

**Estudo e Aplicação do Ensaio não Destrutivo por Ultrassom  
com a Tecnologia *Phased Array***

**Júlia Cristina Alves Soares**

Dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia de Gestão Industrial**  
Ramo de Engenharia Mecânica

**Bragança, novembro de 2018**



**Estudo e Aplicação do Ensaio não Destrutivo por Ultrassom  
com a Tecnologia *Phased Array***

**Júlia Cristina Alves Soares**

Dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia de Gestão Industrial**  
Ramo de Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob a orientação de:

**Professor Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**  
**Professor Dr. José Alexandre de Carvalho Gonçalves**

**Bragança, novembro de 2018**



*“A maior recompensa pelo nosso trabalho não é o que nos pagam por ele, mas aquilo em que ele nos transforma.”*

*(John Ruskin)*

*Dedico este trabalho aos meus pais e irmã.*



## Agradecimentos

A realização de uma dissertação de Mestrado requer uma grande dedicação, envolvimento e gosto pelos assuntos abordados.

No momento em que dou por terminada esta dissertação, quero agradecer a uma série de pessoas que participou, de forma direta ou indireta no decorrer deste trabalho.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientador e coorientador: Professor Dr. Eduardo Pinto Castro Ribeiro e Professor Dr. José Alexandre de Carvalho Gonçalves pela sua dedicação com que me orientaram nesta dissertação, pela preocupação demonstrada, por todo o apoio, sugestões, contributos, principalmente pela confiança depositada ao longo deste tempo e a autonomia que me foi proporcionada ao longo deste trabalho.

Agradeço imensamente ao gerente de território na Olympus Iberia, Nuno Félix, especialista em Ensaios não Destrutivos, pela sua disponibilidade e pelos conhecimentos partilhados sobre a inspeção com ultrassons na vertente *Phased Array*, bem como pelo incansável apoio nas dúvidas que surgiram ao longo do trabalho e por toda a sua generosidade e atenção.

Ao Eduardo Izeda e Arlindo Pascoal, mestres e bolseiros de investigação, que me apoiaram ao longo do trabalho, auxiliando-me nos procedimentos experimentais, pelas sugestões dadas e pela sua disponibilidade prestada sempre que foi necessária.

Por fim, mas definitivamente não por último, uma palavra de enorme apreço à minha família, ao meu namorado e aos meus amigos em geral, pelo amor depositado, dedicação, confiança transmitida, e incentivo incondicional que tiveram ao longo do meu percurso escolar e que sempre acreditaram e nunca deixaram de me encorajar.

## Resumo

Ensaio não destrutivo por ultrassom são amplamente utilizados na indústria, principalmente na avaliação de peças e estruturas mecânicas para a identificação de defeitos, corrosão, falhas ou imperfeições em soldas, constituindo uma das principais ferramentas do controle da qualidade dos produtos.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades internas em juntas soldadas pelos processos de soldadura MIG, TIG e *Friction Stir Welding* através da inspeção por ultrassom com o uso da técnica de *Phased Array*.

Foram efetuadas 8 inspeções ( 3 placas com juntas soldadas por TIG, 2 placas com juntas soldadas por MIG e 3 placas com juntas soldadas pelo processo de *Friction Stir Welding*), num total de 77 dimensionamentos dos defeitos realizados no *software Tomoview*.

As placas soldadas por MIG exibiram a maioria dos defeitos na raiz da solda bem como algumas placas soldadas por TIG. A maioria dos defeitos detetados numa das placas soldada por TIG situaram-se no lado esquerdo do cordão. Nas placas soldadas por *Friction Stir Welding* foram encontrados o maior número de defeitos, sendo estes, maioritariamente, caracterizados por porosidades e apresentando as menores profundidades.

O ensaio por ultrassom *Phased Array* permitiu a detecção e caracterização, em dimensão e localização, dos defeitos encontrados, validando o sistema de inspeção utilizado.

