. Frequência

Como foi possível observar nos ensaios de PAUT, os melhores resultados foram predominantes em regimes de maiores frequências, quer para ensaios de delaminação, quer para ensaios de furação. Em ensaios de parede fina, de modo geral, recomenda-se a utilização leituras com sondas de alta-frequência, ou, pelo menos, frequências mais elevadas [40] [51]. Isto permite obter ecos mais distintos, levando a melhores focagens em *B-scan* e *D-scan* [39].

Isto mostrou ser útil na deteção dos furos nos ensaios de furação. Isto, mais uma vez, pode ser originado na capacidade de ter uma melhor focagem, aquando da utilização de frequências mais elevadas.

4.5.3. Abertura

Embora aberturas maiores, tenham sido algo eficazes na identificação de descontinuidades maiores, nos ensaios de delaminação, provaram ser insuficientes na deteção de defeitos mais próximos ou mais pequenos. A utilização de aberturas mais pequenas nos ensaios de deteção de Del1 e Del2 permitiram identificar, não só múltiplos patamares de delaminação, mas também, irregularidades na superfície da parede de fundo, originadas em processos de maquinação. Para os ensaios de furação, a redução no número de elementos provou ser bastante útil na deteção de defeitos de menores dimensões.

Isto deve-se ao facto de, no caso de não ser possível aumentar a frequência, nem ajustar mais a regra focal, reduzindo o número de elementos ativos, é possível obter um feixe mais fino

e focado numa certa linha, em vez de um ponto, que pode não estar dentro da espessura do provete[60]. Assim, é possível detetar defeitos em profundidades, ou espessuras, mais reduzidas [66][68]. Este efeito encontra-se exemplificado na Figura 4.30 abaixo.

Com isto, conclui-se que as leituras com aberturas mais pequenas permitem identificar defeitos mais pequenos, sem interferir com leitura de varrimento dos provetes/peças em teste.

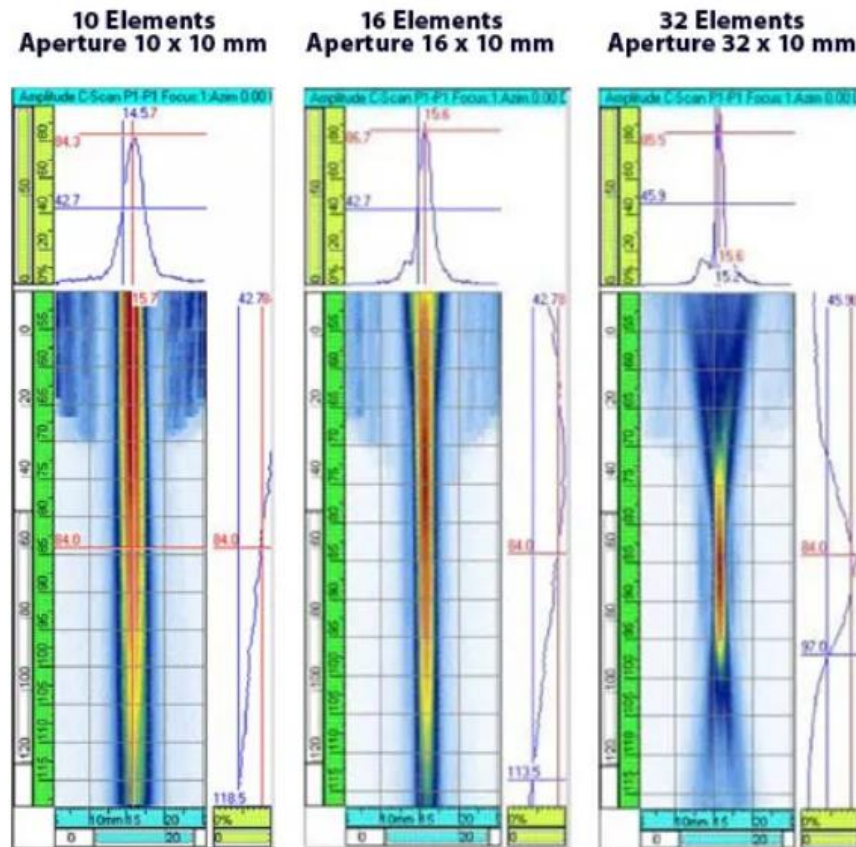


Figura 4.30 - Impacto de alteração do número de elementos ativos na abertura [60].

4.5.4. UT convencional

Na testagem de UT convencional, não foi possível chegar a conclusões concretas das capacidades de inspeção de compósitos de parede fina. A sonda utilizada pode não ser adequada para este tipo de ensaios. No caso de utilização de uma sonda de alta frequência, pode ser que seja possível realizar a inspeção destes provetes.

Nos testes de delaminação, as passagens em varrimento só foram bem-sucedidas devido ao grande retorno dos grandes patamares de delaminação. Mesmo assim, não foi possível obter leituras compreensíveis de leitura de profundidade dos defeitos.

Nos ensaios preliminares, para os ensaios de furação, não foi possível identificar quaisquer defeitos. Isto pode dever-se, simplesmente, à sonda direita não ter área para passagens de varrimento. Por outro lado, a sonda pode não estar a receber retorno sonoro dos defeitos, devido

à extensão da zona de campo longínquo, ou à morfologia do defeito resultar numa reflexão sonora para longe do PZT.

Este tipo de tecnologia poderá ser útil em componentes de maior espessura, ou testes em locais específicos de controlo sim/não.

4.5.5. Parâmetros

Para ambos os tipos de defeitos, há intervalos de parâmetros que se intercetam. No entanto, de modo geral, é possível dizer que, utilizando valores intermédios, é possível obter resultados que permitam resultados algo satisfatórios. Com isto são apresentados, uma Tabela 4.15, com parâmetros gerais, e uma Figura 4.31 que mostra, comparativamente, os diversos parâmetros.

Tabela 4.15 - Janela geral de parâmetros para PAUT em PRFC.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Frequência	10MHz	
Matriz	32	48
GE	6	8
in ganho	méd.-6	méd. +6

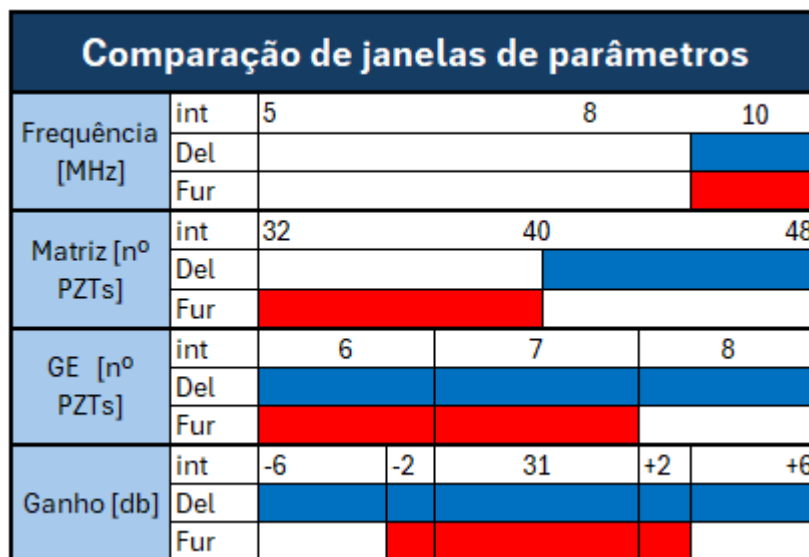


Figura 4.31 - Figura de comparação de parâmetros

O ganho deverá ser ajustado para cada leitura. Em adição a isto, a técnica de variação do ganho deverá ter uma amplitude menor, aquando da utilização de aberturas menores.

Capítulo 5

Conclusão e proposta de trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Neste trabalho, foi realizada uma pesquisa sobre o tipo de defeitos ocorrentes em materiais de Polímero Reforçado por Fibra (PRF), identificando os vários defeitos ocorrentes nos mesmos. Depois disto, foi possível identificar defeitos de delaminação como os mais ocorrentes. Um fator importante é que se percebeu que, em muitos casos, a ocorrência de *debonding* entre camadas é um produto de outros possíveis defeitos, como poros, impactos e maquinações.

Mais à frente, foi realizada uma pesquisa sobre os métodos de funcionamento da tecnologia de UT convencionais, mas principalmente, sobre o método de funcionamento da tecnologia de ultrassons com *phased array*, ou PAUT. Aqui, foi possível perceber como funciona, quais os parâmetros e alguns métodos de inspeção em materiais compósitos.

Com base na pesquisa anterior, foi possível elaborar um conjunto de testes de parametrização, permitindo isolar uma gama de parâmetros geral. Isto também levou aos primeiros sucessos na focagem de uma placa de fibra de carbono de baixa espessura.

Seguidamente, foram realizados testes de ensaios de delaminação, onde foi possível detetar todos os macro e micro-defeitos, utilizando uma metodologia de testes incremental. Com isto, foi possível chegar ao conjunto de parâmetros para ensaios de delaminação, presentes na Tabela 4.9. Pode-se assumir, assim, que é possível visualizar defeitos de delaminação de camadas com o uso do equipamento digital da ESTS.

O objetivo dos testes de furação eram apenas a deteção das furações e das marcações superficiais. Seguindo também uma estratégia incremental, foi possível identificar a localização de todos os defeitos e, até certo ponto, diferenciá-los em termos de dimensão. No entanto, não foi possível detetar a sua profundidade. Foi depois alcançada uma janela de parâmetros, visível na Tabela 4.14, que consegue, parcialmente, ser utilizada para inspeção de defeitos menores.

A frequência mostrou ser um parâmetro bastante importante na focagem da placa, auxiliando a diferenciação dos diversos ecos de micro-defeitos e patamares de delaminação. Uma maior frequência mostrou ser útil na inspeção destes compósitos de parede fina.

A utilização de um grupo de elementos ativos menores criou um feixe estreito e contínuo,

levando a uma melhor detecção de pequenos defeitos, quer à face, quer dentro do provete.

O ganho deverá ser regulado caso-a-caso, para se obter um bom contraste nas leituras. É de esperar que este seja mais elevado, que em frequências mais elevadas, devido à perda inerente de sinal de retorno em frequências elevadas.

A técnica de variação do ganho em ± 6 db provou ser bastante útil nos defeitos de delaminação. Esta também é útil nos defeitos de furação, no entanto, é preciso referir a importância de valores de variação menores, para não inutilizar as leituras, aquando da utilização de aberturas menores em altas frequências.

A matriz provou ser importante apenas na vertente de aumento/diminuição da imagem obtida.

No fim do trabalho, foi possível obter uma gama de parâmetros, com os quais será possível realizar ensaios em compósitos de parede fina, com o equipamento existente na ESTS do IPS.

Os resultados dos ensaios com UT convencional não foram satisfatórios. Foram apenas capazes de detetar um patamar de delaminação significativo. No entanto, a resolução dos ensaios de delaminação e a incapacidade de detetar dos defeitos de furação, mostra a incapacidade do método, ou do equipamento, no controlo de compósitos de parede fina. No entanto, propõe-se a realização de um estudo futuro, para uma janela de parâmetros com uma sonda direita convencional de altas frequências.

5.2. Proposta de trabalhos futuros

Durante os ensaios experimentais, foi recebido algum feedback externo, relativo à possibilidade do calço não ser o mais indicado para a execução de ensaios em componentes de parede fina. Isto leva à perda de sinal e à perda de capacidade de outros parâmetros. Com isto, propõe-se o estudo de um novo calço, mais indicado para ensaios em compósitos de parede fina, e na otimização de cálculo de parâmetros para facilitar ensaios em ambiente operacional. Isto encontra-se especificado no Apêndice 5.

Referências Bibliográficas

- [1] B. Huang *et al.*, “Investigation on the fundamental mechanical properties and probabilistic characteristics of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composite plates,” *Polym Test*, vol. 131, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108355.
- [2] D. Ratna, “Toughened FRP composites reinforced with glass and carbon fiber,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 39, no. 3, pp. 462–469, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.12.005.
- [3] P. Singh *et al.*, “Characterization of wear of FRP composites: A review,” *Mater Today Proc*, vol. 64, pp. 1357–1361, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.236.
- [4] I. Infanta May Priya and R. Senthil, “Mechanical behavior of biaxial non-crimp glass fiber reinforced polymer composite,” *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 4153–4158, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.676.
- [5] K. Guo, X. Liu, Y. Ren, and H. Jiang, “Experimental study on crashworthiness and failure mechanisms of aeronautical multi-fibers hybrid composite corrugated structures with Carbon, Glass, Kevlar,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 142, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ast.2023.108599.
- [6] N. Guermazi, N. Haddar, K. Elleuch, and H. F. Ayedi, “Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 714–724, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.043.
- [7] M.-Y. Shen, Z.-H. Guo, and W.-T. Feng, “A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar,” *Compos B Eng*, vol. 264, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110878.
- [8] C. J. Jones, R. F. Dickson, T. Adam, H. Reiter, and B. Harris, “Environmental fatigue of reinforced plastics,” *Composites*, vol. 14, no. 3, pp. 288–293, Jul. 1983, doi: 10.1016/0010-4361(83)90018-6.
- [9] K. Karthik, D. Rajamani, T. Raja, and K. Subramani, “Experimental investigation on the mechanical properties of Carbon/Kevlar fibre reinforced epoxy LY556 composites,” *Mater Today Proc*, vol. 52, pp. 668–674, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.077.
- [10] Y. Fu and X. Yao, “A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 8, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100276.
- [11] J. Zhang, J. Xie, X. Zhao, J. Chen, and Z. Li, “Influence of void defects on impact properties of CFRP laminates based on multi-scale simulation method,” *Int J Impact Eng*, vol. 180, p. 104706, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104706.

- [12] M. L. Costa, S. F. M. de Almeida, and M. C. Rezende, "The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates," *Compos Sci Technol*, vol. 61, no. 14, pp. 2101–2108, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00157-9.
- [13] H. Ahmadian, M. Yang, and S. Soghrati, "Effect of resin-rich zones on the failure response of carbon fiber reinforced polymers," *Int J Solids Struct*, vol. 188–189, pp. 74–87, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.10.004.
- [14] P. Journoud, C. Bouvet, B. Castanié, and L. Ratsifandrihana, "Experimental analysis of the effects of wrinkles in the radius of curvature of L-shaped carbon-epoxy specimens on unfolding failure," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 158, p. 106975, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.106975.
- [15] Y. Liu *et al.*, "Characterization of progressive damage behaviour and failure mechanism of carbon fiber reinforced composite laminates," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 13791, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-98774-7.
- [16] M. J. Suriani, H. Z. Rapi, R. A. Ilyas, M. Petru, and S. M. Sapuan, "Delamination and Manufacturing Defects in Natural Fiber-Reinforced Hybrid Composite: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1323, Apr. 2021, doi: 10.3390/polym13081323.
- [17] Drescher P., Thomas M., Borris J., Riedel U., and Arlt C., "Strengthening fibre/matrix interphase by fibre surface modification and nanoparticle incorporation into the matrix," *Compos Sci Technol*, vol. 74, pp. 60–66, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.10.004>.
- [18] J. Xu *et al.*, "A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites," *Compos Struct*, vol. 294, p. 115594, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115594.
- [19] L. Lasri, M. Nouari, and M. El Mansori, "Wear resistance and induced cutting damage of aeronautical FRP components obtained by machining," *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2542–2548, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.11.056.
- [20] J. Summa, M. Becker, F. Grossmann, M. Pohl, M. Stommel, and H.-G. Herrmann, "Fracture analysis of a metal to CFRP hybrid with thermoplastic interlayers for interfacial stress relaxation using in situ thermography," *Compos Struct*, vol. 193, pp. 19–28, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.013.
- [21] M. A. Machado, K.-N. Antin, L. S. Rosado, P. Vilaça, and T. G. Santos, "High-speed inspection of delamination defects in unidirectional CFRP by non-contact eddy current testing," *Compos B Eng*, vol. 224, p. 109167, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109167.
- [22] D. Francis, R. P. Tatam, and R. M. Groves, "Shearography technology and applications: a review," *Meas Sci Technol*, vol. 21, no. 10, p. 102001, Oct. 2010, doi: 10.1088/0957-0233/21/10/102001.
- [23] H. Yang *et al.*, "Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: A review," *Compos Struct*, vol. 324, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117554.

- [24] T. D’Orazio, M. Leo, A. Distante, C. Guaragnella, V. Pianese, and G. Cavaccini, “Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials,” *NDT & E International*, vol. 41, no. 2, pp. 145–154, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.ndteint.2007.08.001.
- [25] OLYMPUS, “1.2 História da detecção de defeitos por ultrassom,” <https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/ flaw-detection/history/>. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/ flaw-detection/history>
- [26] D. Gomes Oliveira, “UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: Fundamentos e Aplicações,” 2019. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25387/1/TCC-DAMI%C3%83O-17.05.19%20vers%C3%A3o%20final.pdf>
- [27] V. Dattoma, F. Willem Panella, A. Pirinu, and A. Saponaro, “Ultrasonic and thermographic studies for CFRP inspections with real and simulated defects,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 224–234. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.915.
- [28] Dr. Ala Hijazi, “Introduction to Non-Destructive Testing techniques: Ultrasonic Testing.” Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
- [29] Sandeep Anand, “(UT) Ultrasonic Test Basis,” *Welding & NDT*. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.weldingandndt.com/ultrasonic-test-basics/>
- [30] OLYMPUS, “Material Sound Velocities,” <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities>
- [31] Noël Dubé *et al.*, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*, 2007th ed. Waltham, MA, USA: OlympusNDT, 2004. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: https://visco.com.vn/download/Introduction_to_Phased_Array_Ultrasonic_Technology_Applications.pdf
- [32] Y.-I. Hwang, D. Sung, H.-J. Kim, S.-J. Song, K.-B. Kim, and S.-S. Kang, “Propagation and Attenuation Characteristics of an Ultrasonic Beam in Dissimilar-Metal Welds,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6259, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20216259.
- [33] Center for Nondestructive Evaluation NDE-Ed.org, “Distance Amplitude Correction,” <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/CalibrationMeth/calibrationmethods.xhtml>. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/CalibrationMeth/calibrationmethods.xhtml>
- [34] Uğur KILIÇ, “Ultrasonic testing near field formula, my own drawing in excel,” https://www.linkedin.com/posts/u%C4%9Fur-kili%C3%A7-77308818b_ndt-ultrasonic-nearfield-activity-6964670704617185280-7ROI. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online].

- Available: https://www.linkedin.com/posts/u%C4%9Fur-kili%C3%A7-77308818b_ndt-ultrasonic-nearfield-activity-6964670704617185280-7ROI
- [35] Iowa State University Center for Nondestructive Evaluation, "Ultrasonic Inspection Formulas - Near Field," <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/ultrasonicFormula.xhtml>. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/ultrasonicFormula.xhtml>
- [36] W. Gao, W. Liu, F. Li, and Y. Hu, "Analysis and Validation of Ultrasonic Probes in Liquid Level Monitoring Systems," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1320, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041320.
- [37] OLYMPUS, "A Review of Conventional Beam Characteristics." Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/id/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>
- [38] Michael Berke, "Nondestructive Material Testing with Ultrasonics." [Online]. Available: <http://www.ndt.net/?id=540>
- [39] V. V. Gonçalves, D. M. G. de Oliveira, and A. A. dos Santos Junior, "Comparison of Ultrasonic Methods for Detecting Defects in Unidirectional Composite Material," *Materials Research*, vol. 24, no. suppl 2, 2021, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2021-0323.
- [40] OLYMPUS, "High-Frequency Transducers." Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/highfrequency/>.
- [41] "Ultrasonic Transducers." [Online]. Available: www.olympus-ims.com
- [42] S. Li and T. P. Chu, "An Intelligent Systems Approach for Detecting Delamination Defects due to Impact Damage in CFRP Panel by Using Ultrasonic Testing," 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277010881>
- [43] K. Akowua *et al.*, "Review and down-selection of NDE technologies suitable for ITER cooling water system remote weld inspections," *Fusion Engineering and Design*, vol. 196, p. 113980, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.113980.
- [44] M. J. R. Heck, "Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering," *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, pp. 93–107, Jan. 2017, doi: 10.1515/nanoph-2015-0152.
- [45] V. Kappatos *et al.*, "Theoretical Assessment of Different Ultrasonic Configurations for Delamination Defects Detection in Composite Components," *Procedia CIRP*, vol. 59, pp. 29–34, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.10.125.
- [46] D. Yan, M. Sutcliffe, B. Wright, and I. Cooper, "Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fibre-reinforced polymer," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 55, no. 9, pp. 477–481, Sep. 2013, doi: 10.1784/insi.2012.55.9.477.
- [47] N. Amizan, A. Rahman, J. Puspanathan, and J. Alsayaydeh, "Review: The Application of Imaging Techniques SAFT As An Ultrasonic Monitoring System Support," Nov. 2020. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available:

<https://www.researchgate.net/publication/357537886>

- [48] A. W. Elbern and L. Guimarães, "Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restoration," Aug. 2000, *NDT.net, Porto Alegre - RS*. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/v05n08/elbern/elbern.htm>
- [49] M. Khelil, J.-H. Thomas, L. Simon, R. El Guerjouma, and M. Boudraa, "Characterization of Structural Noise Patterns and Echo Separation in the Time-Frequency Plane for Austenitic Stainless Steels," *J Nondestr Eval*, vol. 36, no. 2, p. 31, Jun. 2017, doi: 10.1007/s10921-017-0409-5.
- [50] X. Wang, J. He, W. Guo, and X. Guan, "Three-dimensional damage quantification of low velocity impact damage in thin composite plates using phased-array ultrasound," *Ultrasonics*, vol. 110, p. 106264, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ultras.2020.106264.
- [51] B. Wang, P. He, Y. Kang, J. Jia, X. Liu, and N. Li, "Ultrasonic Testing of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites," *J Sens*, vol. 2022, pp. 1–20, Jun. 2022, doi: 10.1155/2022/5462237.
- [52] H. R. Maleki, B. Abazadeh, Y. Arao, and M. Kubouchi, "Selection of an appropriate non-destructive testing method for evaluating drilling-induced delamination in natural fiber composites," *NDT & E International*, vol. 126, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2021.102567.
- [53] J. P. Zardan, C. Gueudré, and G. Corneloup, "Study of induced ultrasonic deviation for the detection and identification of ply waviness in carbon fibre reinforced polymer," *NDT & E International*, vol. 56, pp. 1–9, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.ndteint.2013.02.001.
- [54] P. Kulkarni, K. D. Mali, and S. Singh, "An overview of the formation of fibre waviness and its effect on the mechanical performance of fibre reinforced polymer composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 137, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106013.
- [55] H. Taheri and A. A. Hassen, "Nondestructive ultrasonic inspection of composite materials: A comparative advantage of phased array ultrasonic," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/app9081628.
- [56] "ISO 16810:2024 Non-destructive testing - Ultrasonic testing - General principles," Oct. 2024, *ISO - International Standards Organisation*.
- [57] "ASTM E3370-24: Standard Practice for Matrix AArray Ultrasonic Testing of Composites, Sandwich Core Construction, and Metals.," 2024, *ASTM - America Society for Testing and Materials*.
- [58] P. D. de Almeida and G. R. Pereira, "Phased array inspection of glass fiber reinforced polymers pipeline joints," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4736–4740, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.020.
- [59] A. Bulavinov, R. Pinchuk, S. Pudovikov, and C. Boller, "Ultrasonic Sampling Phased Array Testing as a Replacement for X-ray Testing of Weld Joints in Ship Construction," Nov. 2011.
- [60] Evident - Wabtec Corporation, "Focusing With Phased Array Probes," <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/transducers/focusing>.

- [61] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Edition. Cologne: Springer Berlin Heidelberg, 1990. doi: 10.1007/978-3-662-10680-8.
- [62] L. Zhiying, L. Feifei, Y. Yusen, and L. Songping, "Phased Array Ultrasonic Inspection of Composite Fuselage Panel," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2822/1/012108.
- [63] E. Duernberger, C. MacLeod, D. Lines, C. Loukas, and M. Vasilev, "Adaptive optimisation of multi-aperture ultrasonic phased array imaging for increased inspection speeds of wind turbine blade composite panels," *NDT & E International*, vol. 132, p. 102725, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ndteint.2022.102725.
- [64] H. Taheri and A. A. Hassen, "Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1628, Apr. 2019, doi: 10.3390/app9081628.
- [65] T. Yoon, Y. Kim, M. Awais, and B. Lee, "Acoustic Velocity Measurement for Enhancing Laser UltraSound Imaging Based on Time Domain Synthetic Aperture Focusing Technique," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2635, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23052635.
- [66] Evident - Wabtec Corporation, "Introduction to Phased Array Ultrasonic Testing." Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ims.evidentscientific.com/en/learn/ndt-tutorials/intro/ut>
- [67] K. Ono, "Frequency Dependence of Receiving Sensitivity of Ultrasonic Transducers and Acoustic Emission Sensors," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3861, Nov. 2018, doi: 10.3390/s18113861.
- [68] R. Mohammadkhani *et al.*, "Improving Depth Resolution of Ultrasonic Phased Array Imaging to Inspect Aerospace Composite Structures," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 559, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20020559.

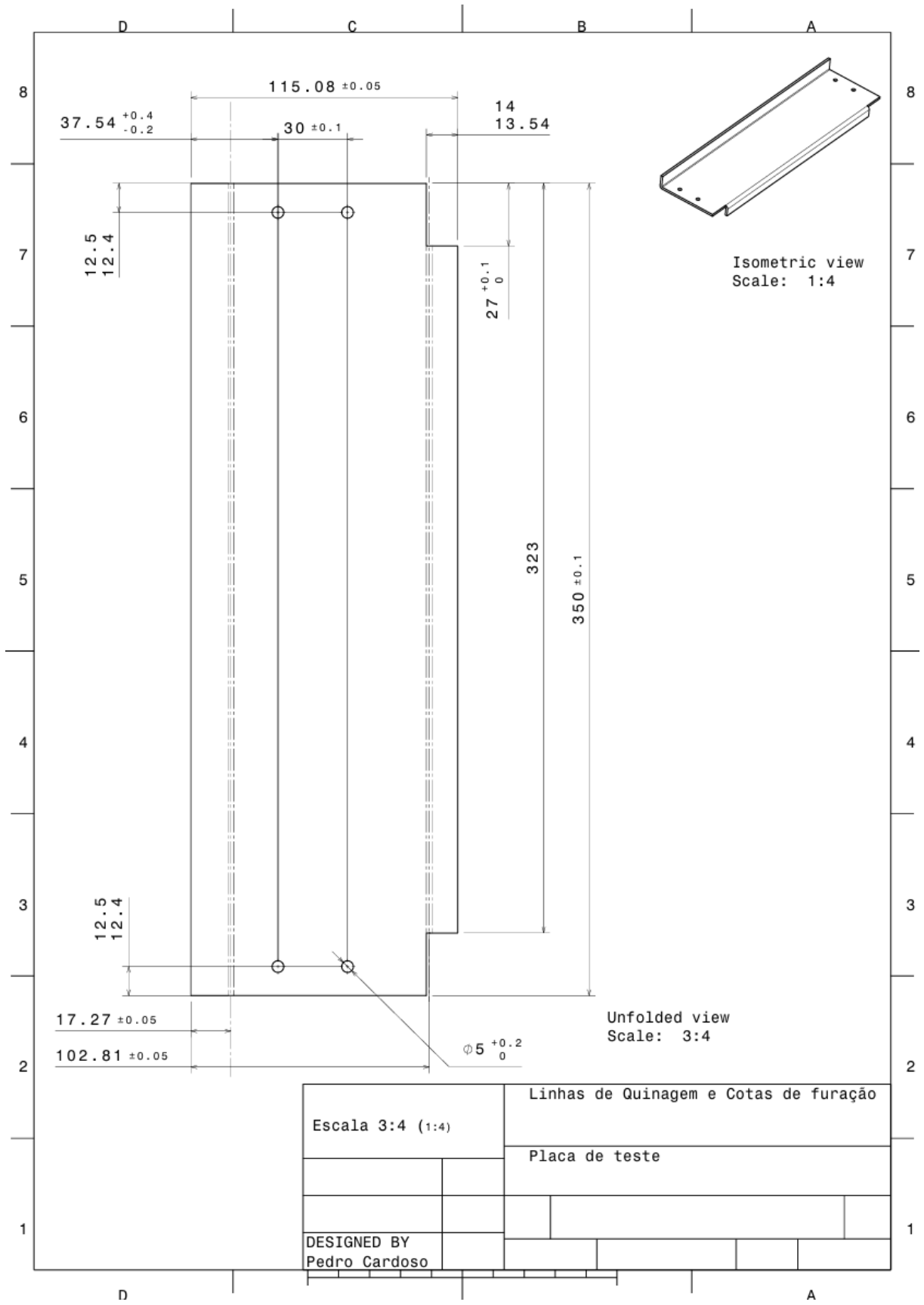
Apêndice I

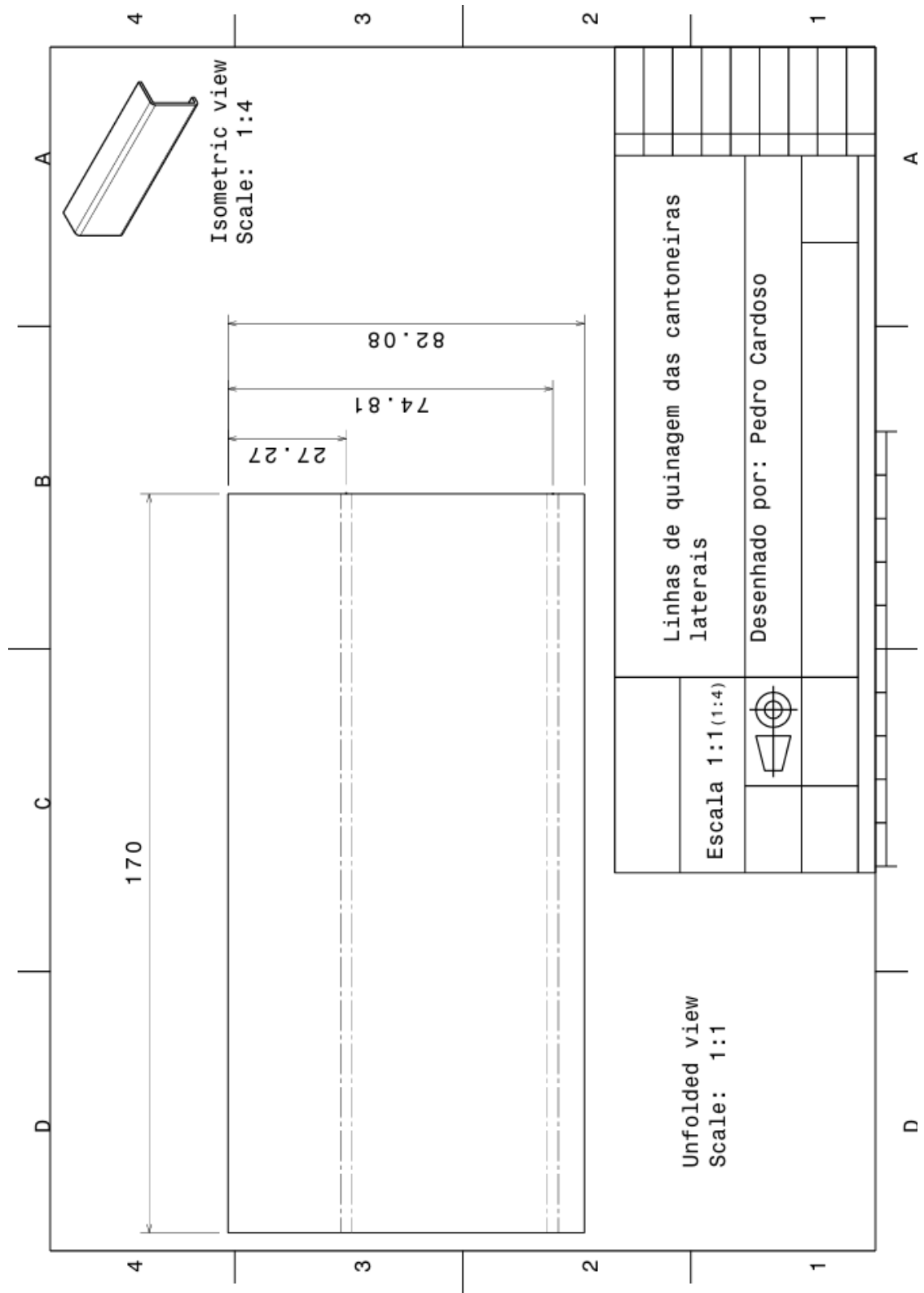
Jig/Banco de Ensaios

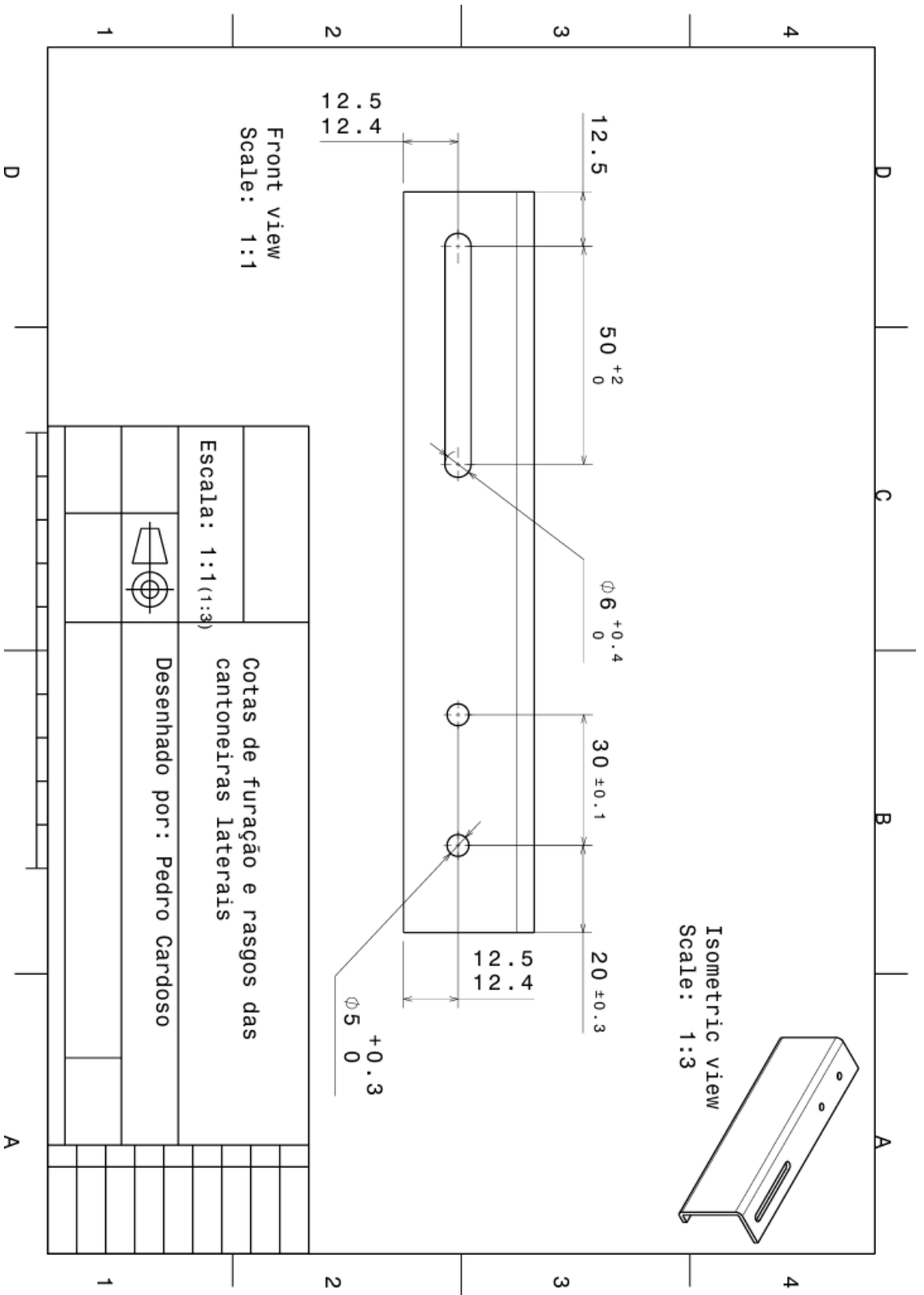
Neste anexo é possível ver uma representação 3d do banco de ensaios utilizado para os ensaios e os alguns esboços em 2D para o fabrico do mesmo.

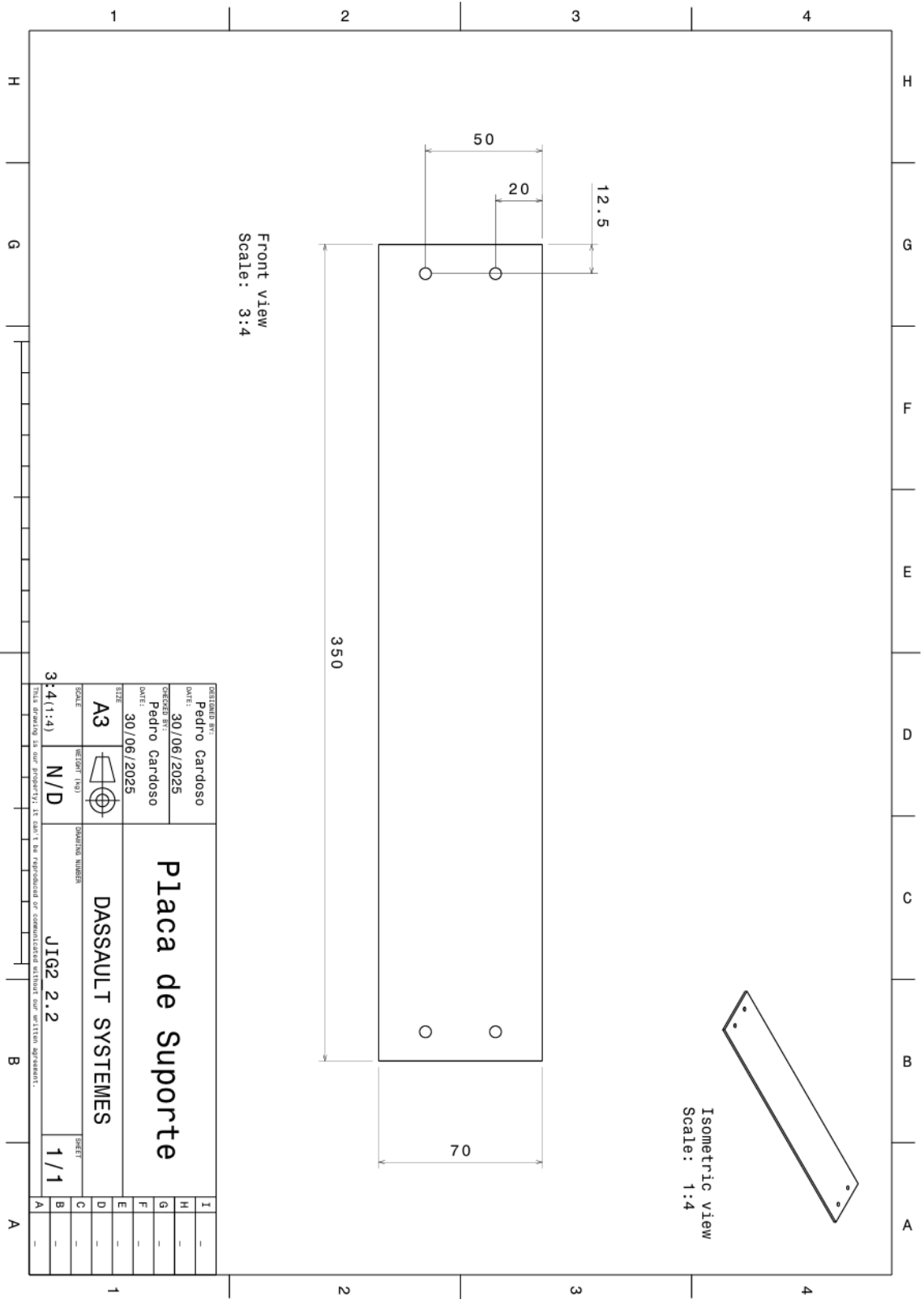
Este banco de ensaios foi produzido, utilizando chapa de alumínio, com espessura de 3mm. As etapas de maquinação não se encontram especificadas.

Embora tenha sido à medida do layout destes ensaios, este dispositivo foi pensado, de modo a possibilitar o ajuste da distância da régua, relativamente à mesa.







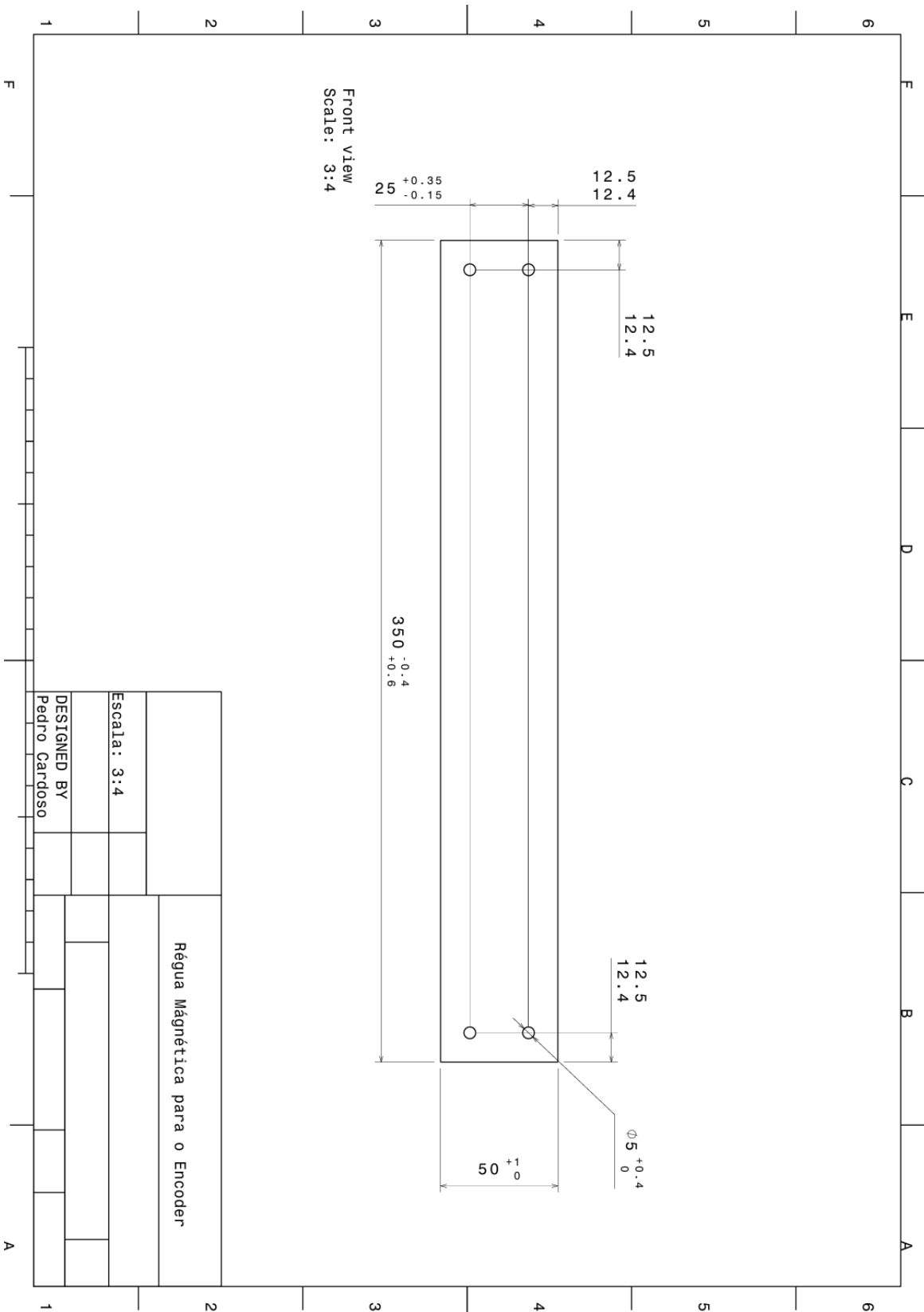


Front view
Scale: 3:4

Isometric view
Scale: 1:4

DESIGNED BY: Pedro Cardoso		DRAWING NUMBER: JIG2 2.2	SHEET: 1 / 1
DATE: 30/06/2025	CHECKED BY: Pedro Cardoso		
DATE: 30/06/2025		SCALE: 3:4 (1:4)	
SIZE: A3		WEIGHT (kg): N/D	
<p style="text-align: center;">Placa de Suporte</p> <p style="text-align: center;">DASSAULT SYSTEMES</p>			
I	-		
H	-		
G	-		
F	-		
E	-		
D	-		
C	-		
B	-		
A	-		

THIS DRAWING IS OUR PROPERTY. IT CAN'T BE REPRODUCED OR COMMUNICATED WITHOUT OUR WRITTEN AGREEMENT.



Apêndice II

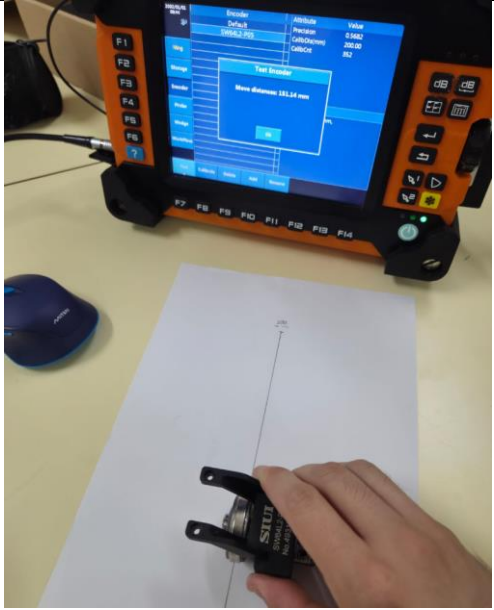

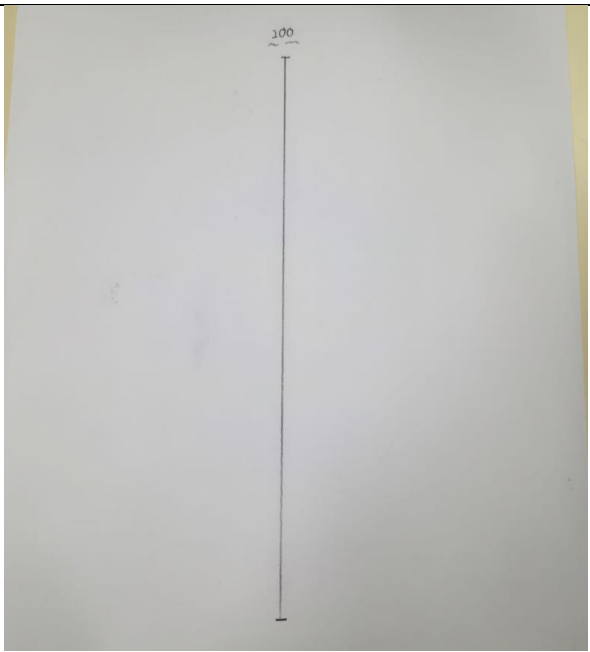
Procedimento de Utilização/Calibração PAUT

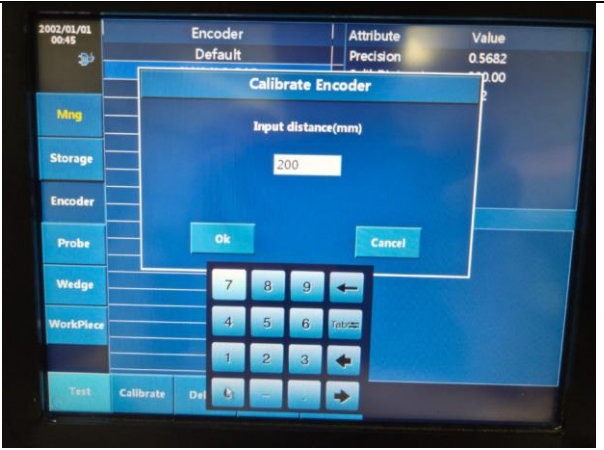
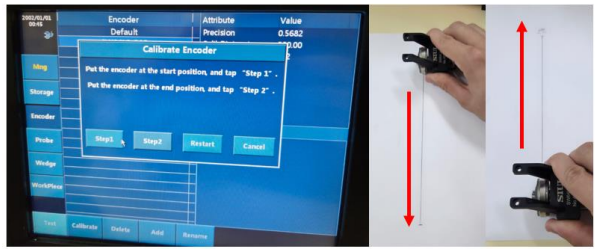


Neste Anexo, encontra-se o procedimento de calibração do equipamento na sua vertente de utilização com PAUT e encoder.

Este procedimento foi elaborado com o intuito de documentar e uniformizar o processo de calibração do equipamento. Isto permite, não só reduzir a variabilidade, durante o processo de investigação, mas também, elaborar um documento que permitirá a outras pessoas tirarem proveito do equipamento.






O documento faz também algumas advertências a possíveis alterações/parametrizações para otimizar, dentro dos possíveis, o equipamento para ensaios em compósitos de parede fina.



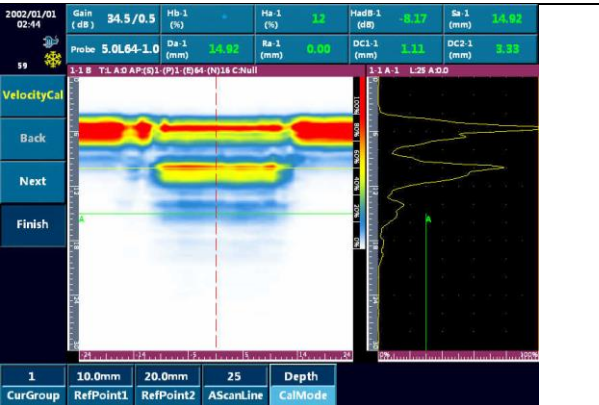

Nº	etapa	imagem
1	Calibração do encoder	
1.1	Menu principal -> MNG	
1.2	-> Encoder	


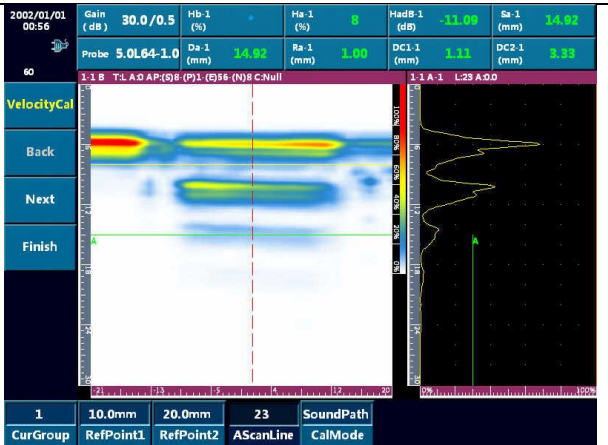
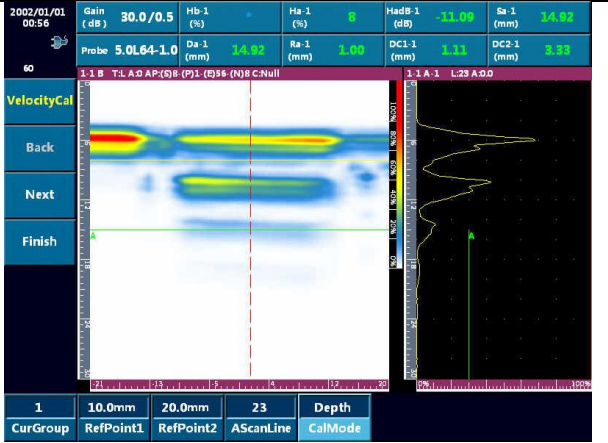

1.3	Test encoder	
1.4	Caso seja necessário calibrar o encoder, após a verificação, ir para "Calibrate Encoder"	
1.5	Ter uma "pista" de calibração com comprimento especificado	

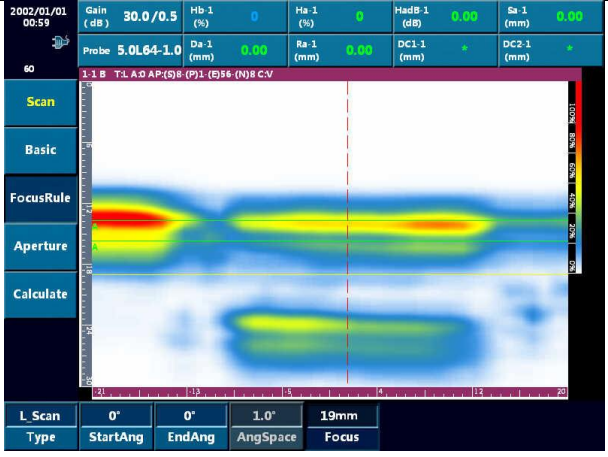

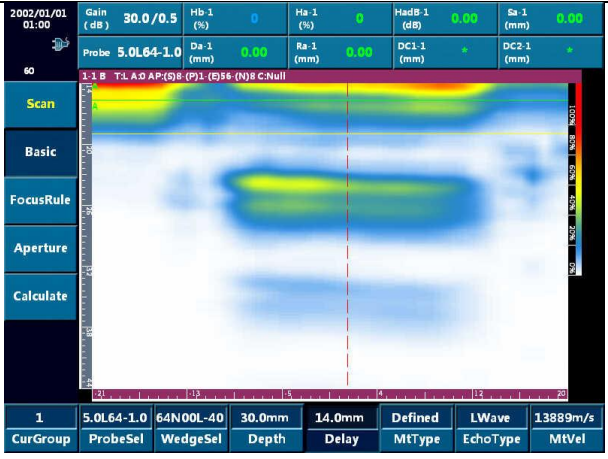
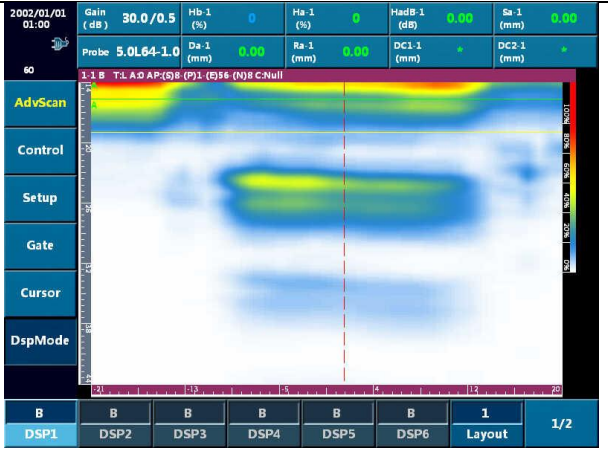
1.6	-> "set calibration interval", e colocar o tamanho da pista	
1.7	Seguir procedimento indicado na máquina	
2 Calibração do PAUT		
2.1	Menu principal -> Setup -> Default, para fazer reset à máquina	
2.2	Menu principal -> Basic Configurar equipamento	
2.2.1	Inserir velocidades transmissão/recessão de sinal	


2.2.2	Alterar valores de voltagem	
2.3	Menu principal -> Scan	
2.3.1	Selecionar calço	
2.3.2	Selecionar sonda	
2.3.3	Recalcular imagem "Calculate"	


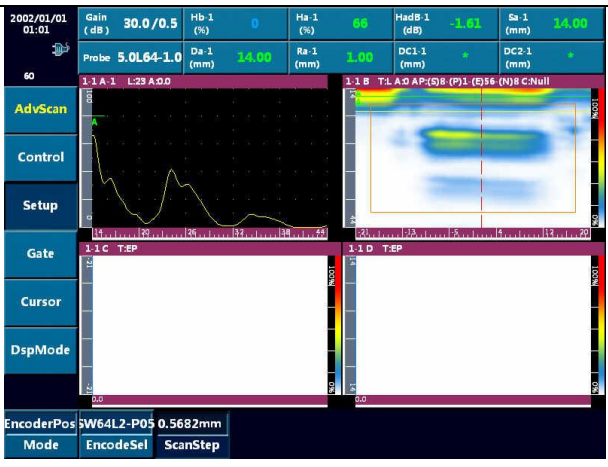

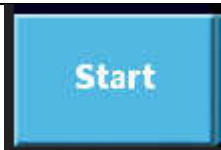
2.3.4	Ajustar regra focal em "Focus Rule"	 <p>2002/01/01 02:10 Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 0 HdB-1 (dB) 0.00 Sa-1 (mm) 0.00 Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 0.00 Ra-1 (mm) 0.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) * 1-1 B T1.A0 AP(D1)-(P1)-(D64)-(N)16 CNull Scan Basic FocusRule Aperture Calculate L Scan Type StartAng EndAng AngSpace Focus 0° 0° 1.0° 10mm</p>
2.3.5	Ajustar a profundidade de inspeção para o mínimo	 <p>2002/01/01 02:18 Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 0 HdB-1 (dB) 0.00 Sa-1 (mm) 0.00 Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 0.00 Ra-1 (mm) 0.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) * 1-1 B T1.A0 AP(D1)-(P1)-(D64)-(N)16 CNull Scan Basic FocusRule Aperture Calculate CurGroup ProbeSel WedgeSel Depth Delay MTType EchoType MTVel 1 5.0L64-1.0 64N00L-40 30.0mm 0mm Defined LWave 5920m/s</p>
2.3.6	Recalcular imagem	
2.4	-> Aperture Configurar a matriz sonda	 <p>2002/01/01 02:11 Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 0 HdB-1 (dB) 0.00 Sa-1 (mm) 0.00 Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 0.00 Ra-1 (mm) 0.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) * 1-1 B T1.A0 AP(D1)-(P1)-(D64)-(N)16 CNull Scan Basic FocusRule Aperture Calculate 1 64 1 16 StartEle EndEle EleStep EleDiam</p>
2.4.1	Configurar o tamanho da abertura	 <p>2002/01/01 00:53 Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 0 HdB-1 (dB) 0.00 Sa-1 (mm) 0.00 Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 0.00 Ra-1 (mm) 0.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) * 1-1 B T1.A0 AP(D1)-(P1)-(D64)-(N)16 CNull Scan Basic FocusRule Aperture Calculate 1 64 1 8 StartEle EndEle EleStep EleDiam</p>

2.4.2	Especificar o tamanho da matriz a utilizar	
2.4.3	Recalcular imagem	
2.5	Menu principal -> calibrate velocity Calibrar a velocidade do som/Ampliar a espessura de medição	
2.5.1	Obter uma leitura com o 1º e 2º ecos de fundo visíveis	
2.5.2	Inserir valor da espessura em reflight 1	

2.5.3	Inserir o dobro desse valor em refpoint 2	
2.5.4	Ajustar AScanLine para o meio da secção transversal	
2.5.5	Modo de medição para depth	
2.5.6	Seguir com o procedimento de calibração: - 1º eco de fundo = refpoint1 - 2º eco de fundo = refpoint 2	
2.5.7	No fim, carregar FINISH	
2.6	Menu principal -> Scan Ajustes finais	

2.6.1	Reajustar regra focal "Focus Rule"	
2.6.2	Recalcular imagem	
2.6.3	Ajustar Delay (para ajustar janela à borda superior do ecrã)	
3	Medições com encoder	
3.1	Ajustar display Menu principal -> Adv Scan	

<p>3.1.1</p>	<p>-> Displays (meter as janelas com o tipo de scan necessário [A+B+C+D maioritariamente])</p>	 <p>2002/01/01 01:01</p> <p>Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 67 HadB-1 (dB) -1.54 Sa-1 (mm) 14.00</p> <p>Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 14.00 Ra-1 (mm) 1.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) *</p> <p>60</p> <p>1-1 A-1 L-23 A:0.0 1-1 B T:L A:0 AP:(S)8 (P)1 (E)56 (N)8 C:Null</p> <p>AdvScan Control Setup Gate 1-1 C T:T 1-1 D T:T Cursor DspMode</p> <p>A+B+C+D DSP1 B DSP2 DSP3 DSP4 DSP5 DSP6 1 Layout 1/2</p>
<p>3.1.2</p>	<p>-> Layout (alterar o layout das janelas)</p>	
<p>3.2</p>	<p>Setup do encoder Adv Scan -> Setup</p>	 <p>2002/01/01 01:01</p> <p>Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 66 HadB-1 (dB) -1.61 Sa-1 (mm) 14.00</p> <p>Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 14.00 Ra-1 (mm) 1.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) *</p> <p>60</p> <p>1-1 A-1 L-23 A:0.0 1-1 B T:L A:0 AP:(S)8 (P)1 (E)56 (N)8 C:Null</p> <p>AdvScan Control Setup Gate 1-1 C T:T 1-1 D T:T Cursor DspMode</p> <p>TimeBase Default 40ms Mode EncodeSel ScanStep</p>
<p>3.2.1</p>	<p>Selecionar encoder</p>	 <p>2002/01/01 01:01</p> <p>Gain (dB) 30.0/0.5 Hb-1 (%) 0 Ha-1 (%) 66 HadB-1 (dB) -1.61 Sa-1 (mm) 14.00</p> <p>Probe 5.0L64-1.0 Da-1 (mm) 14.00 Ra-1 (mm) 1.00 DC1-1 (mm) * DC2-1 (mm) *</p> <p>60</p> <p>1-1 A-1 L-23 A:0.0 1-1 B T:L A:0 AP:(S)8 (P)1 (E)56 (N)8 C:Null</p> <p>AdvScan Control Setup Gate 1-1 C T:EP 1-1 D T:EP Cursor DspMode</p> <p>EncoderPos W64L2-P05 0.5682mm Mode EncodeSel ScanStep</p>

3.2.2	Selecionar período de amostragem para o mínimo	
3.2.3	Alterar o modo de funcionamento para posição	
3.3	Fazer leitura c/ encoder Adv Scan -> Control	
3.3.1	Verificar que a sonda está decentemente acoplada e alinhada no provete	
3.3.2	Start	
3.3.3	Deslocar a sonda até ao fim da área de teste	
3.3.4	End	

Apêndice III

Ensaio de Delaminação

Neste anexo encontram-se todas as imagens retiradas presentes na ferramenta de análise da fase experimental de delaminação. Isto permite ao leitor uma consulta, dos dados discutidos no documento, de uma forma mais acessível.

Este apêndice encontra-se dividido em 4 partes:

- Ensaio preliminar;
- Ensaio de matriz;
- Ensaio de teste de abertura e escolha de parâmetros finais;
- Ensaio em componente real.

Para além disto, é possível observar o enquadramento cronológico dos ensaios e de algumas observações feitas aos mesmos.

1ª parte de ensaios – Testes preliminares.

Testes preliminares – Matriz de ensaios 64 elementos

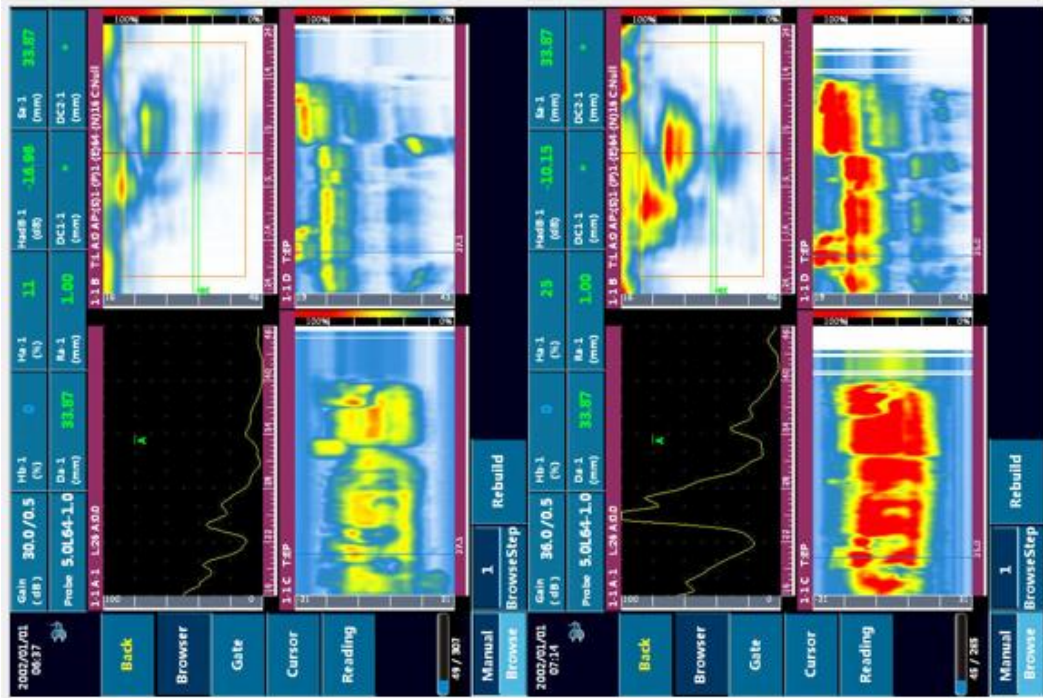
64 elementos	5MHz	10MHz
24db	DEL-64-5-8	DEL-64-10-24
30db	DEL-64-5-14	DEL-64-10-30
36db	DEL-64-20	DEL-64-10-36

Testes preliminares – Matriz de ensaios 58 elementos

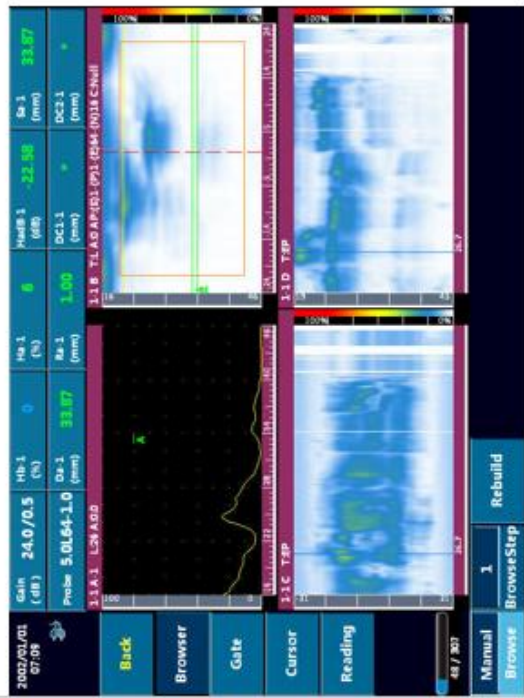
48 elementos	5MHz	10MHz
24db	DEL-48-5-8	DEL-48-10-24
30db	DEL-48-5-14	DEL-48-10-30
36db	DEL-48-5-20	DEL-48-10-36

Leituras iniciais DEL64_10MHZ_#1

30db



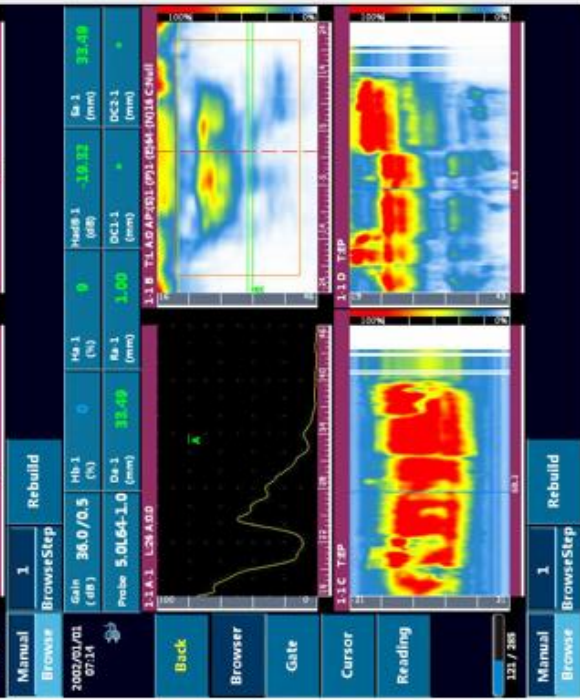
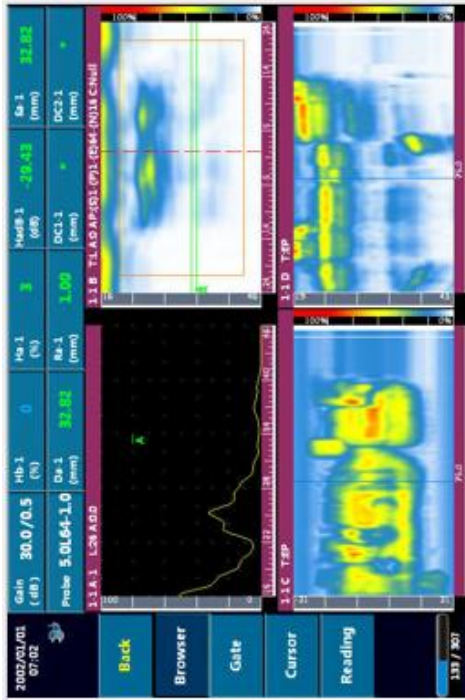
36db



24db

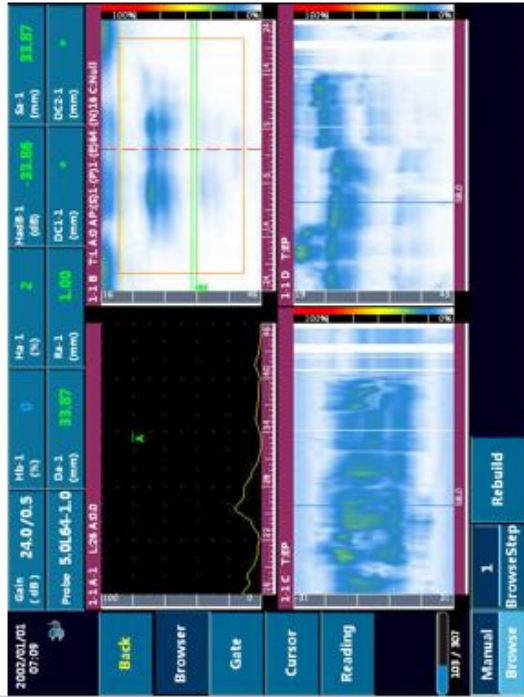
Leituras iniciais DEL64_10MHZ_#2

30db



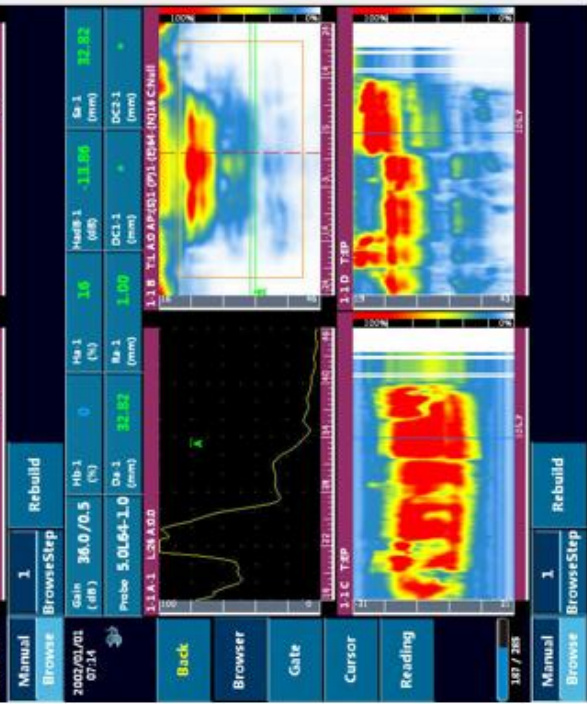
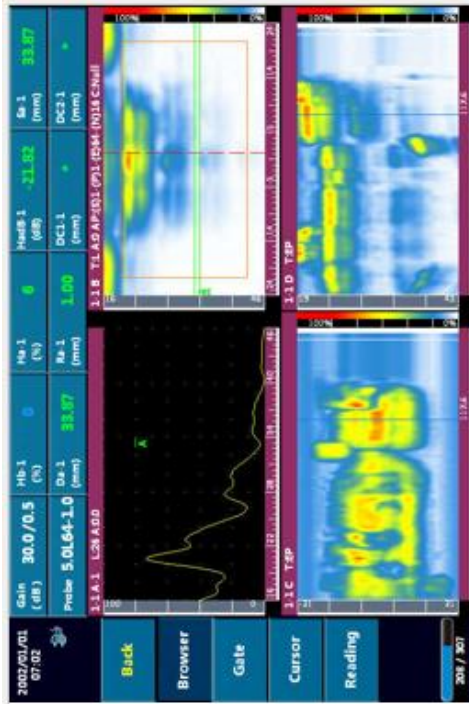
36db

24db



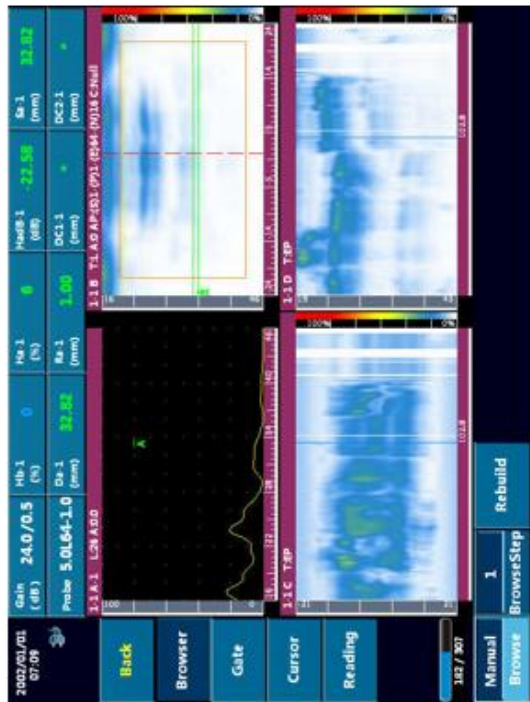
Leituras iniciais DEL64_10MHZ_#3

30db



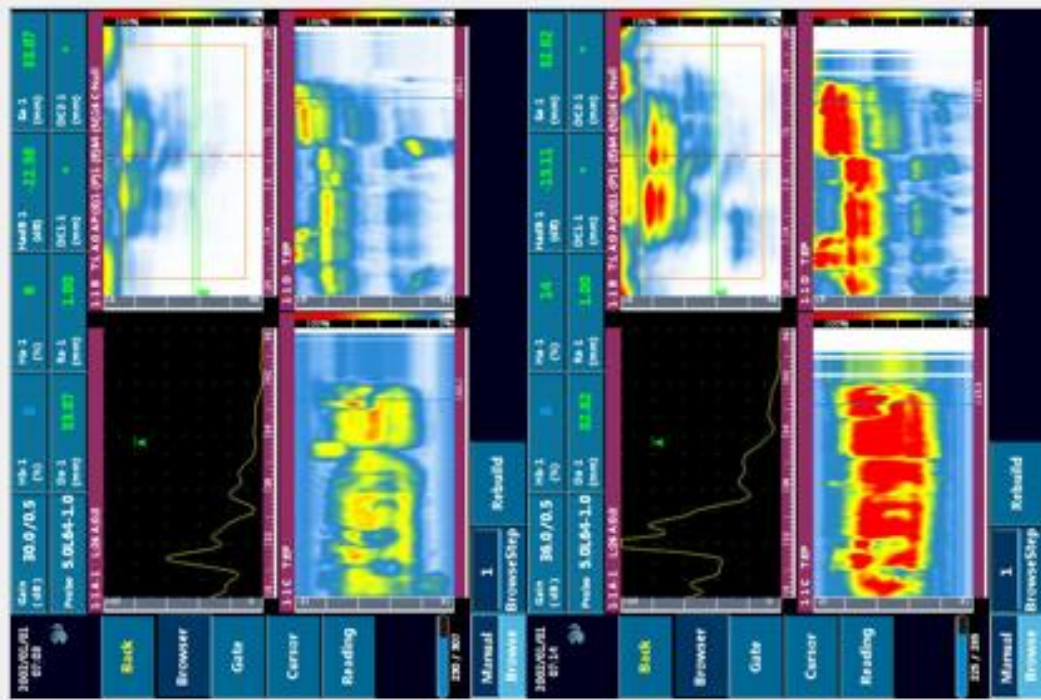
36db

24db

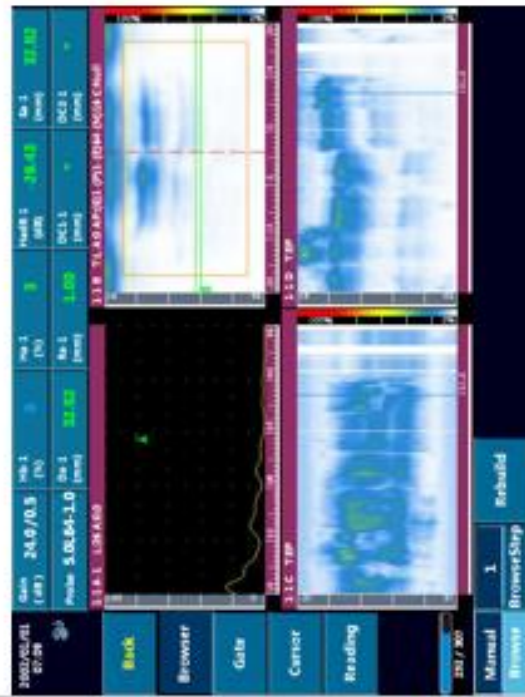


Leituras iniciais DEL64_10MHZ_#4

30db



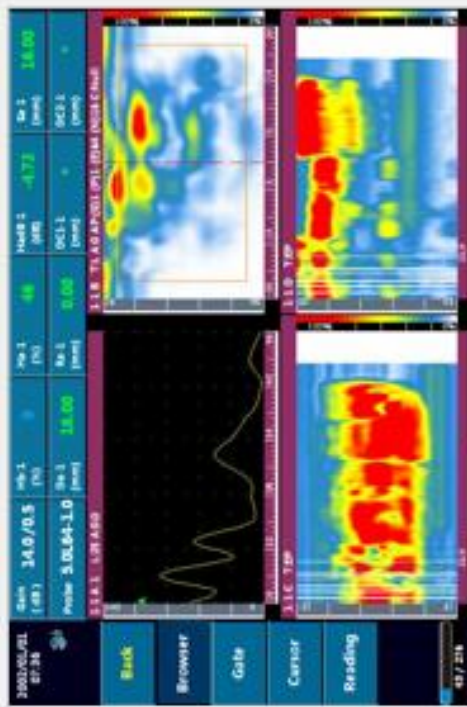
36db



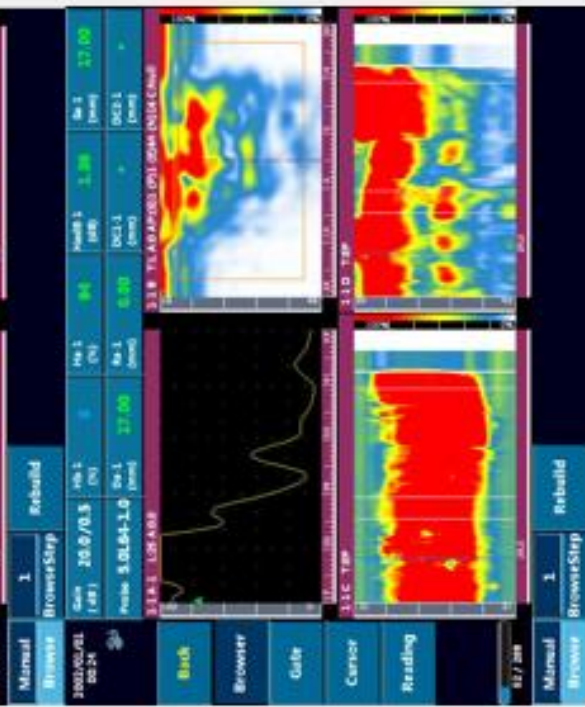
24db

Leituras iniciais DEL64_5MHz_#1

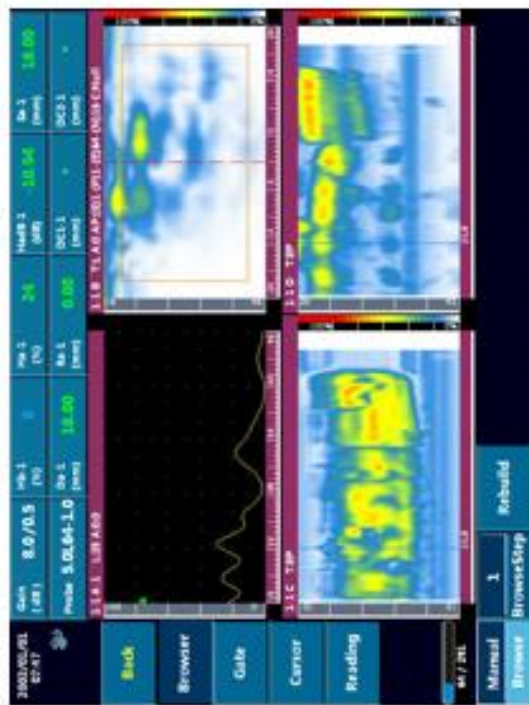
14db



20db

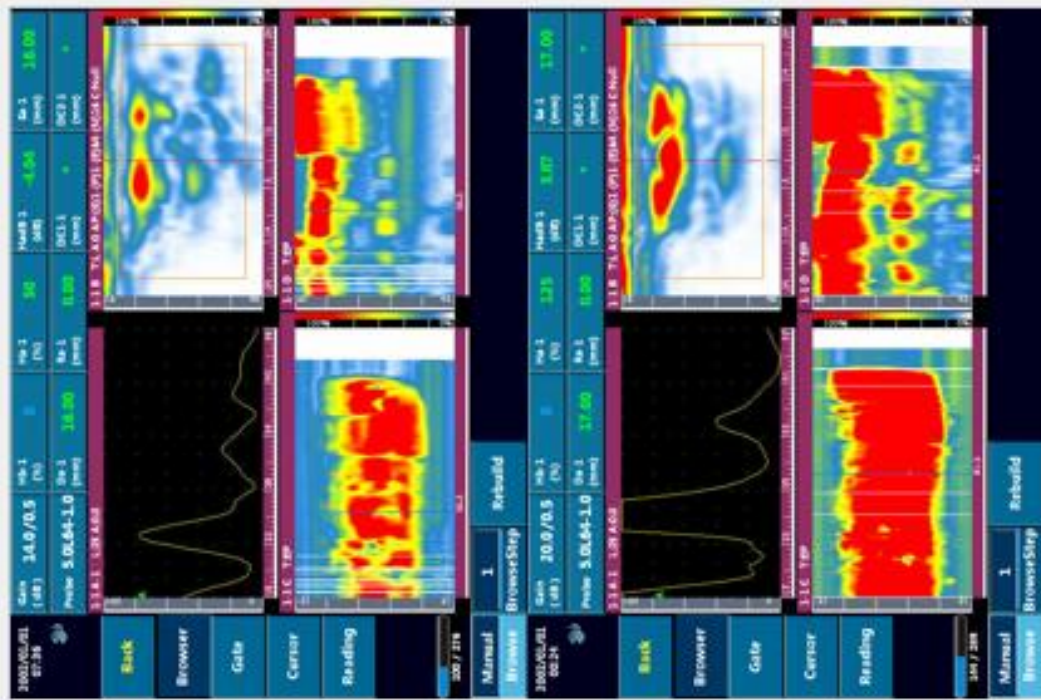


8db

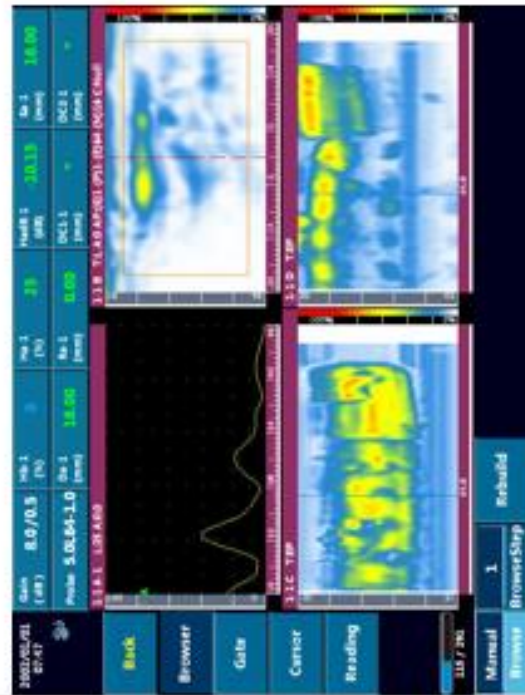


Leituras iniciais DEL64_5MHZ_#2

14db



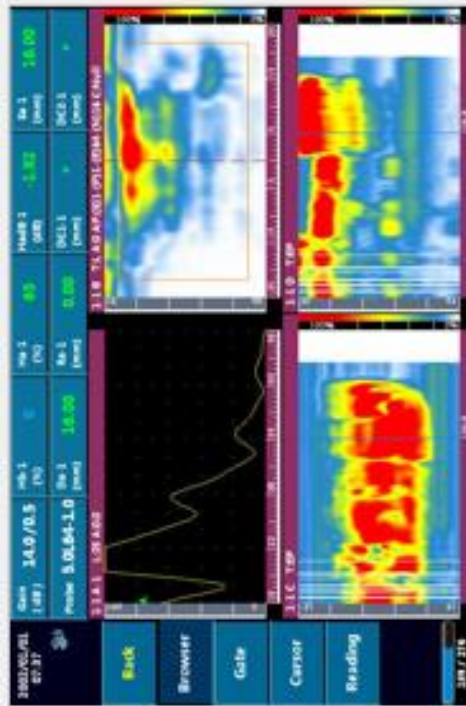
20db



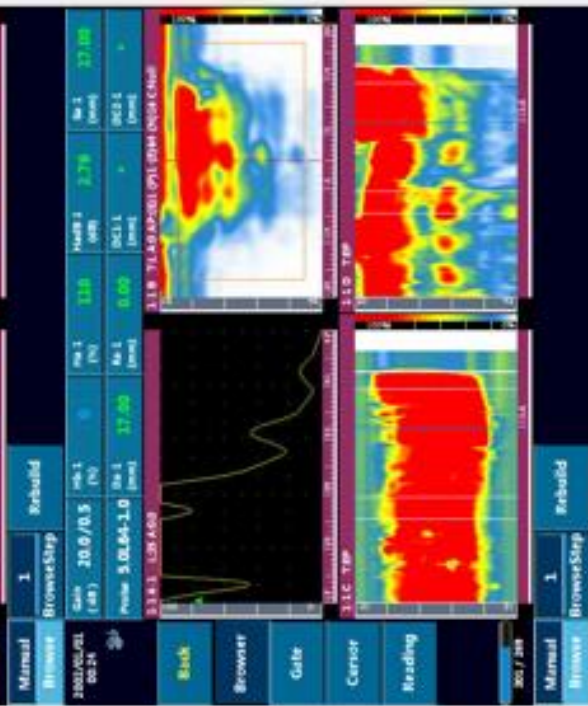
8db

Leituras iniciais DEL64_5MHz_#3

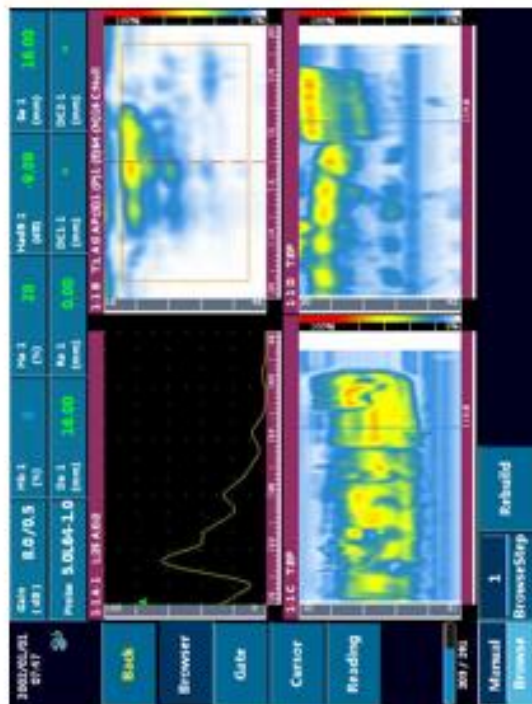
14db



20db

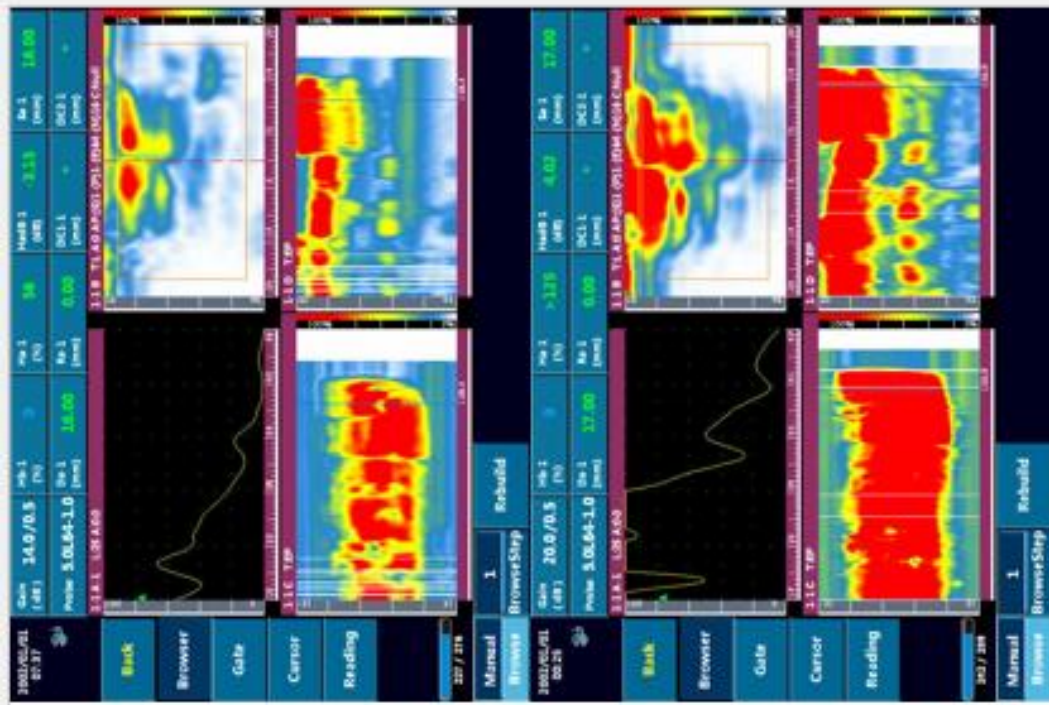


8db

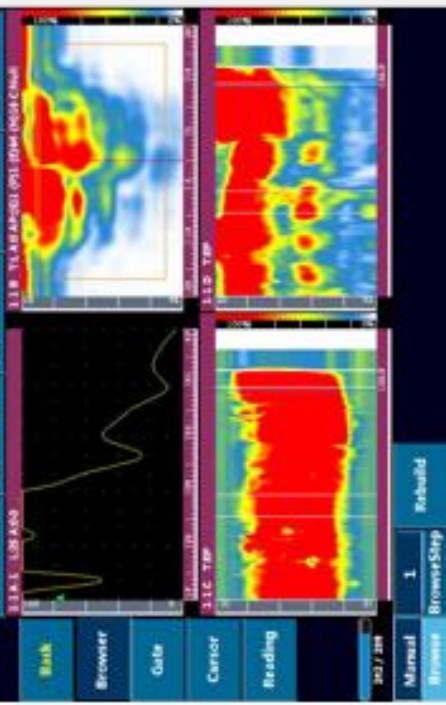


Leituras iniciais DEL64_5MHz_#4

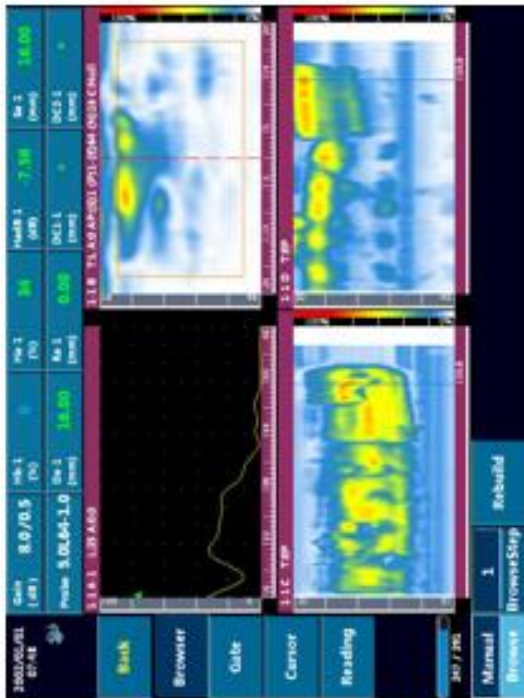
14db



20db

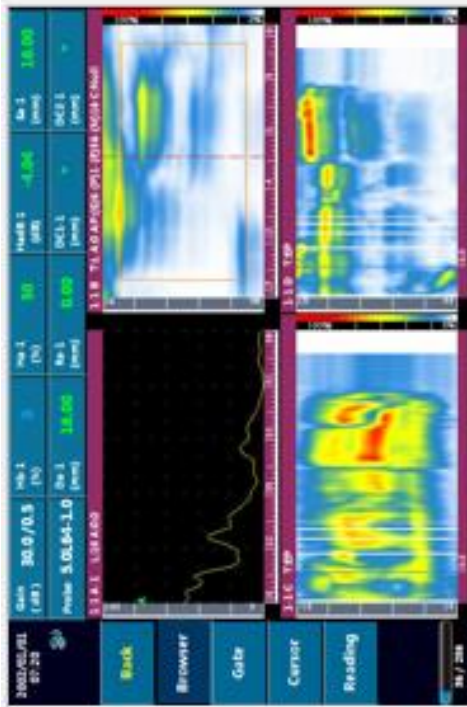


8db

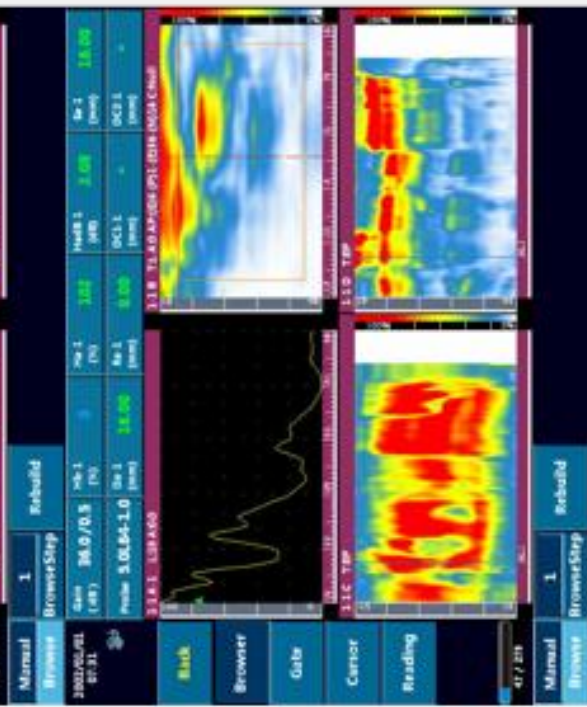


Leituras iniciais DEL48_10MHz_#1

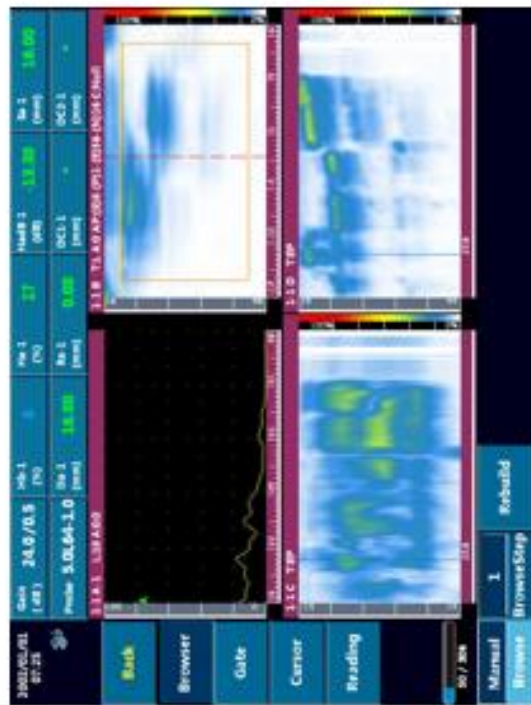
30db



36db

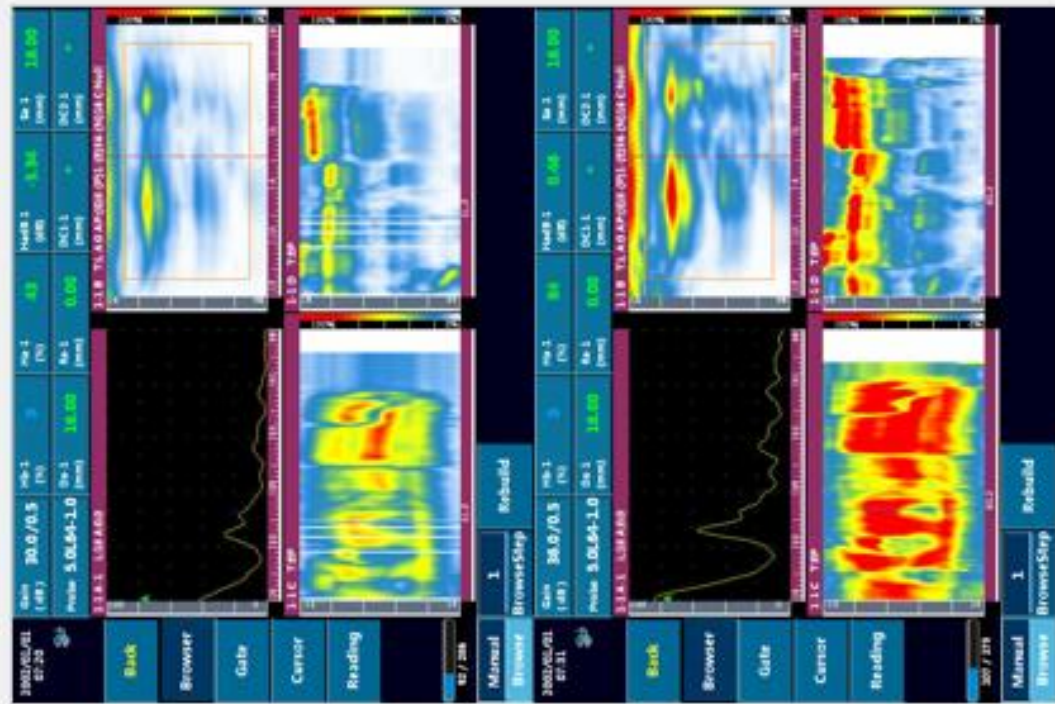


24db

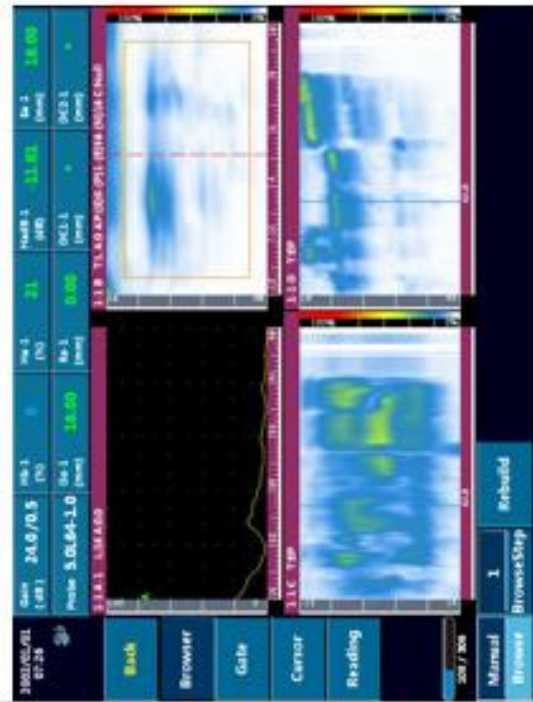


Leituras iniciais DEL48_10MHZ_#2

30db



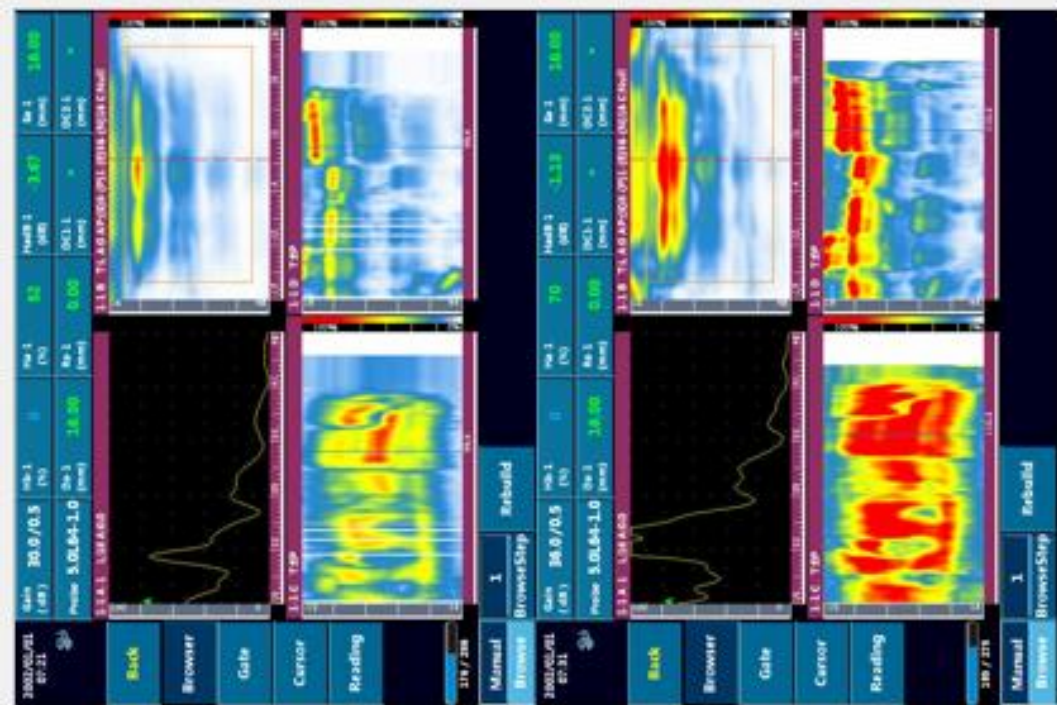
36db



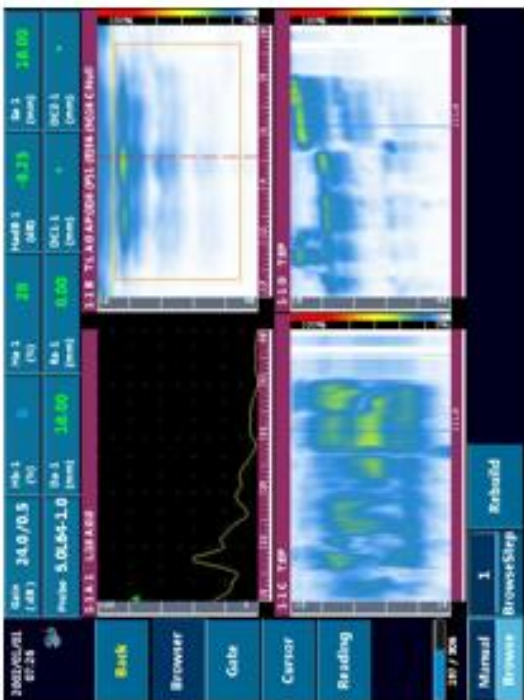
24db

Leituras iniciais DEL48_10MHZ_#3

30db



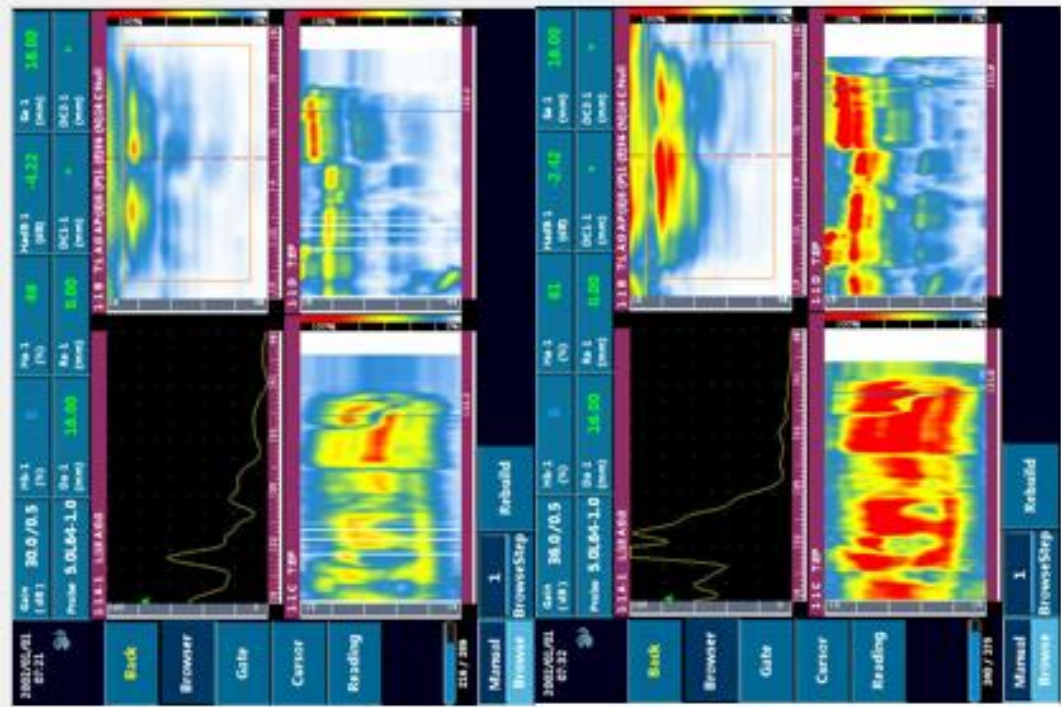
36db



24db

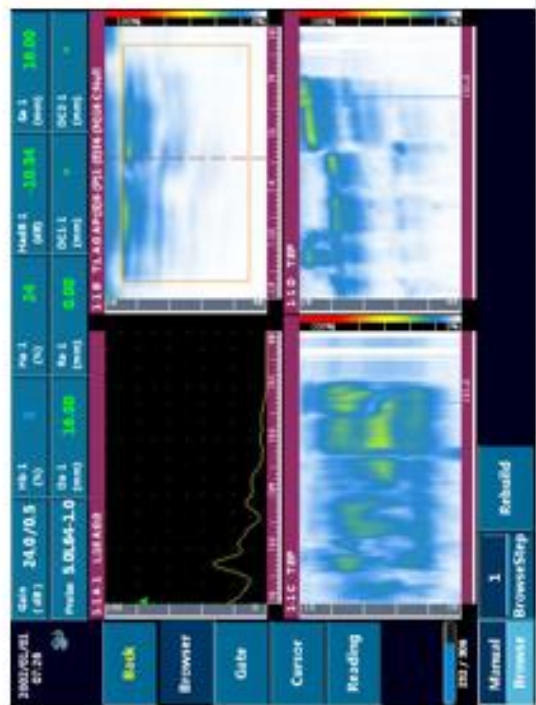
Leituras iniciais DEL48_10MHz_#4

30db



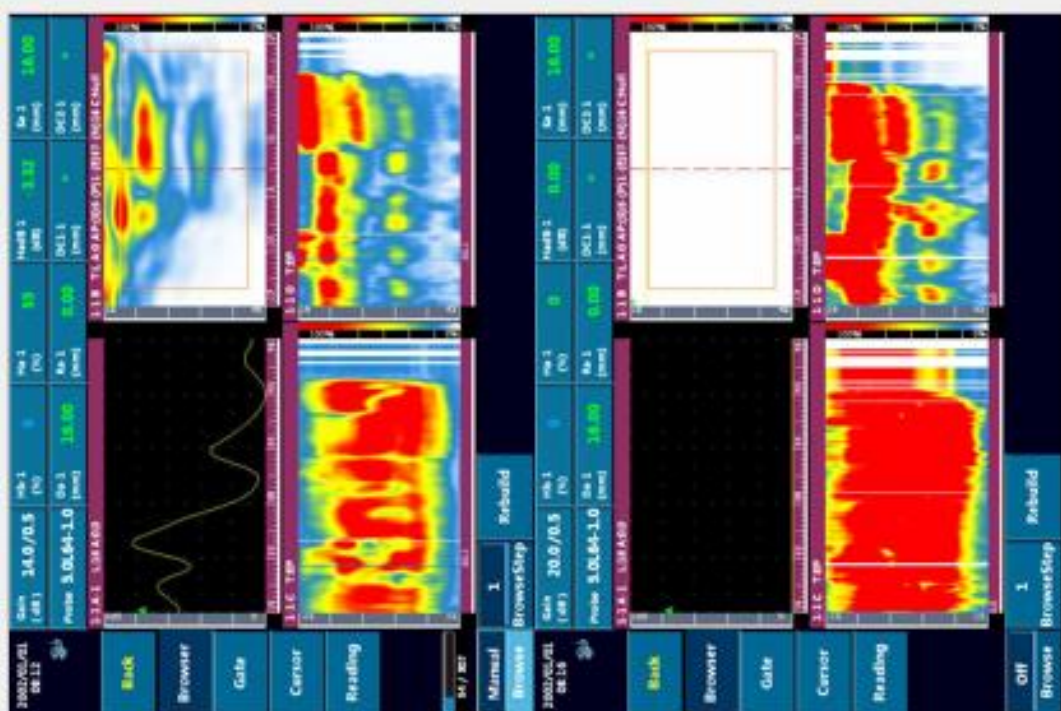
36db

24db

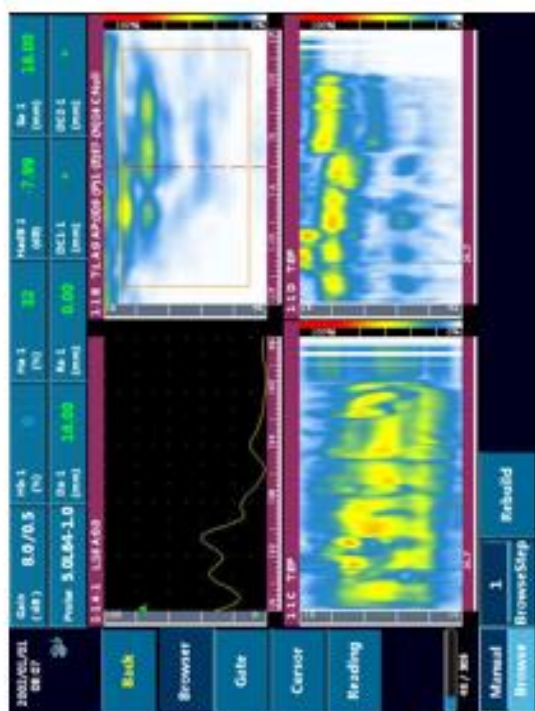


Leituras iniciais DEL48_5MHz_#1

14db



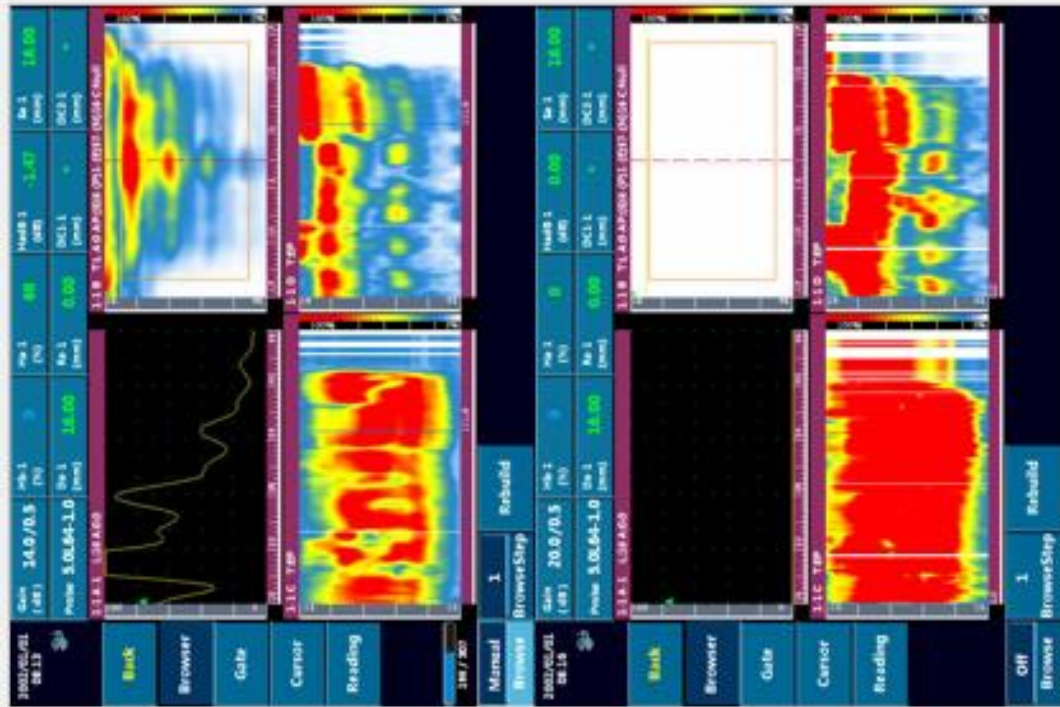
20db



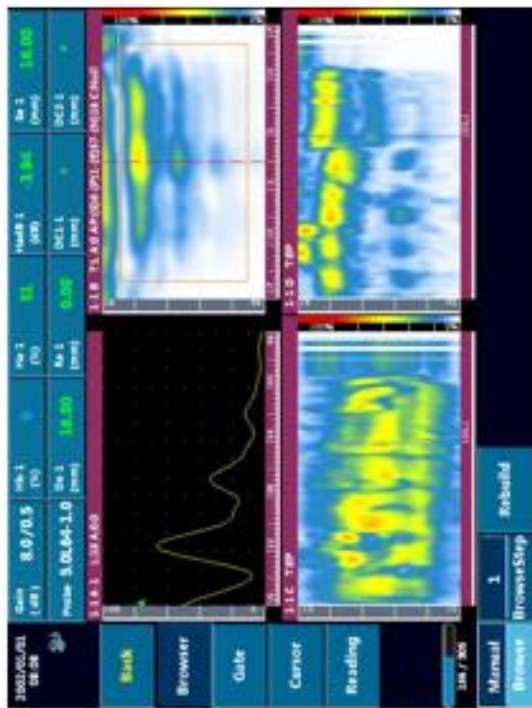
8db

Leituras iniciais DEL48_5MHz_#3

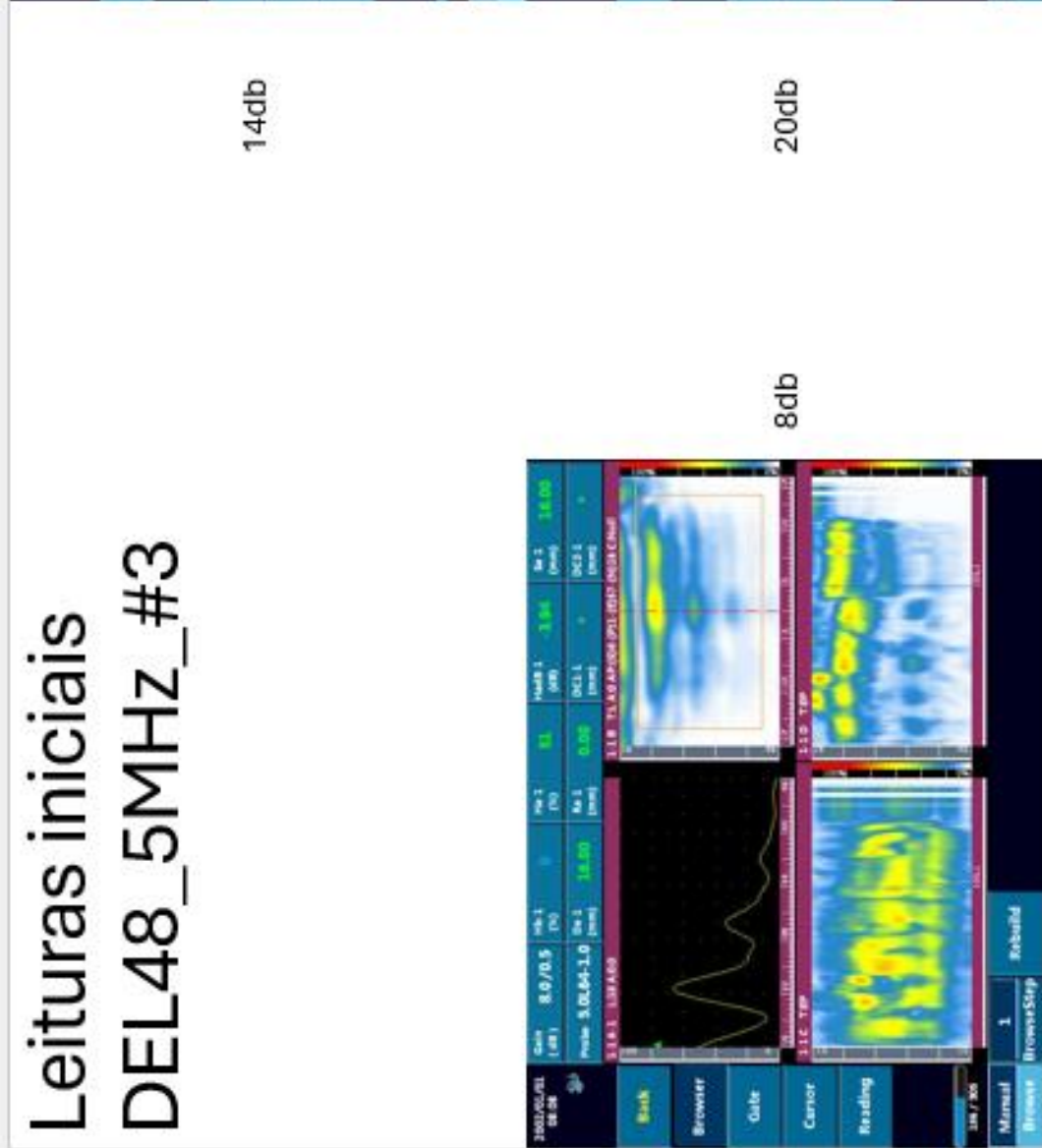
14db



8db

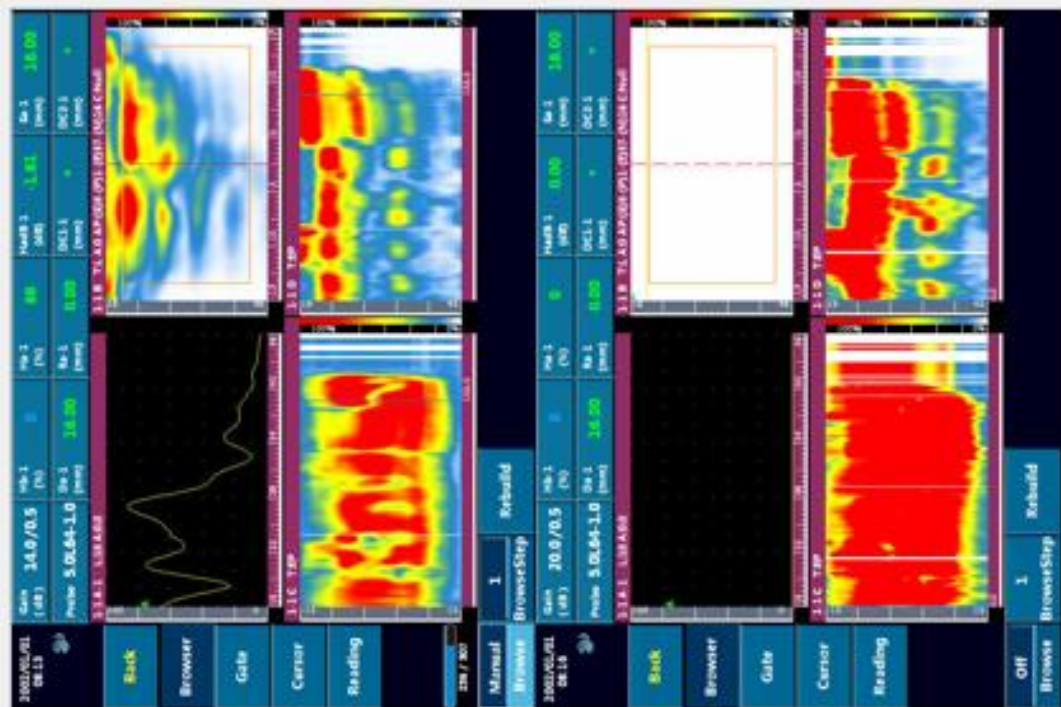


20db



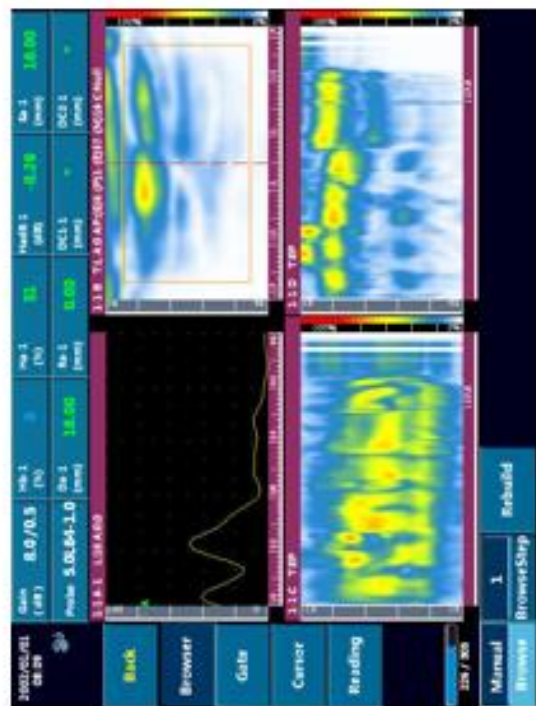
Leituras iniciais DEL48_5MHz_#4

14db



20db

8db



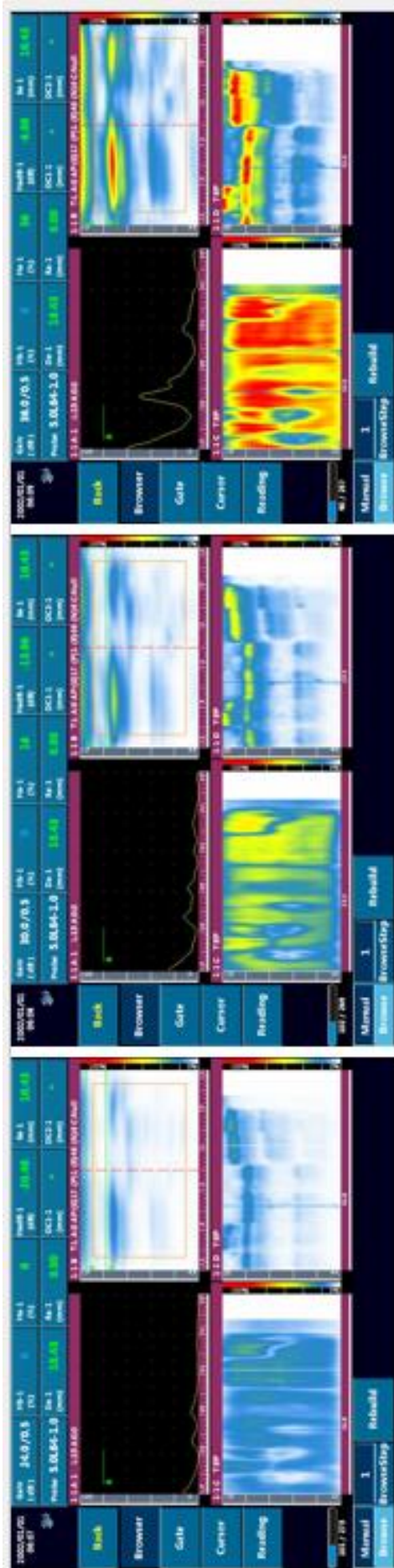
Testes matriz – Matriz de ensaios 48 e 32 elementos

10MHz	32 elementos	48 elementos
24db	DEL8-32-10-24	DEL8-48-10-24
30db	DEL8-32-10-30	DEL8-48-10-30
36db	DEL8-32-10-36	DEL8-48-10-36

Comparação matriz 32 e 48
Abertura de 8
Ganho de 24, 30 e 36

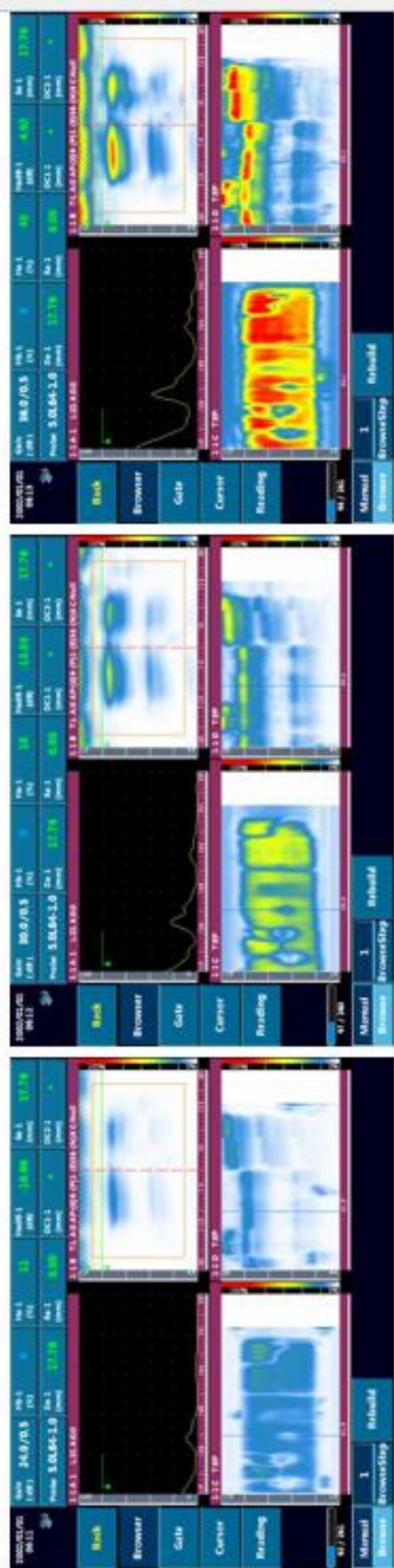
Defeitos 1 – 2 – 3 – 4

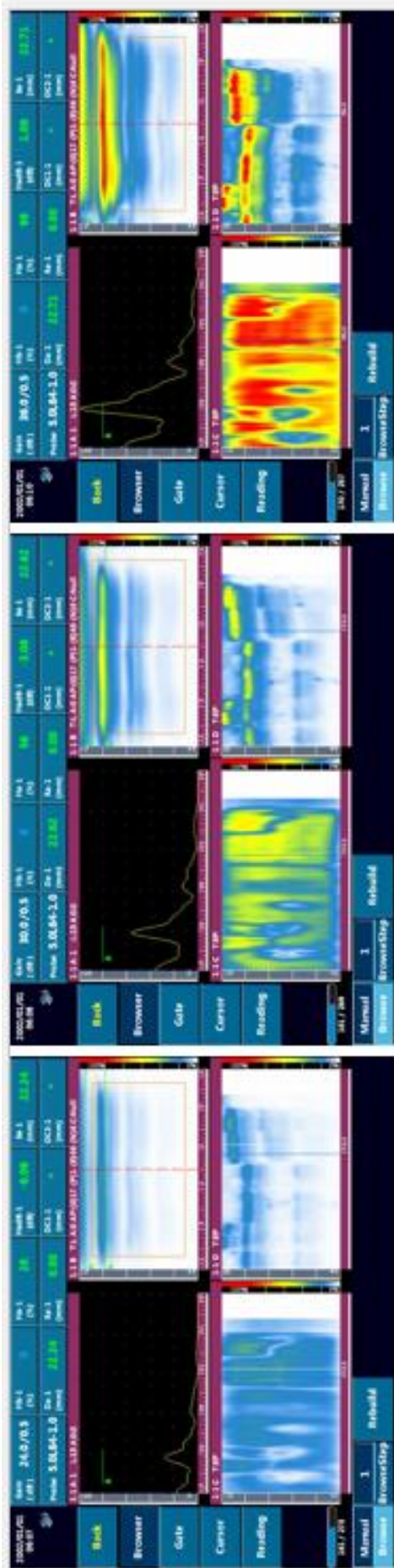
As quatro páginas seguintes, têm as leituras dos defeitos 1, 2, 3 e 4 respetivamente.



Matrix 32
Matrix 48

36



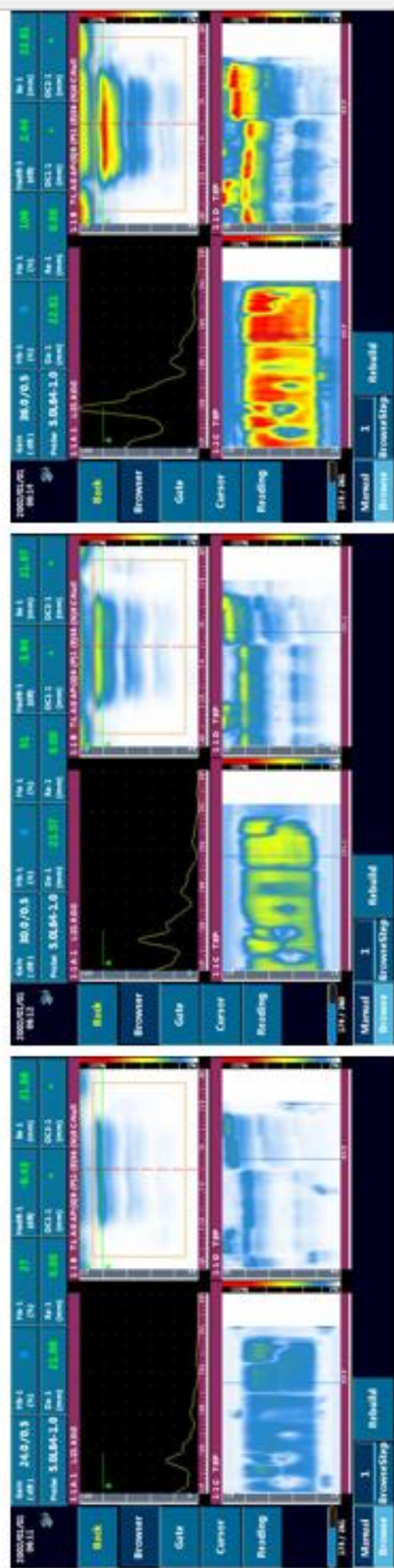


Matrix 32
Matrix 48

24

30

36

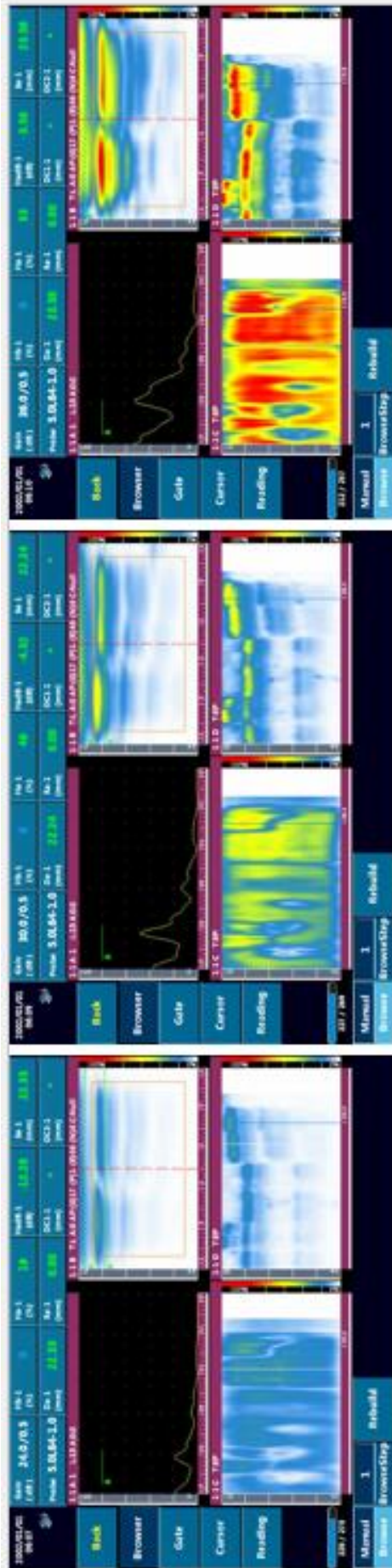


Matrix 32
Matrix 48

24

30

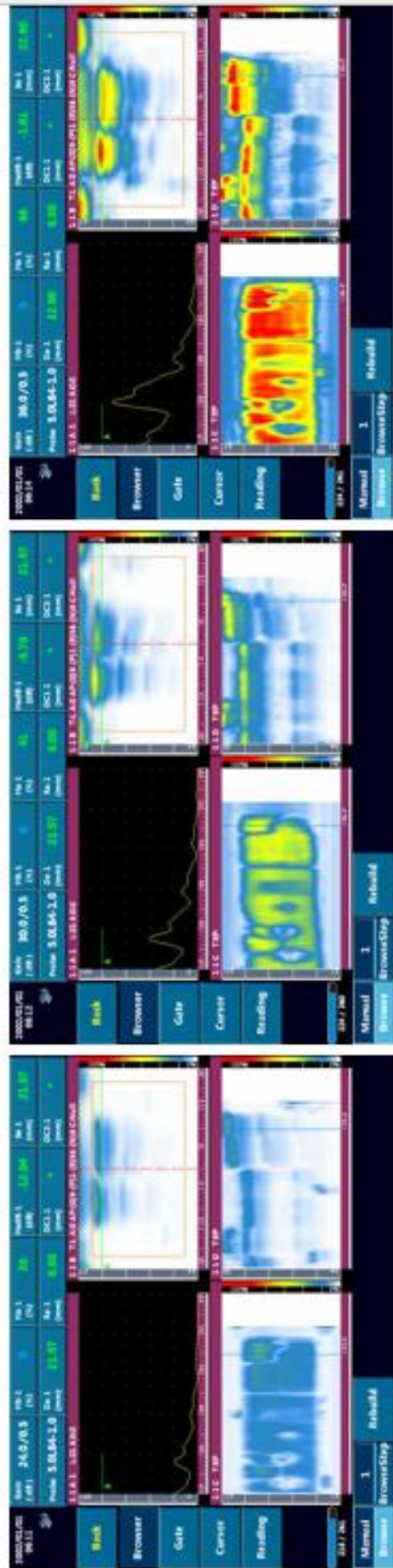
36



Matrix 32
Matrix 48

30

36



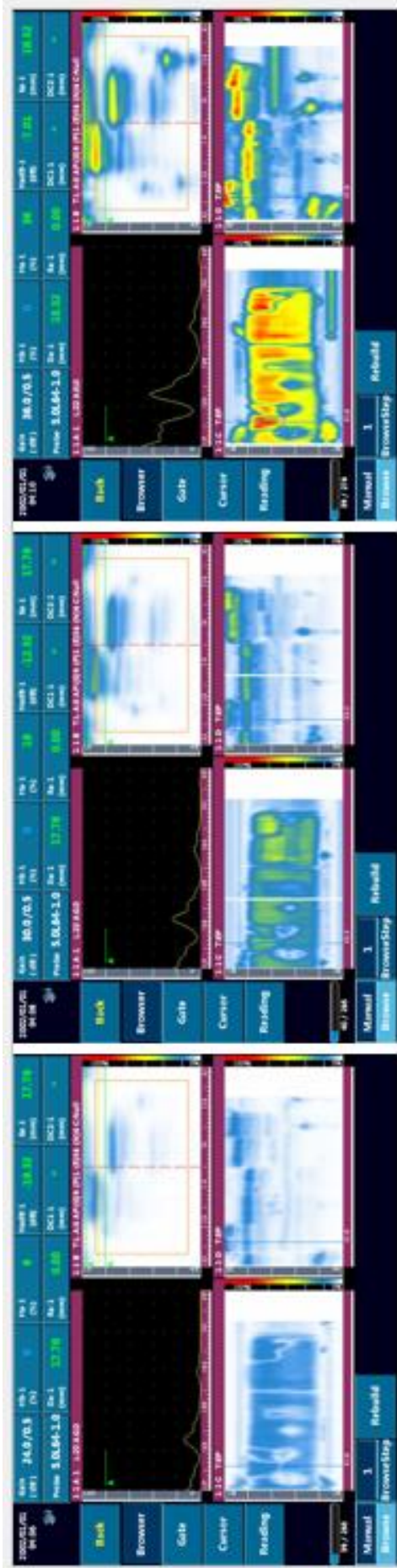
Janela de estudo da Abertura– Matriz de 48 elementos

10MHz	G.E. 6 elementos	G.E. 10 elementos
24db	DELP-48-10-24-6	DELP-48-10-24-10
30db	DELP-48-10-30-6	DELP-48-10-30-10
36db	DELP-48-10-36-6	DELP-48-10-36-10

Comparação de abertura de 6 e 10 matriz de 48 elementos Ganho de 24, 30 e 36

Defeitos 1 – 2 – 3 – 4

As quatro páginas seguintes, têm as leituras dos defeitos 1, 2, 3 e 4 respetivamente.

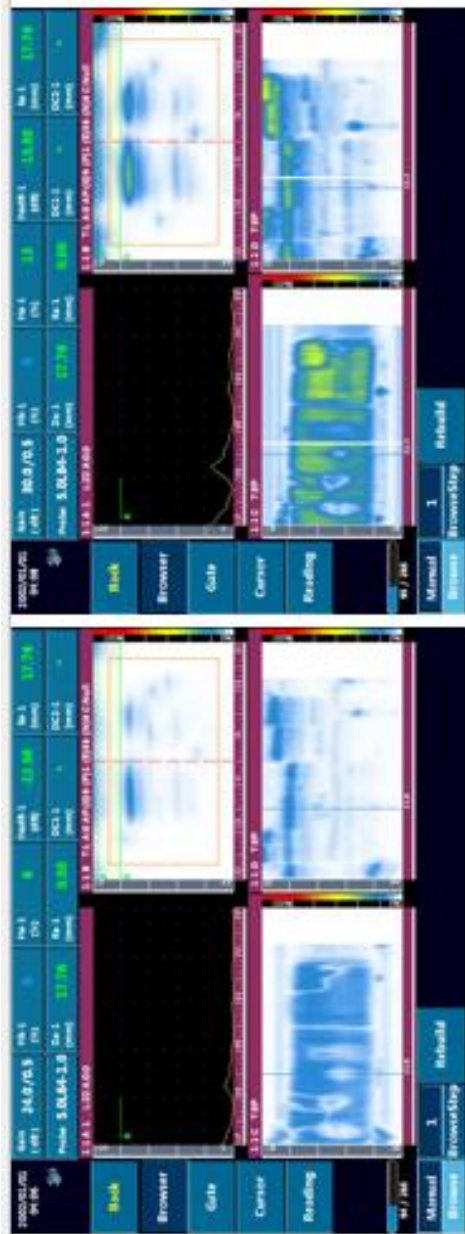


G.E. 6
G.E. 10

24

30

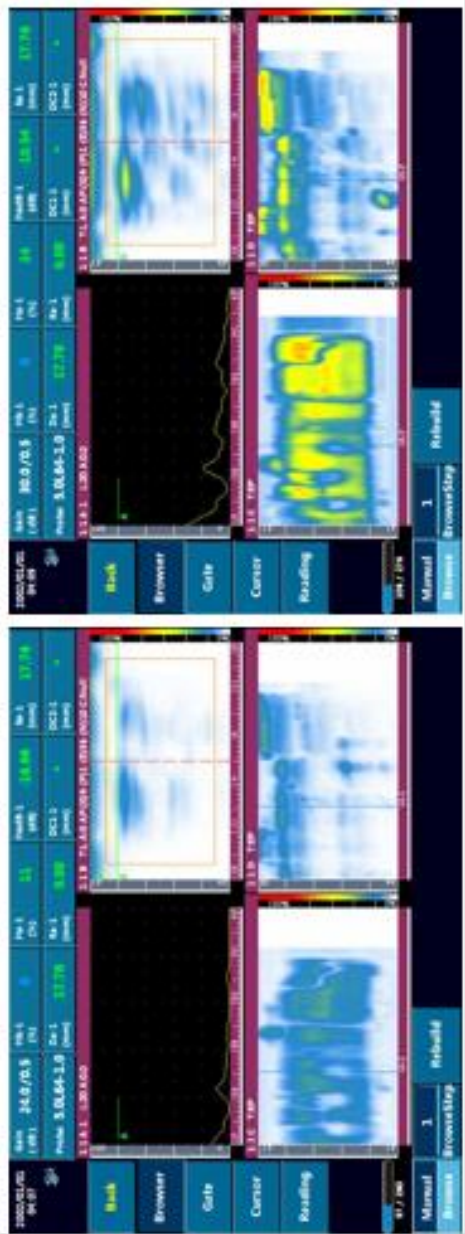
36



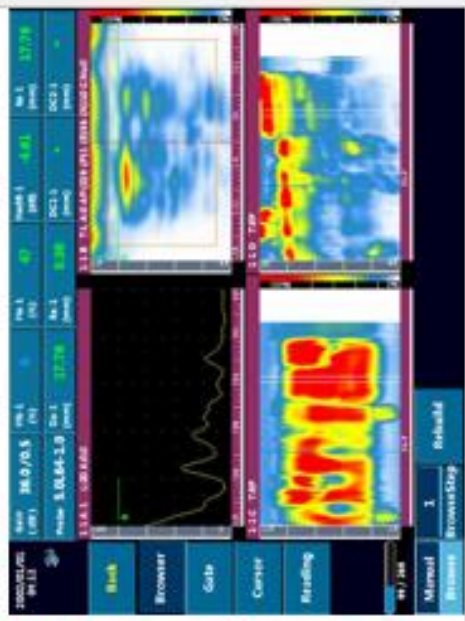
G.E. 6
G.E. 10

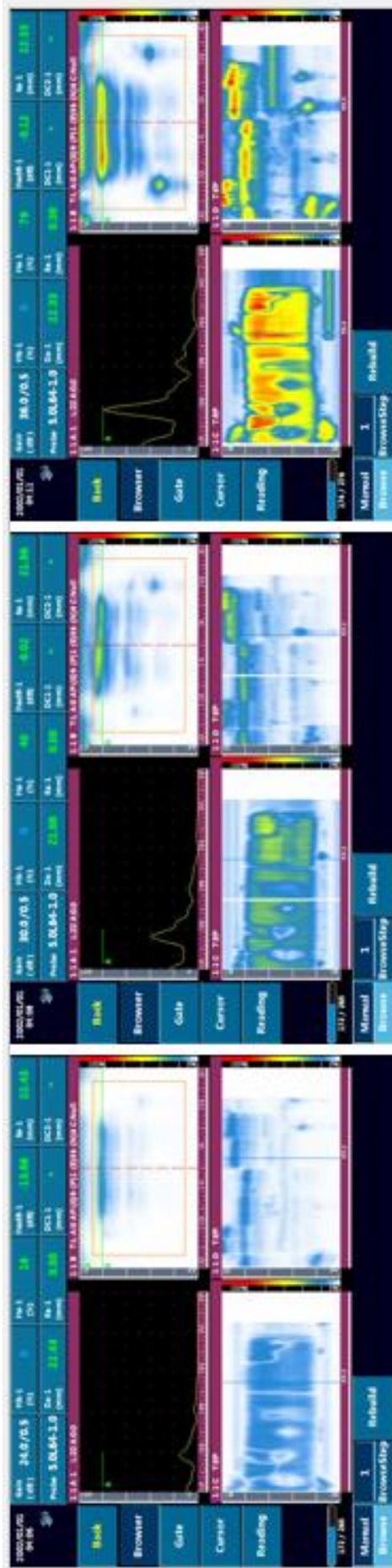
24

30



36



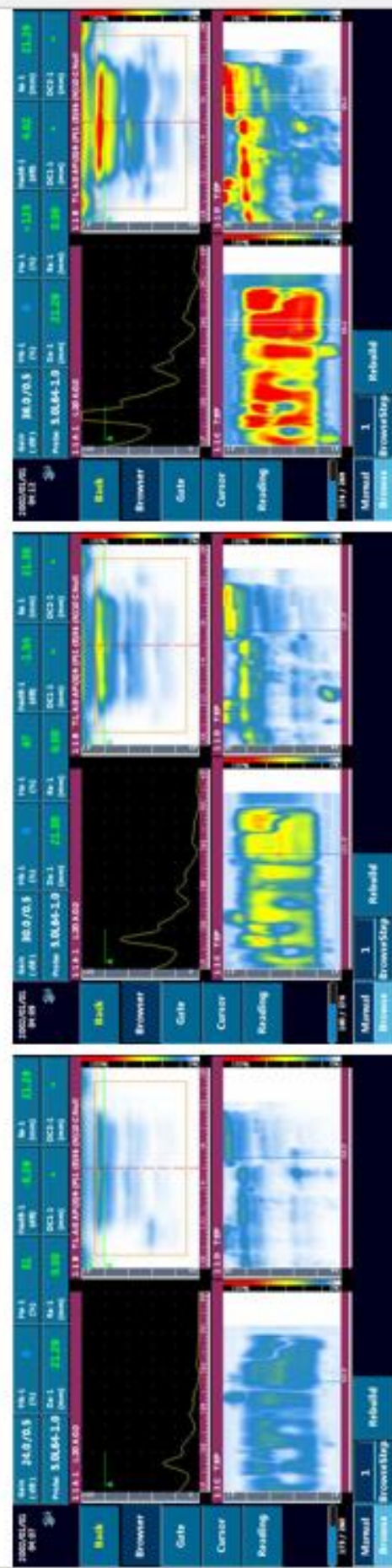


G.E. 6
G.E. 10

24

30

36

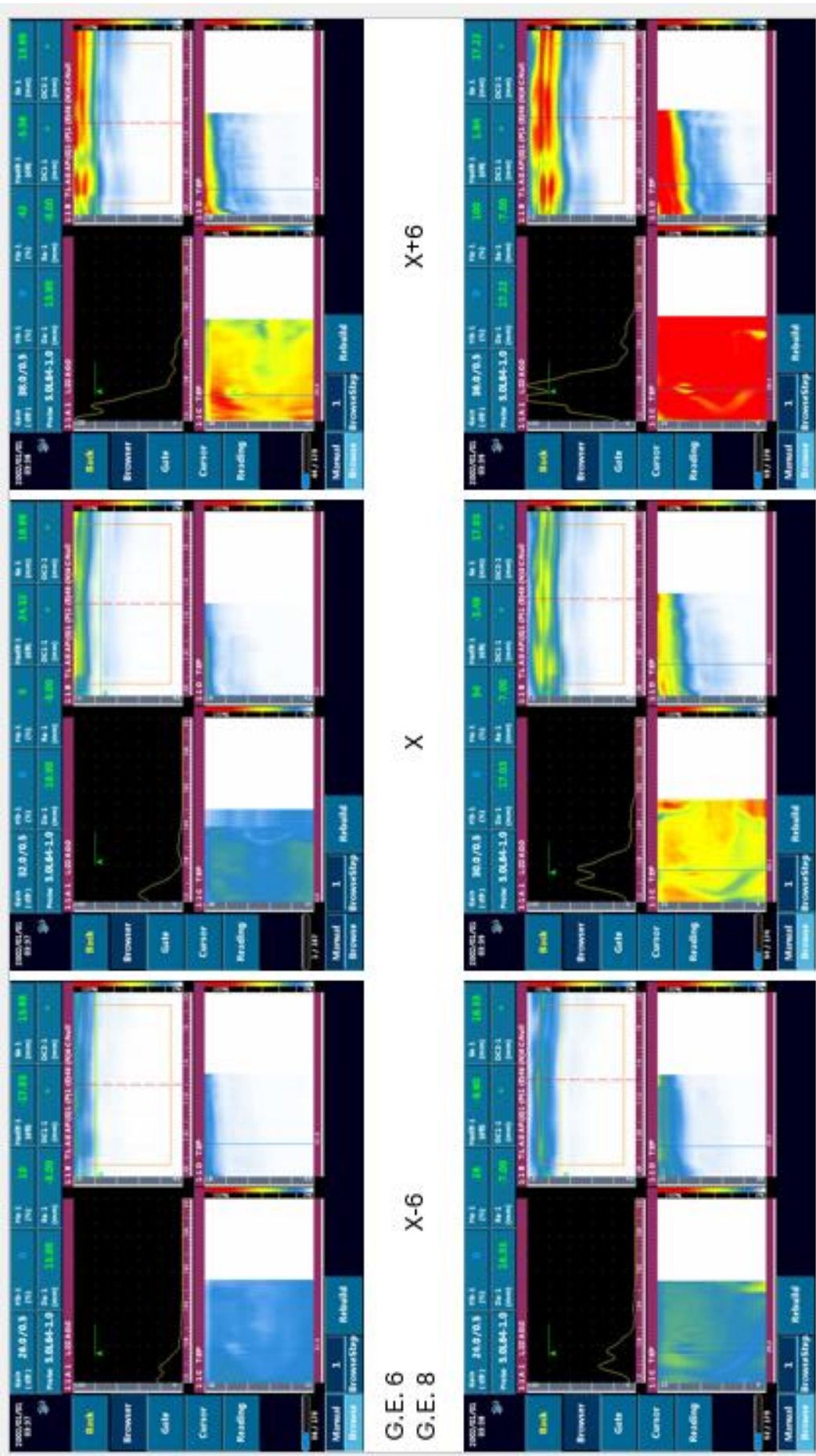


Ensaios em Componente real em fibra de vidro

10MHz	Abertura de 6 elementos	Abertura de 8 elementos
X-6db	DELF-6-26	DELF-8-24
<u>Xdb</u>	DELF-6-32	DELF-8-30
X+6db	DELF-6-38	DELF-8-36

Comparação de aberturas de 6 e 8
matriz de 48 elementos
Ganho adaptado com variação +/- 6db

As quatro páginas seguintes, têm as leituras dos defeitos 1, 2, 3 e 4 respetivamente.



Apêndice IV

Ensaaios de Furação

Neste anexo encontram-se todas imagens retiradas presentes na ferramenta de análise da fase experimental de Furação. Isto permite ao leitor uma consulta, dos dados discutidos no documento, de uma forma mais acessível.

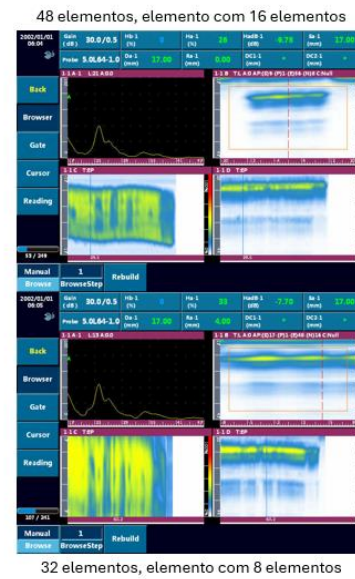
Este apêndice encontra-se dividido em 3 partes:

- Ensaaios preliminares (Matriz e abertura);
- Ensaaios de intervalo de matriz e abertura menos dispersos;
- Ensaaios de teste de abertura e escolha de parâmetros finais;

Para além disto, é possível observar o enquadramento cronológico dos ensaios e de algumas observações feitas aos mesmos.

Testes preliminares de calibração

- Tendo em conta a dimensão dos furos, vai utilizar-se uma matriz mais reduzida (<48 elementos);
- Efeitos da fita-cola usada para fixar o provete;
- Defeitos de pequenas dimensões
- A sonda perde sinal quando levada acima dos 5MHz;
- Equipamento com baixa definição;
- Dificuldade de medição a frequências mais baixas;
- Análise de local exige uma “ampliação” maior;



Testes preliminares – 10MHz

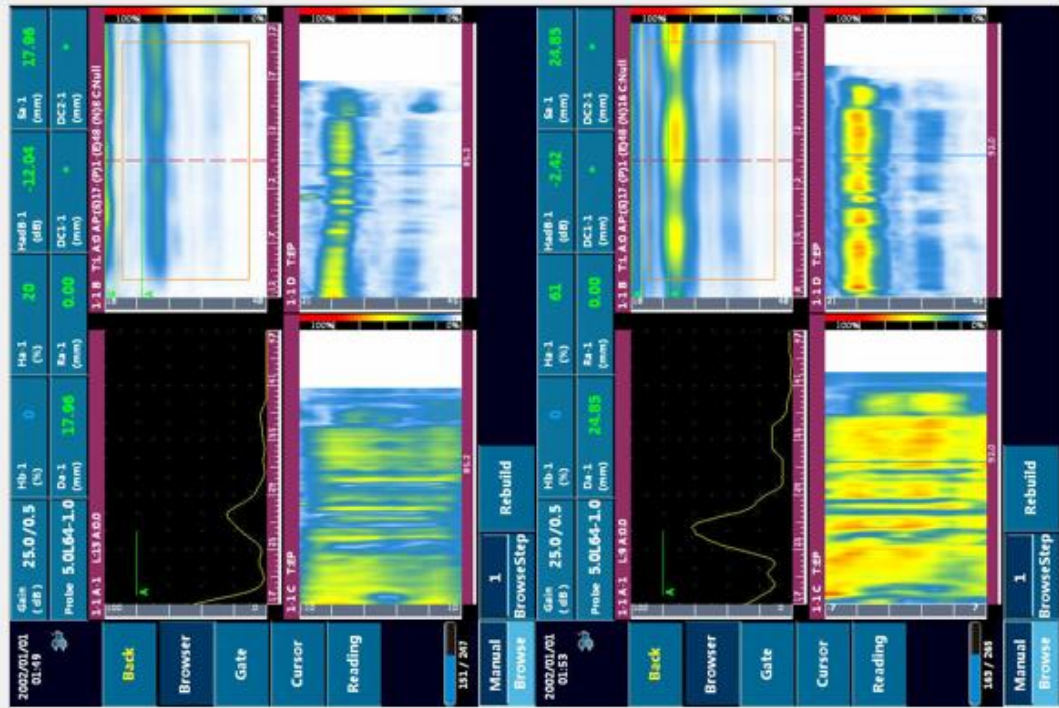
10MHz	Matriz 32	Matriz 40	Matriz 48
8 elementos	HOL-10-32-8	HOL-10-40-8	HOL-10-48-8
12 elementos	HOL-10-32-12	HOL-10-40-12	HOL-10-48-12
16 elementos	HOL-10-32-16	HOL-10-40-16	HOL-10-48-16

Testes preliminares – 8 MHz

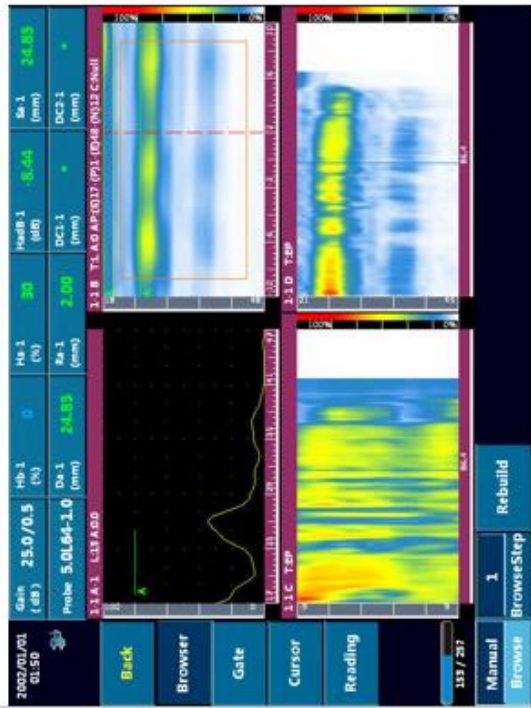
8MHz	Matriz 32	Matriz 40	Matriz 48
8 elementos	HOL-8-32-8	HOL-8-40-8	HOL-8-48-8
12 elementos	HOL-8-32-12	HOL-8-40-12	HOL-8-48-12
16 elementos	HOL-8-32-16	HOL-8-40-16	HOL-8-48-16

Leituras iniciais HOL-8MHZ- matriz32

8elm



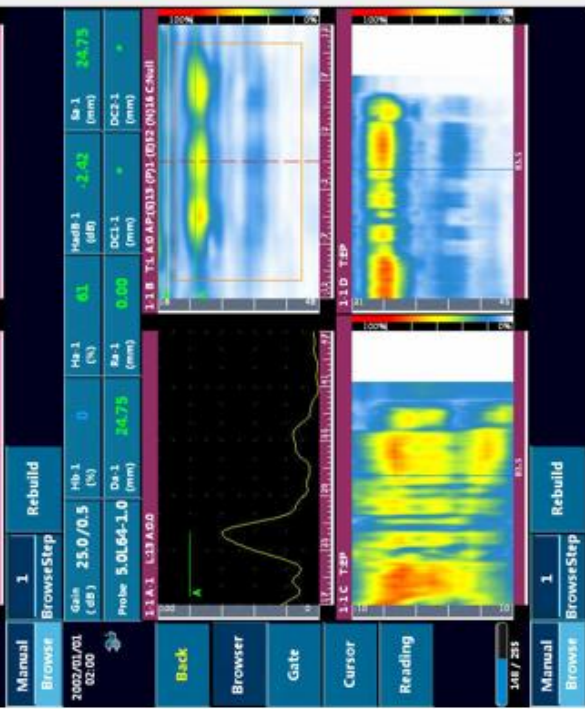
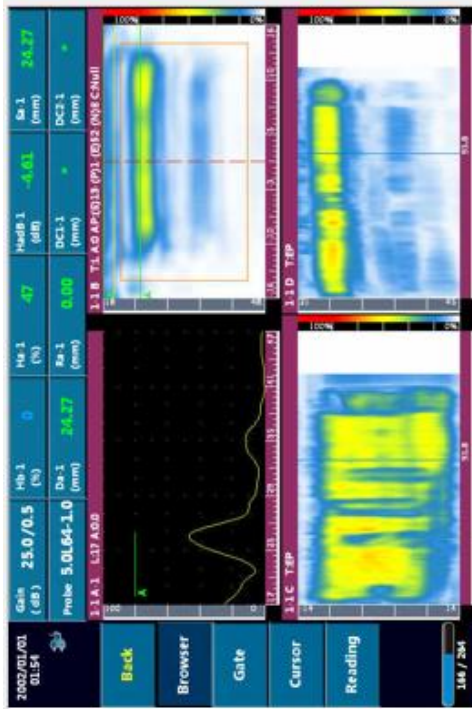
16elm



12elm

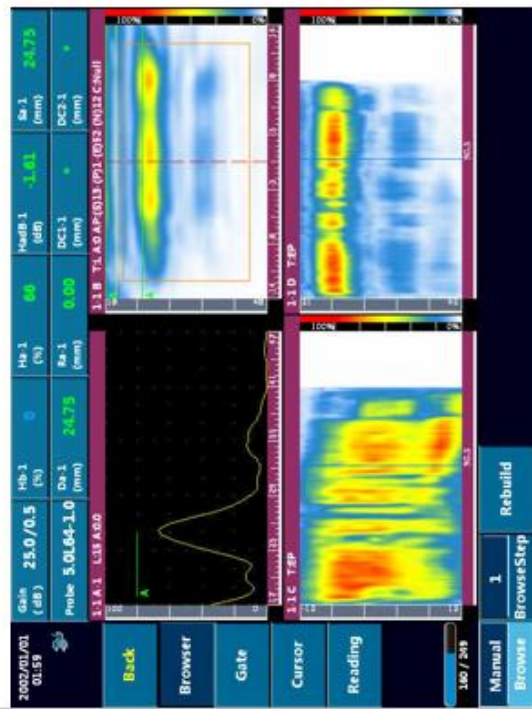
Leituras iniciais HOL-8MHz- matriz40

8elms



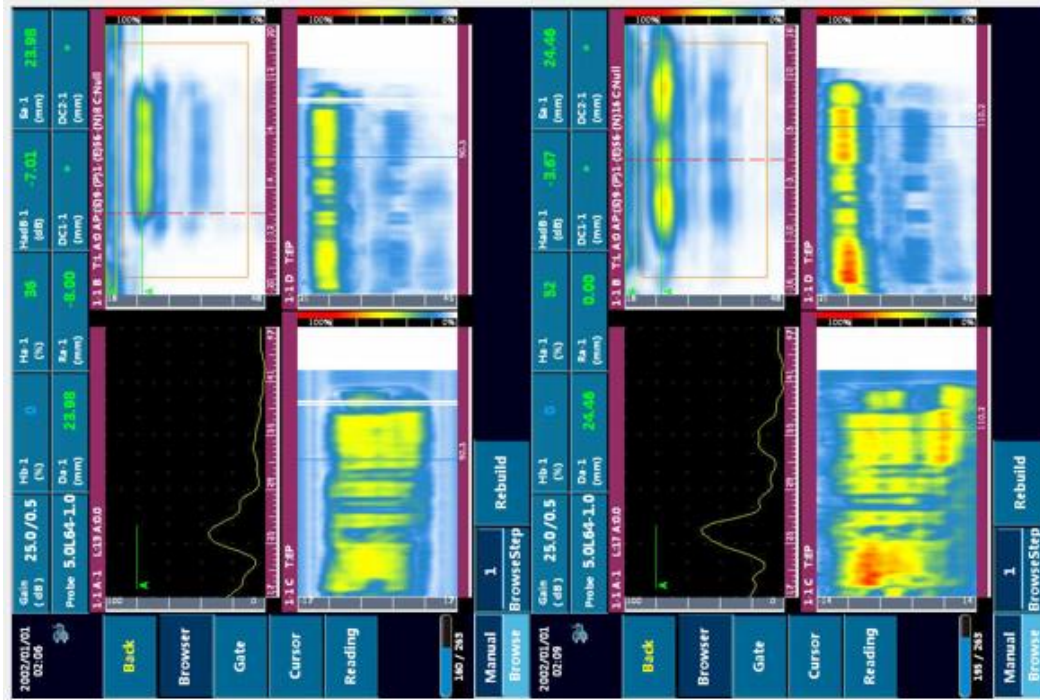
16elms

12elms

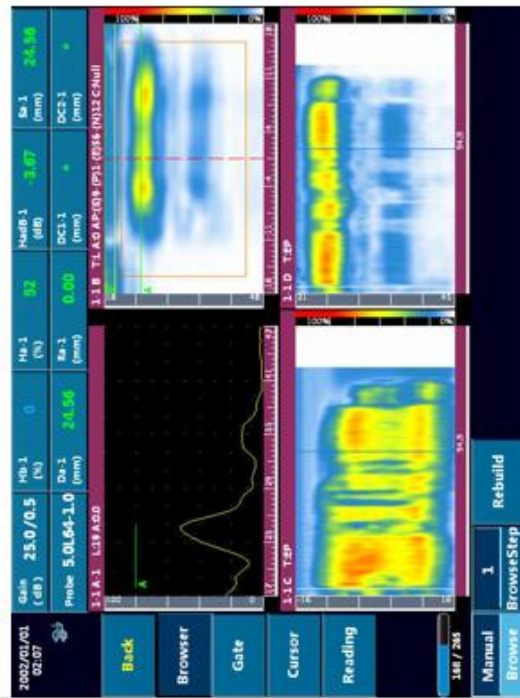


Leituras iniciais HOL-8MHZ- matriz48

8elm



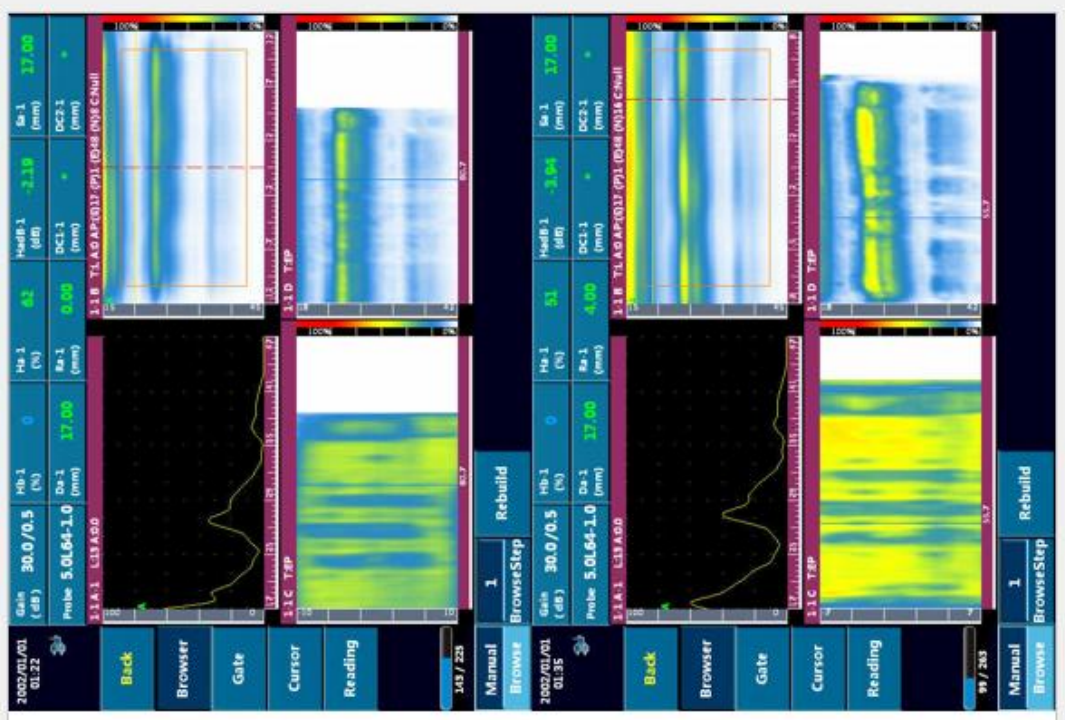
16elm



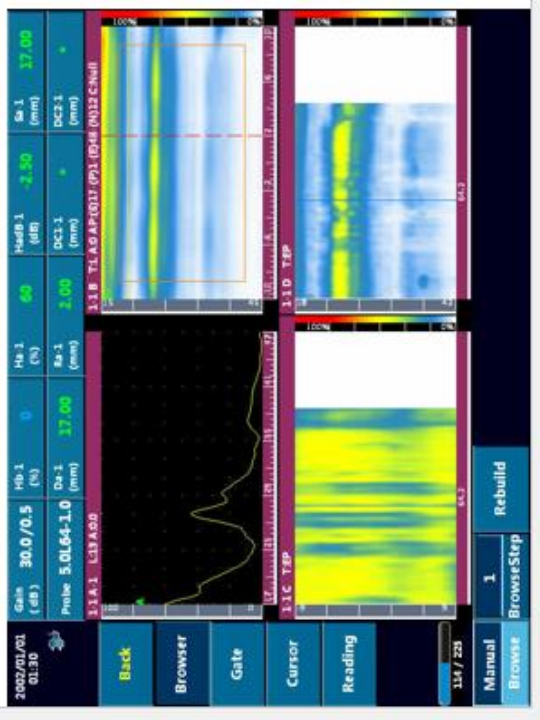
12elm

Leituras iniciais HOL-10MHZ- matriz32

8elm

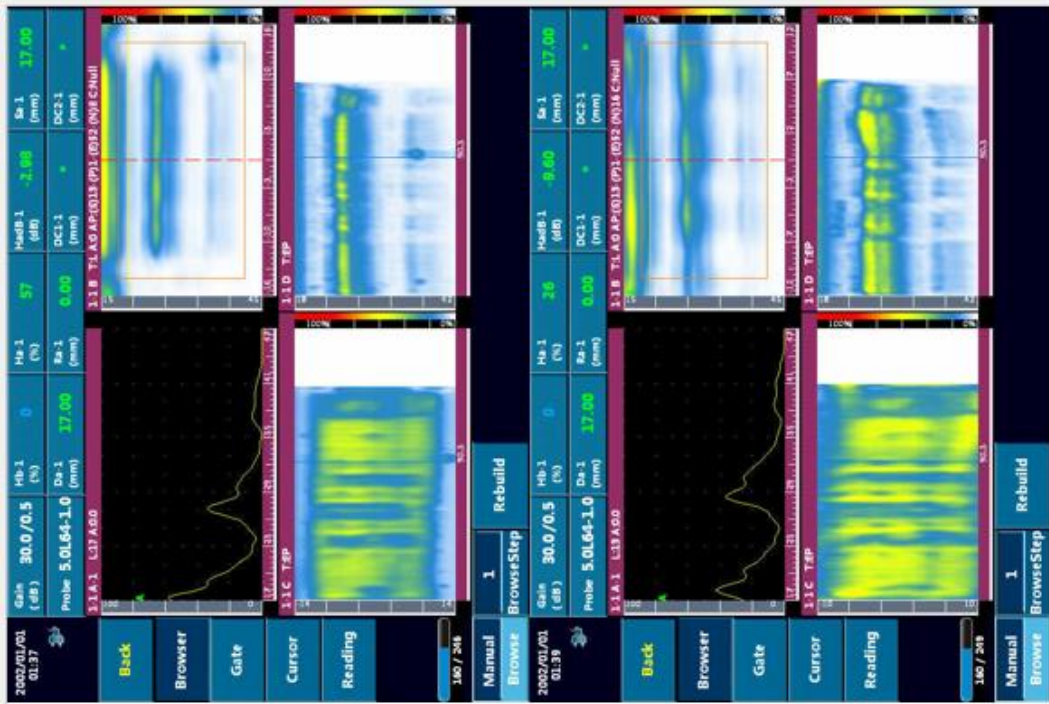


12elm

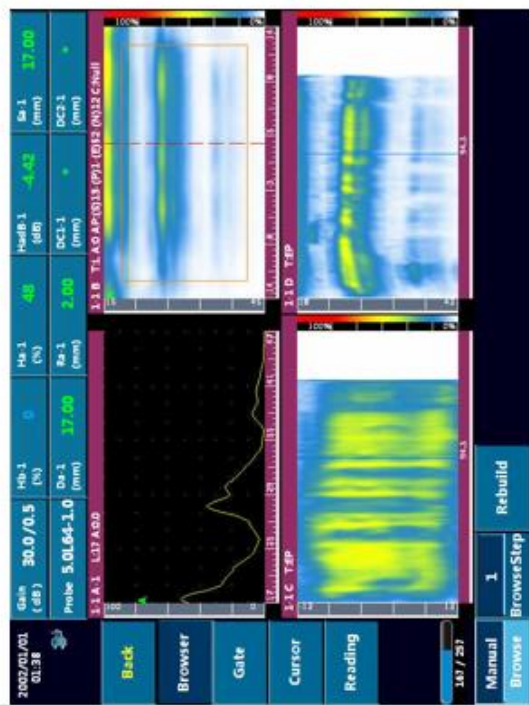


Leituras iniciais HOL-10MHZ- matriz40

8elm



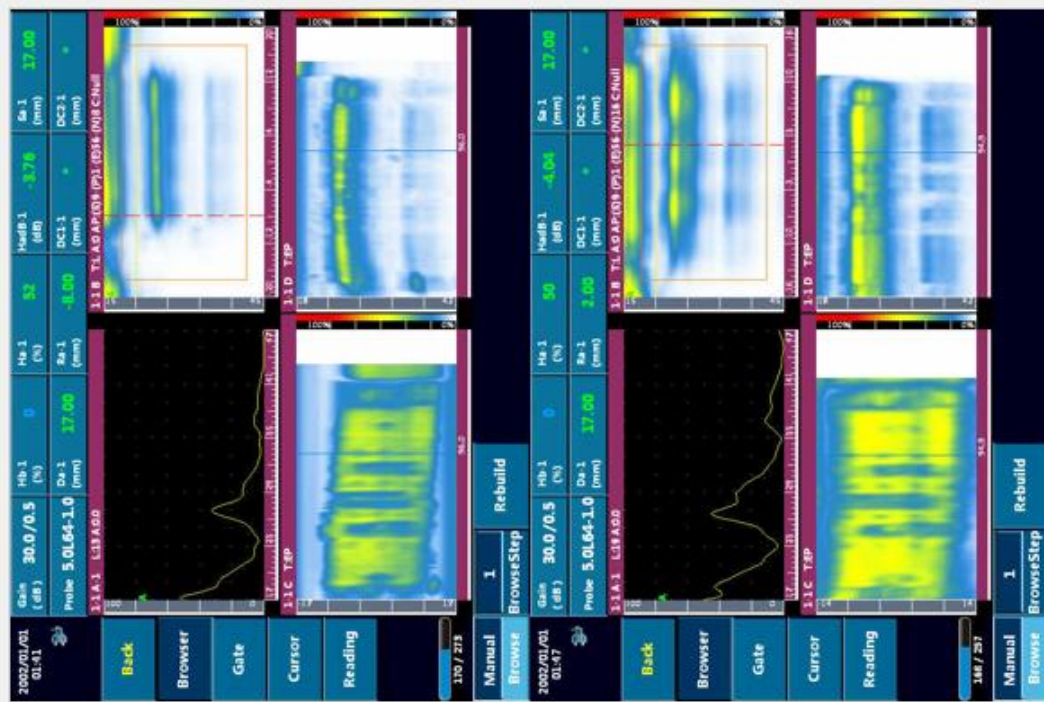
16elm



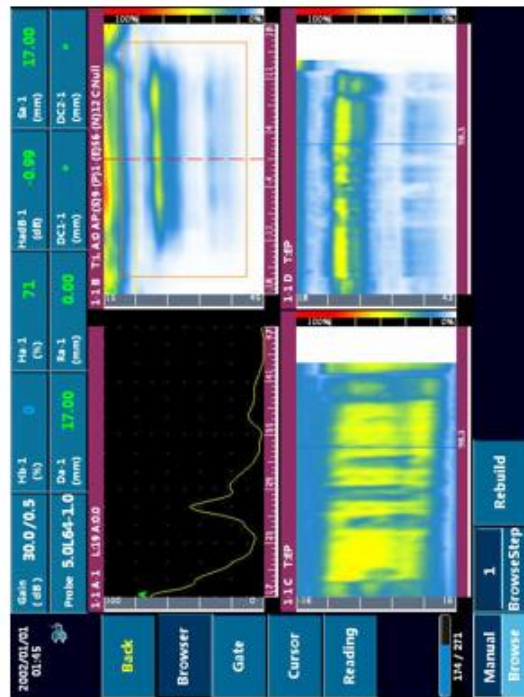
12elm

Leituras iniciais HOL-10MHZ- matriz48

8elm



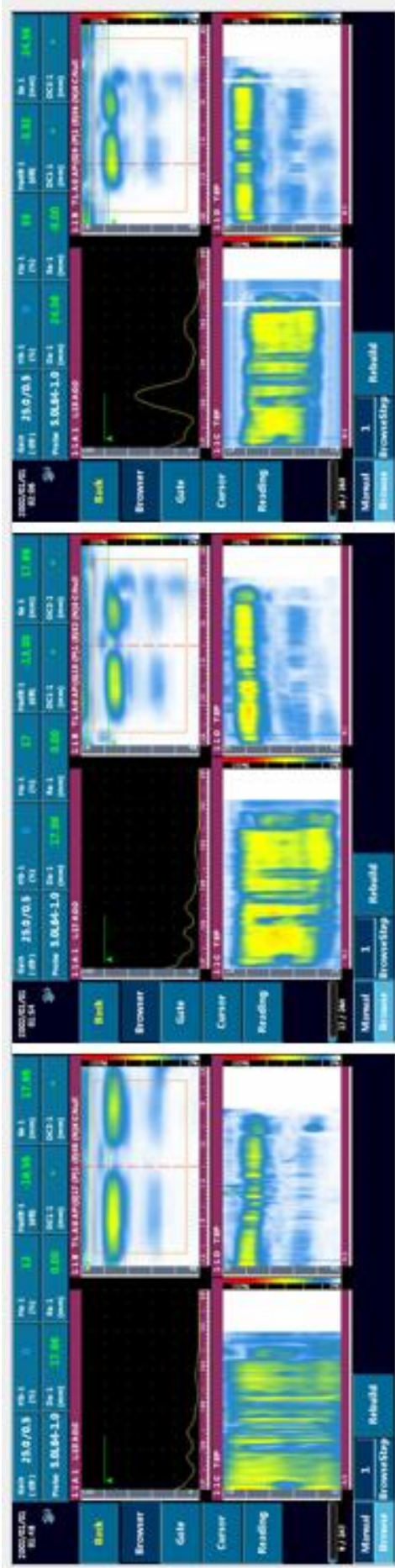
16elm



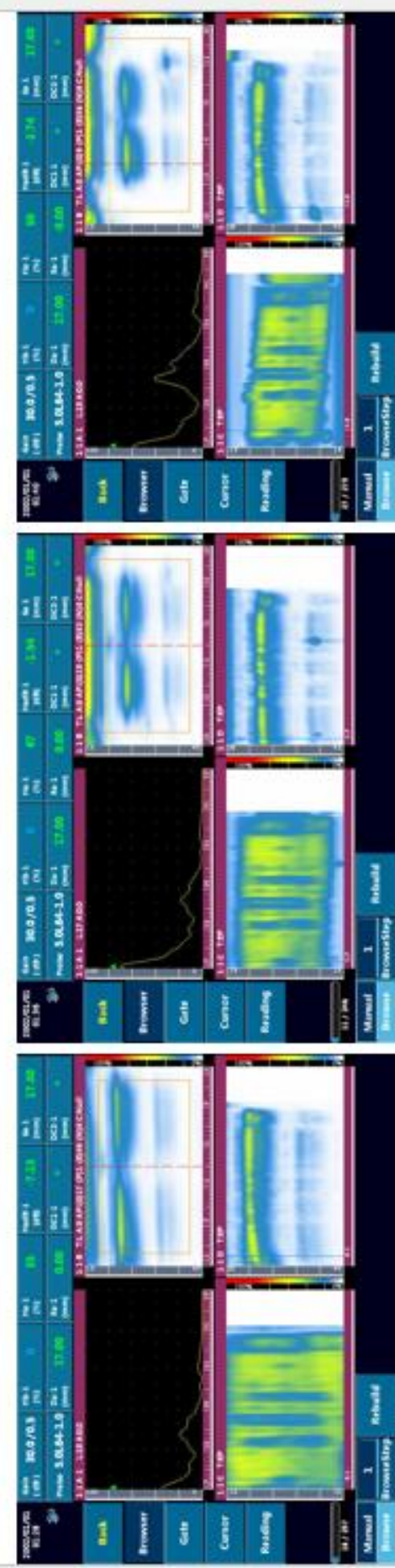
12elm

Comparação 8-10MHz Defeito “A” 8 – 12 – 16 elementos

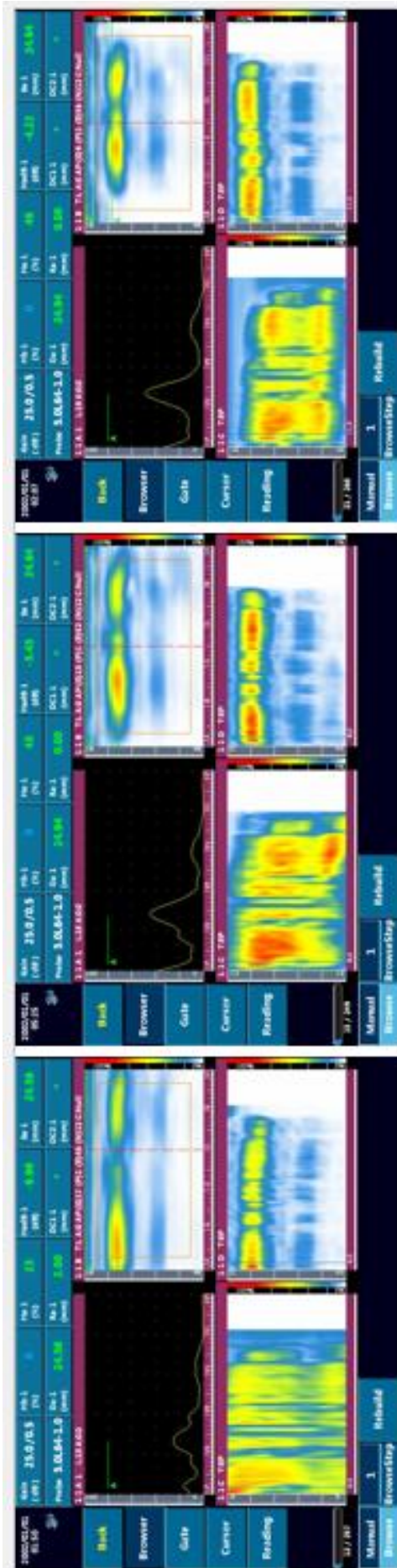
As três páginas seguintes, têm as leituras do defeito A, com aberturas de 8, 12 e 16 elementos, respectivamente



8MHz
10MHz



8MHz
10MHz



8MHz
10MHz

32

40

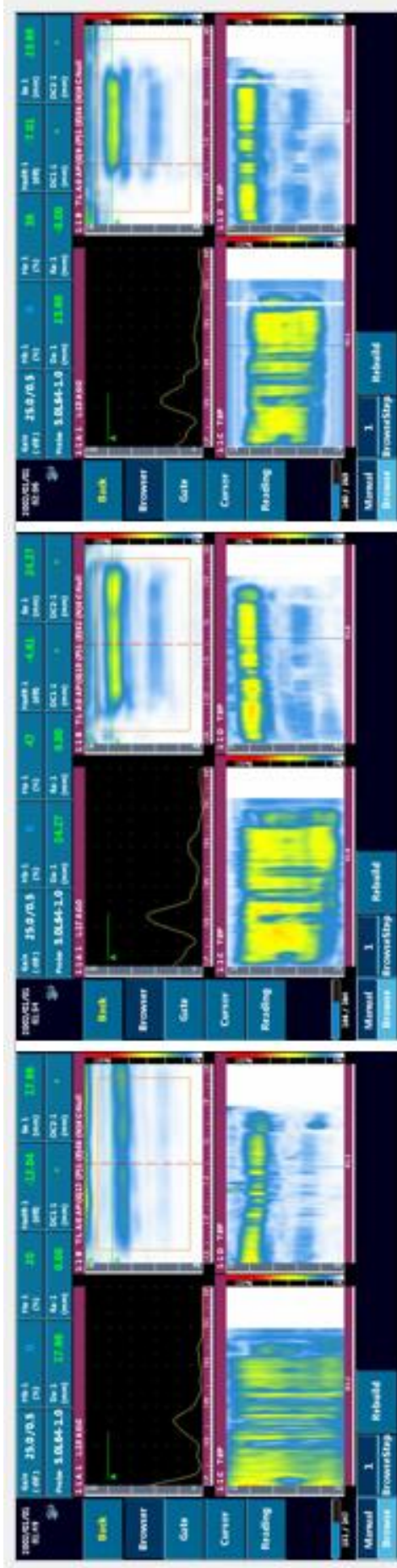
48

Comparação 8-10MHz

Defeito “E”

8 – 12 – 16 elementos

As três páginas seguintes, têm as leituras do defeito E, com aberturas de 8, 12 e 16 elementos, respectivamente



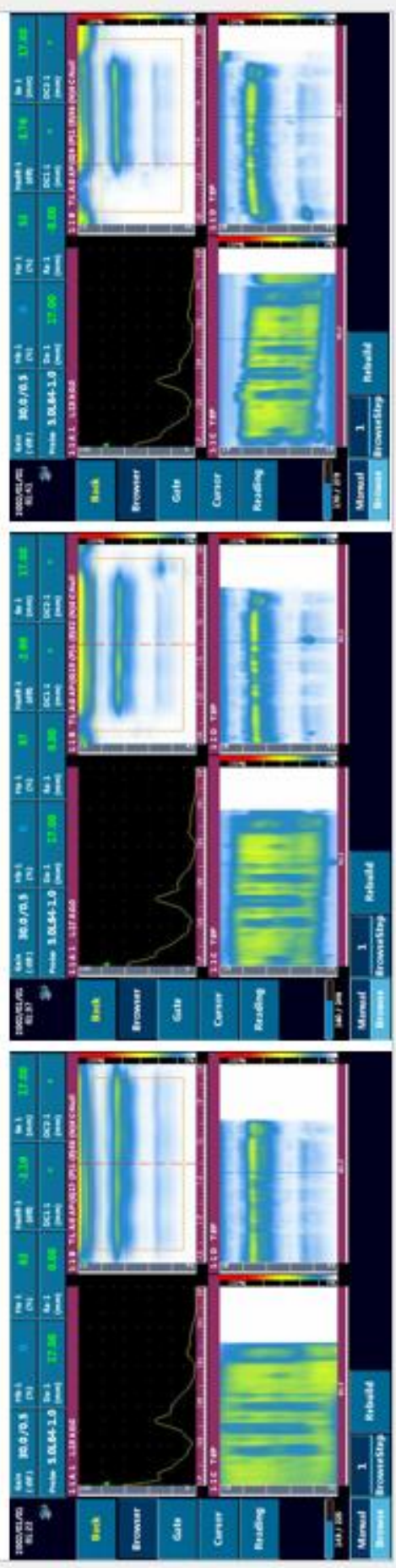
60

8MHz
10MHz

32

40

60



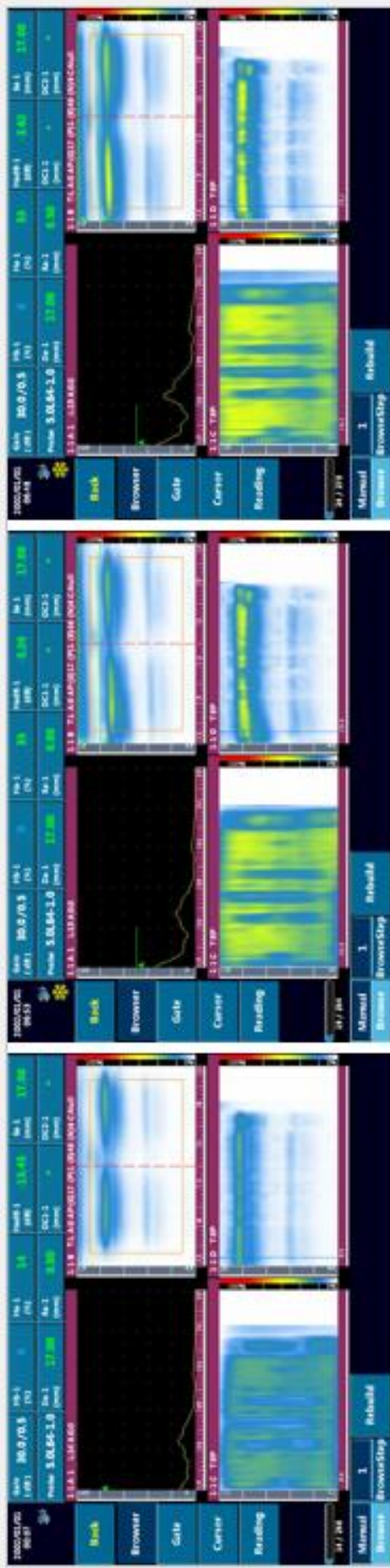
Testes de Janela de Parâmetros – 10MHz

10MHz	Matriz 32	Matriz 40
6 elementos	HOLF-10-32-6	HOLF-10-40-6
8 elementos	HOLF-10-32-8*	HOLF-10-40-8*
9 elementos	HOLF-10-32-9	HOLF-10-40-9

Comparação matriz 32 e 40
Grupo elemento de 6, 8 e 9

Defeitos A – B – E - F

As quatro páginas seguintes, têm as leituras dos defeitos A, B, E e F respetivamente.

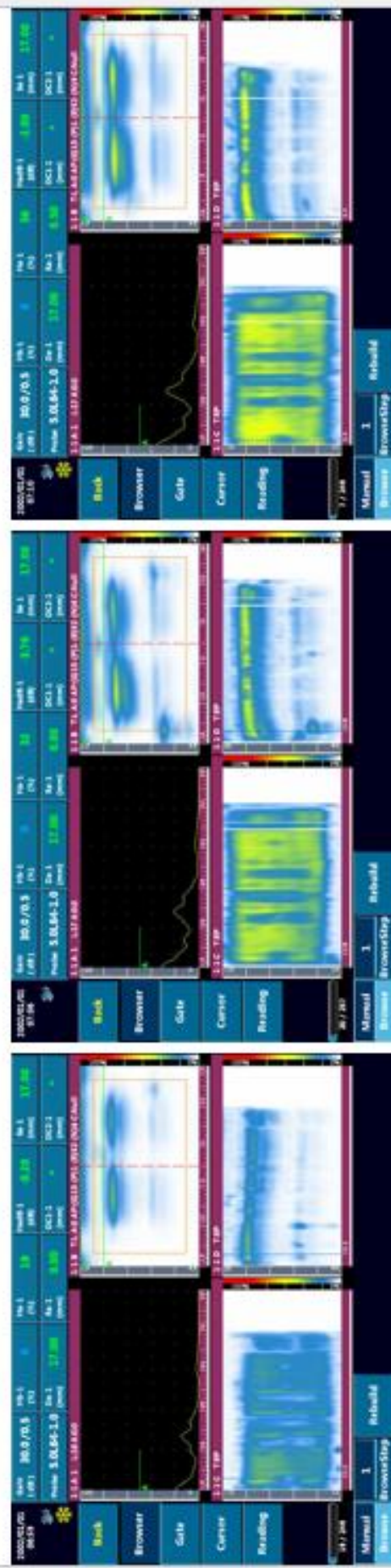


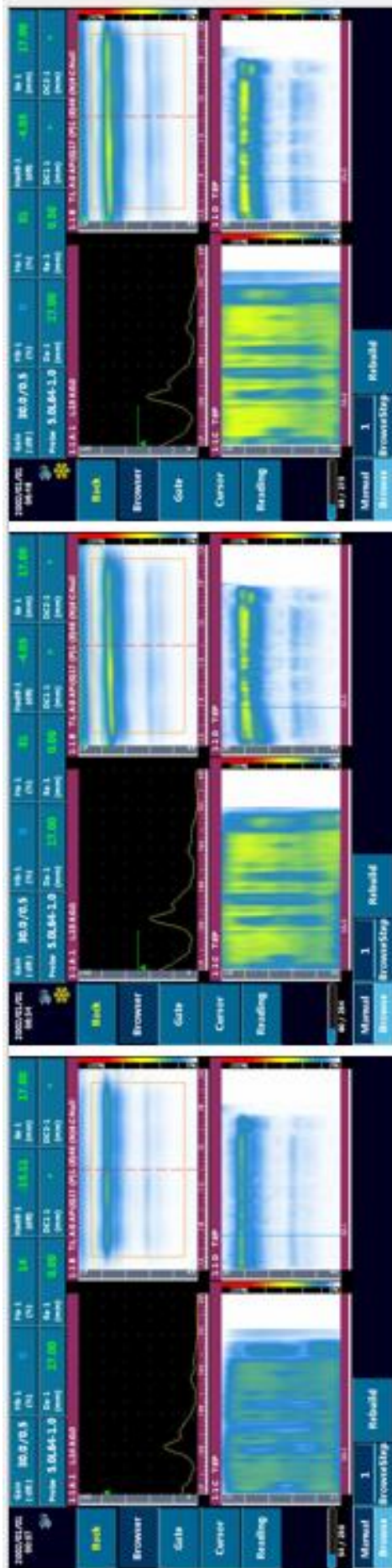
Matrix 32
Matrix 40

6

8

9





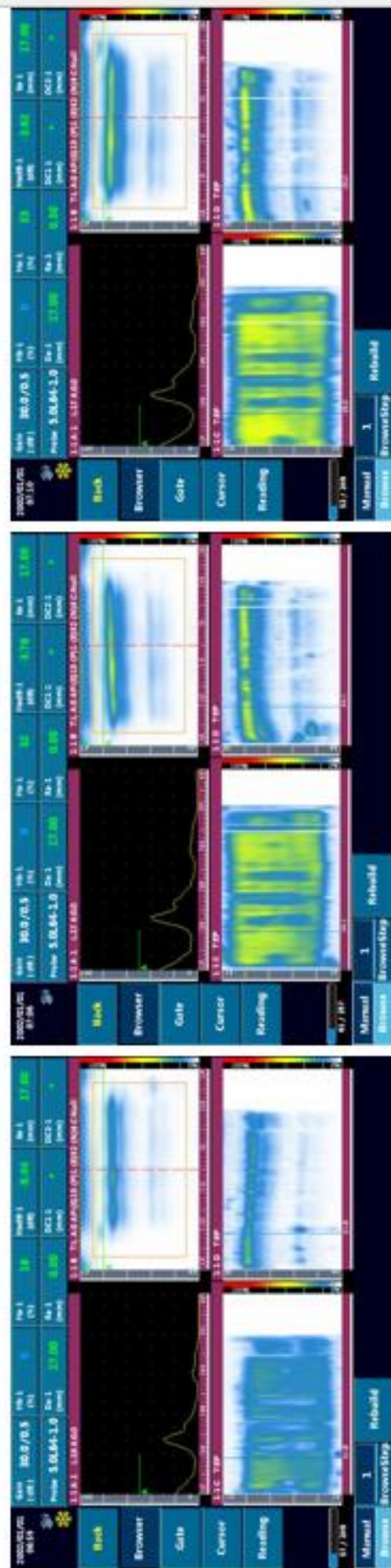
Matrix 32
Matrix 40

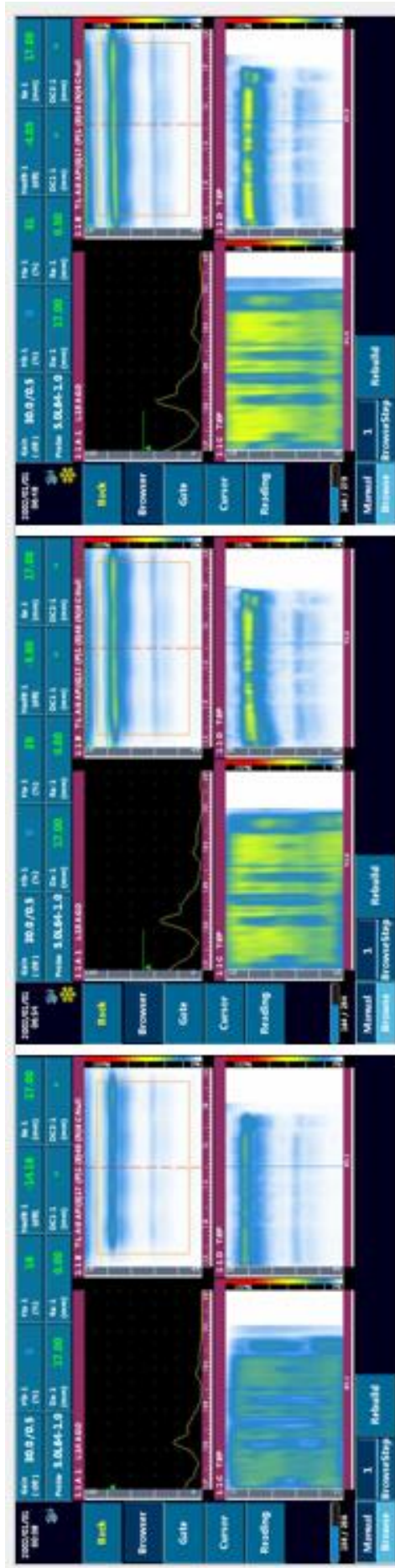
A.65

9

8

6



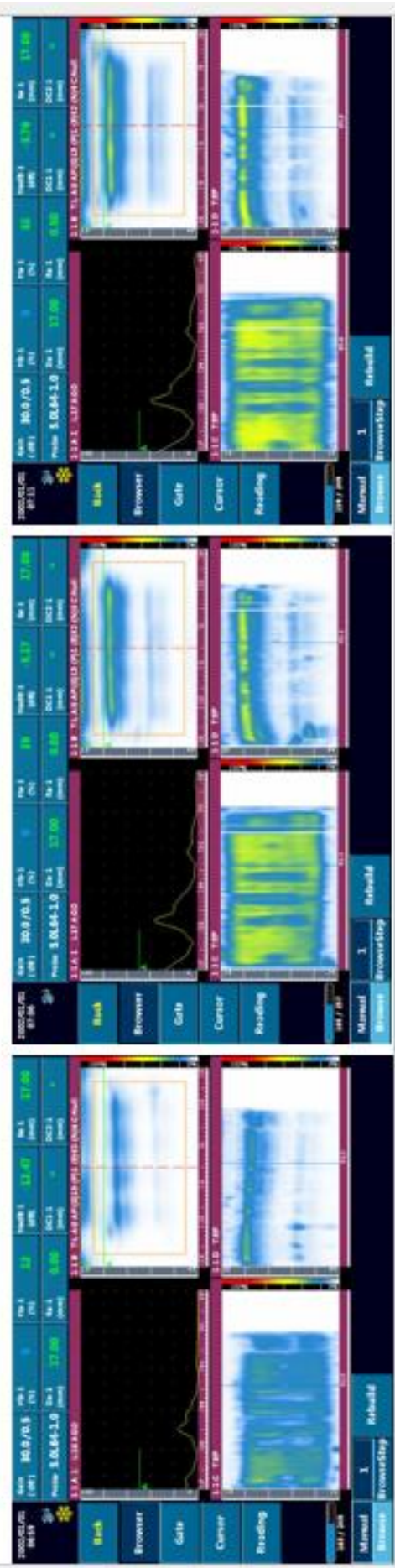


Matrix 32
Matrix 40

6

8

9



Testes finais – 10MHz e matriz 32

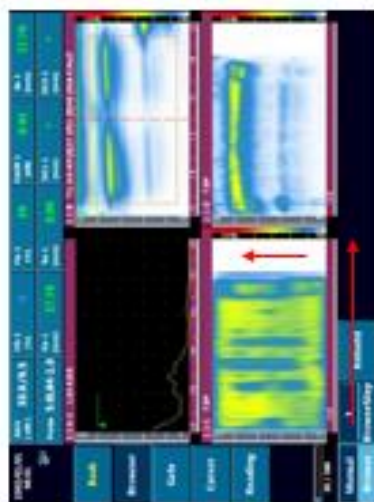
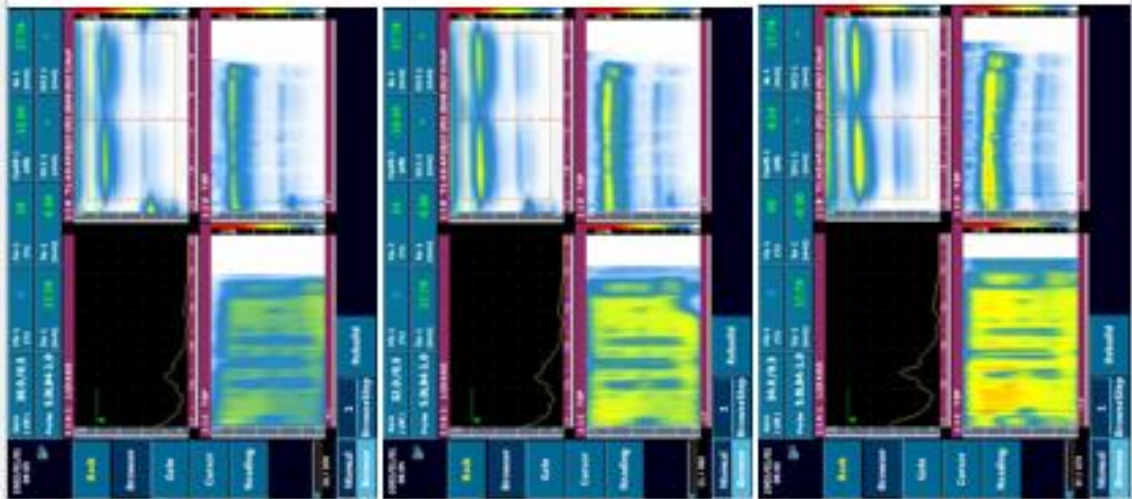
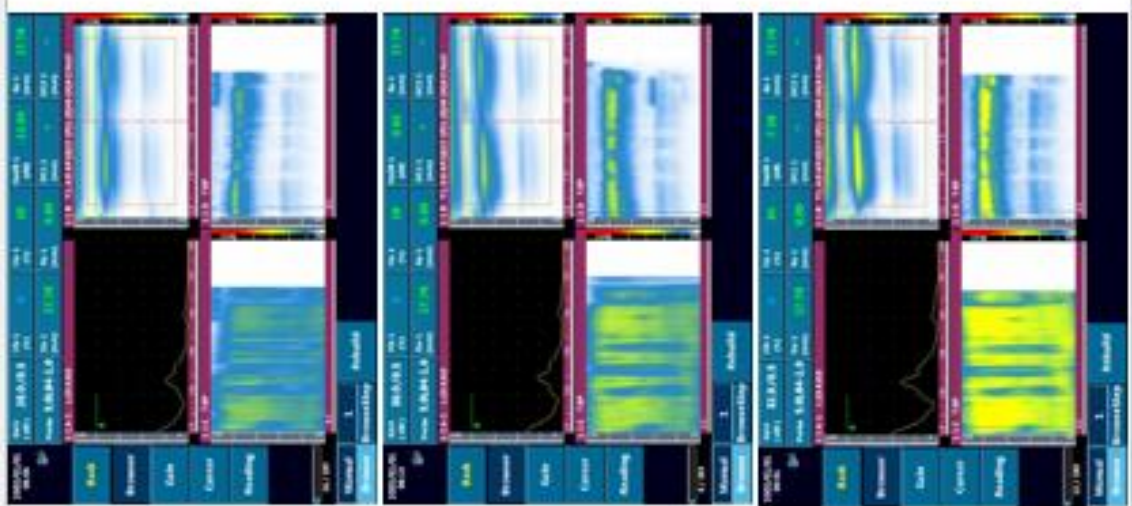
10MHz	6 elementos	7 elementos	8 elementos
X – 2db	-	HOLPF-32-7-L	HOLPF-32-8-L
X	HOLPF-32-6-M	HOLPF-32-7-M	HOLPF-32-8-M
X + 2db	-	HOLPF-32-7-H	HOLPF-32-8-H

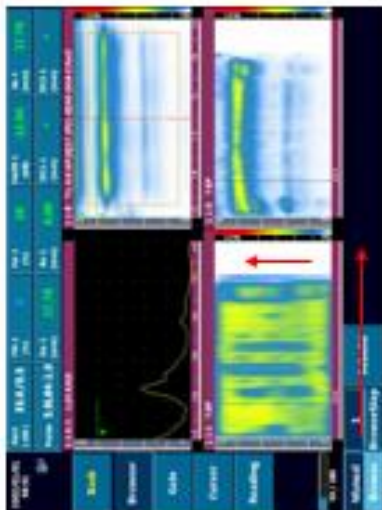
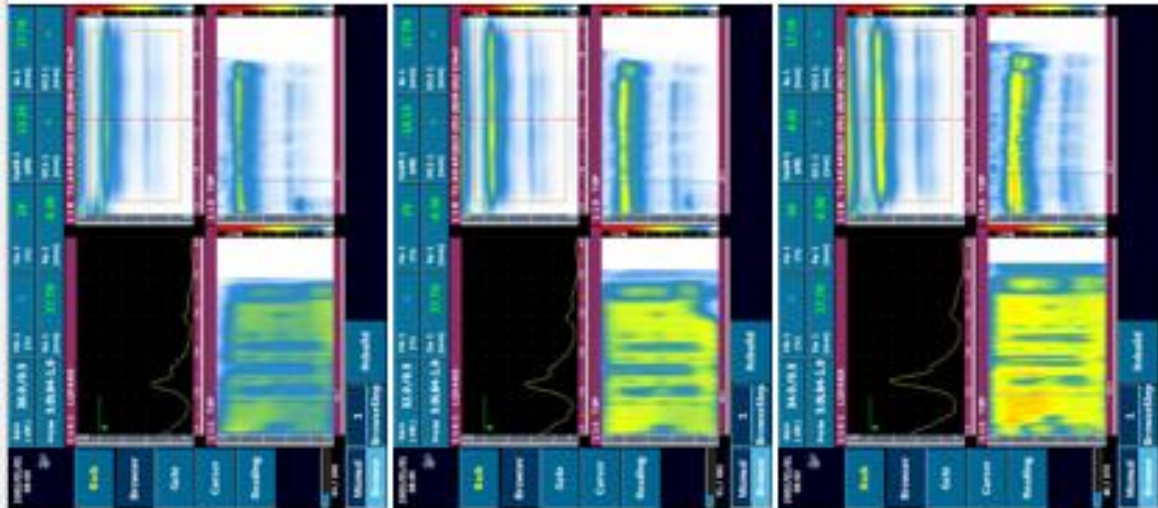
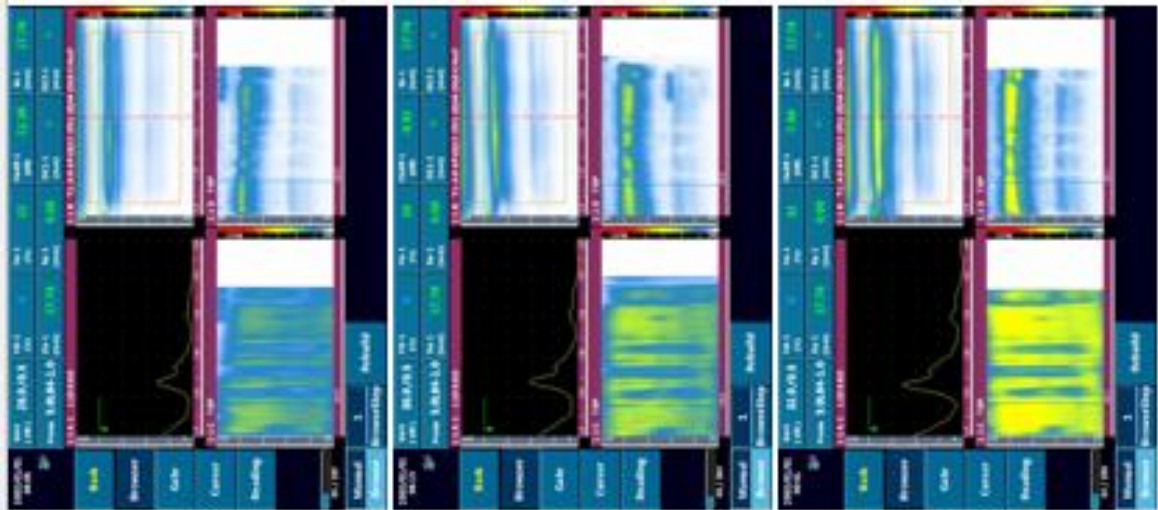
Testes janela final

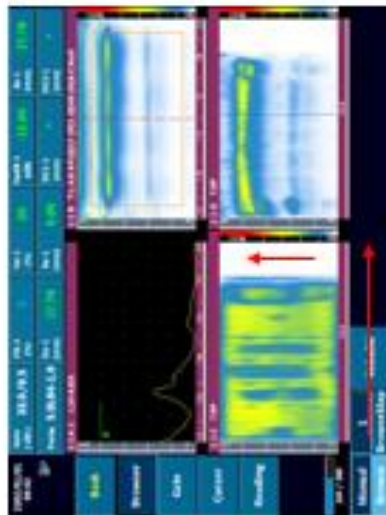
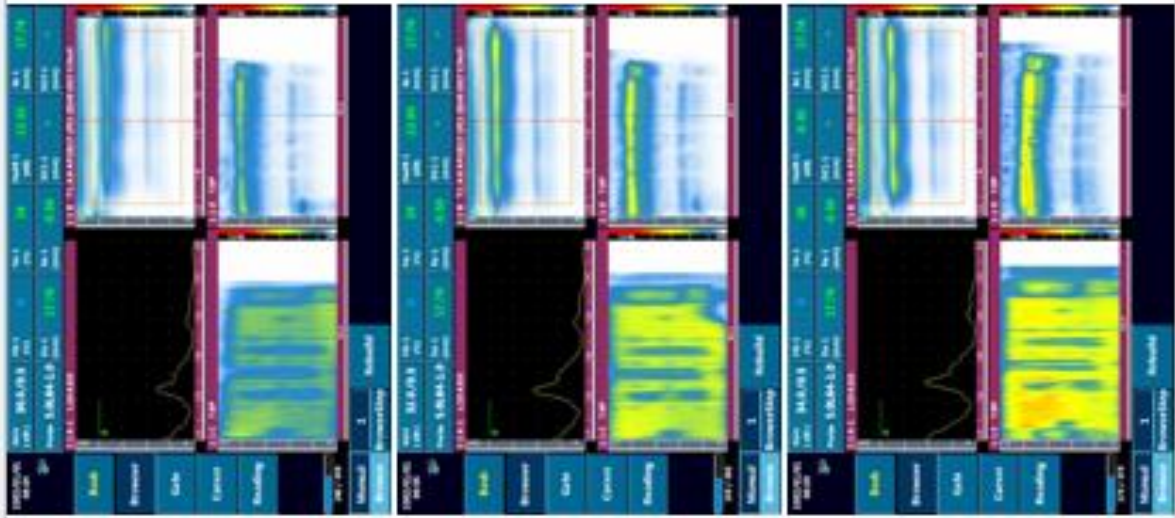
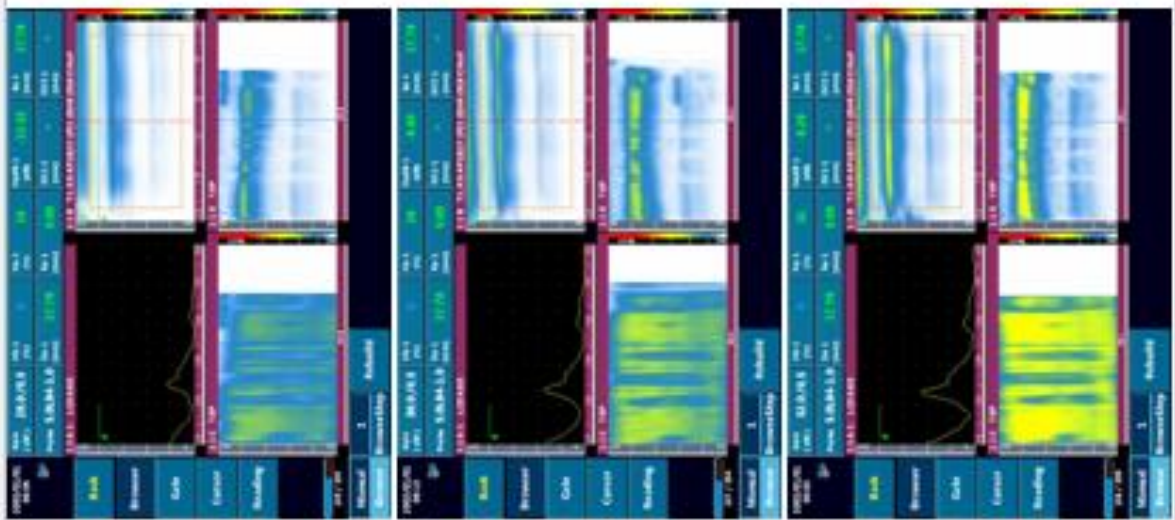
- Resultados para os defeitos 1, 2, 3 e 4;
- Disposição dos resultados:

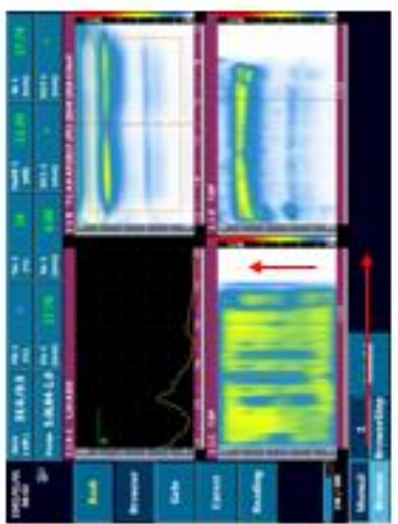
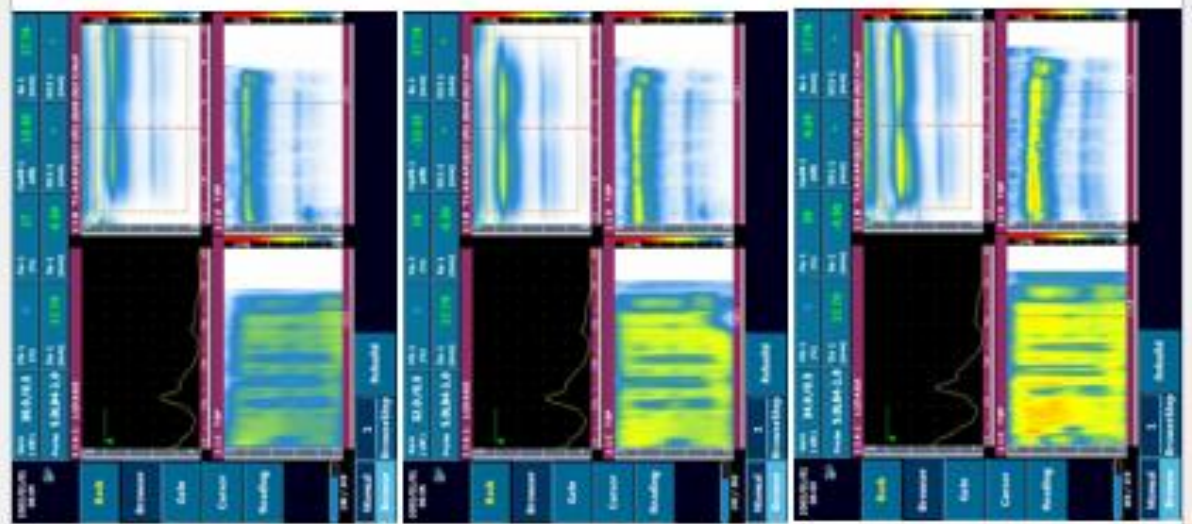
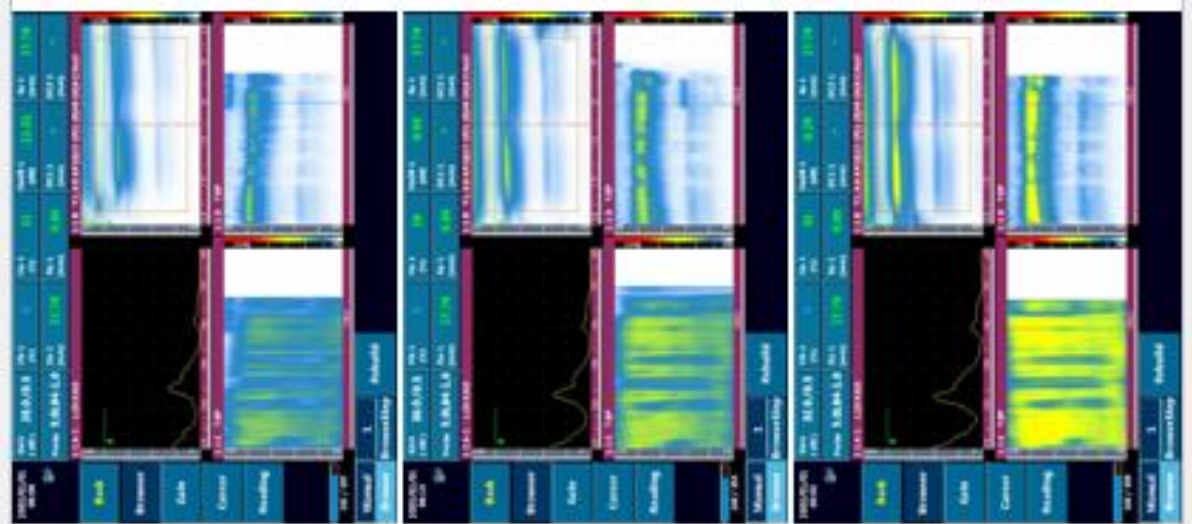
	HOLFP-32-7-L	HOLFP-32-8-L
HOLFP-32-6-M	HOLFP-32-7-M	HOLFP-32-8-M
	HOLFP-32-7-H	HOLFP-32-8-H

As quatro páginas seguintes, têm as leituras dos defeitos A, B, E e F respetivamente.









Apêndice V

Proposta de Trabalhos Futuros

Neste apêndice é feita a proposta para trabalhos futuros de investigação em Ensaio por Ultrassons com *phased array*. Assim é possível dar continuidade ao estudo de parâmetros e de utilização de tecnologias de PAUT de forma estruturada e objetiva.

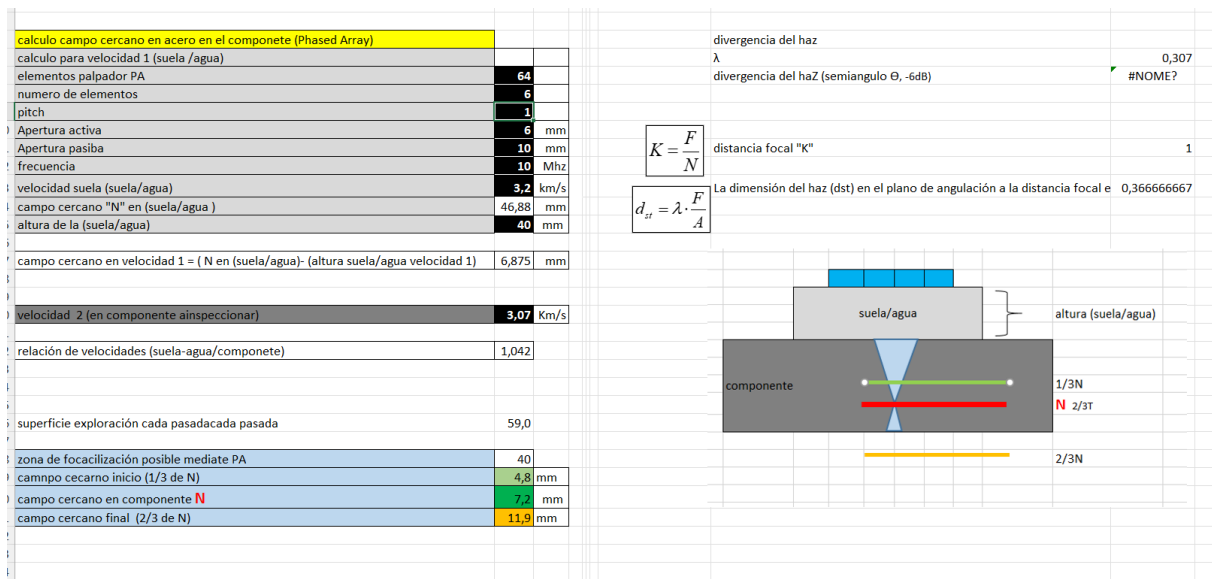


Figura 5.2 - Simulação para parâmetros ótimos experimentais.

De acordo com os resultados, é possível ver que a placa de PRFC utilizada se encontra no limiar de 1/3 de N, logo, não se encontra ainda na zona focal.

O que é proposto é que seja projetado um novo calço que permita colocar o ponto focal no interior da peça em estudo. Desta maneira é possível começar a criar um conjunto de equipamentos, que permita a realização de ensaios a várias profundidades, e em várias espessuras, obtendo-se sempre leituras em condições ótimas.

Um importante passo nesta direção, seria a recolha de um formulário de parametrização em PAUT com o objetivo de criar uma ferramenta de cálculo de parâmetros ótimos, como a das figuras anteriores. Assim, para além de permitir uma maior facilidade em tarefas de inspeção, seria possível validar, ou refutar, o grau de adequação dos resultados alcançados nos ensaios experimentais deste trabalho.

Como apoio a esta via de pesquisa futura, os trabalhos realizados no desenvolvimento deste documento servem como uma base fundamental teórica, Introdução a métodos experimentais e operacionais e, principalmente, como um conjunto de dados experimentais alcançados por métodos empíricos, que podem ser validados e melhorados, utilizando os métodos analíticos apresentados.