*Palavras Chave: Ensaio não destrutivo, ultrassom, Phased Array.*

## **Abstract**

*Non-destructive tests by ultrasound are widely used in industry, mainly in the evaluation of parts and mechanical structures for the identification of defects, corrosion, failure or imperfections in welds, constituting one of the main tools of quality control of the products.*

*The aim of this work is to evaluate the ability to detect and dimension internal discontinuities in joints welded by the MIG, TIG and Friction Stir Welding welding processes through ultrasonic inspection using the Phased Array technique.*

*Eight inspections were carried out (3 plates with TIG welded joints, 2 MIG welded boards and 3 welded plates by welding friction joints), in a total of 77 defect dimensions performed in the Tomoview software.*

*The MIG welded plates exhibited most of the weld root defects as well as some TIG welded plates. Most defects detected on one of the TIG-welded plates were on the left side of the bead. In the plates welded by Friction Stir Welding were the largest numbers of defects, these being, mostly, characterized by pores and presenting as people depths.*

*The Phased Array ultrasound assay allowed the detection and characterization, in size and location, of the defects found, validating the surveillance system used.*

*Keywords: Non-Destructive Testing, Ultrasound, Phased Array.*

## Índice

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO .....	3
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 A SOLDADURA E A SUA IMPORTÂNCIA NA INDÚSTRIA .....	4
2.1.1 <i>Introdução</i> .....	4
2.1.2 <i>Processos de Soldadura</i> .....	6
2.2 DEFEITOS NA SOLDADURA .....	9
2.2.1 <i>Falta de penetração</i> .....	10
2.2.2 <i>Falta de fusão</i> .....	11
2.2.3 <i>Fendas</i> .....	11
2.2.4 <i>Inclusões</i> .....	12
2.2.5 <i>Porosidades</i> .....	12
2.2.6 <i>Defeitos de forma</i> .....	13
2.3 ALUMÍNIO E AS SUAS LIGAS.....	13
2.3.1 <i>Soldabilidade das ligas de alumínio</i> .....	16
2.4 ENSAIOS MECÂNICOS .....	19
2.4.1 <i>Ensaio não destrutivo</i> .....	19
2.5 ULTRASSOM .....	20
2.5.1 <i>Princípio físico do ultrassom</i> .....	20
2.5.2 <i>Modo de propagação das ondas sonoras</i> .....	21
2.5.3 <i>Propagação das ondas acústicas no material</i> .....	25
2.5.4 <i>Variáveis do Ensaio de ultrassom</i> .....	28
2.5.5 <i>Transdutores ultrassônicos</i> .....	29
2.5.6 <i>Acoplantes</i> .....	33
2.5.7 <i>Vantagens e desvantagens do ensaio com ultrassom</i> .....	34
<b>CAPÍTULO 3: TECNOLOGIA PHASED ARRAY .....</b>	<b>35</b>
3.1 ULTRASSOM CONVENCIONAL VS PHASED ARRAY .....	35
<b>3.2 TRANSDUTOR PHASED ARRAY.....</b>	<b>38</b>
3.2 CALÇOS PHASED ARRAY PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL.....	40
3.1 TIPOS DE VARRIMENTOS .....	40
3.2 TIPOS DE VISUALIZAÇÃO COM PHASED ARRAY .....	44
3.3 POSICIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO DEFEITO .....	46
3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DO ULTRASSOM PHASED ARRAY .....	48

---

3.5	ULTRASSOM VS RADIOGRAFIA INDUSTRIAL .....	48
<b>CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>		<b>50</b>
4.1	INTRODUÇÃO AO EQUIPAMENTO OMNISCAN MX2 .....	50
4.2	PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO .....	52
4.2.1	<i>Calibração da velocidade</i> .....	55
4.2.2	<i>Calibração do atraso do calço</i> .....	57
4.2.3	<i>Calibração da sensibilidade</i> .....	58
4.3	VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA CALIBRAÇÃO EM CORPO DE PROVA .....	61
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	62
4.4.1	<i>Placas com juntas soldadas por MIG</i> .....	64
4.4.2	<i>Placas com juntas soldadas através de Friction Stir Welding</i> .....	65
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>		<b>68</b>
5.1	CORPO DE PROVA .....	68
5.2	CASOS DE ESTUDO .....	70
5.2.1	<i>Dimensionamento dos defeitos</i> .....	70
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>		<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>104</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>113</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> - Aplicações da soldadura [25, 26, 27]. .....	5
<b>Figura 2</b> - Representação esquemática da soldadura por fusão [33]. .....	6
<b>Figura 3</b> - Representação esquemática da soldadura por pressão [33]. .....	6
<b>Figura 4</b> – Representação esquemática da soldadura MIG/MAG [38]. .....	7
<b>Figura 5</b> - Representação esquemática do equipamento de soldadura TIG, adaptado de [39]. .....	8
<b>Figura 6</b> – Representação esquemática do processo de soldadura por fricção, adaptado de [43]. .....	9
<b>Figura 7</b> - Defeitos na soldadura, adaptado de [44]. .....	10
<b>Figura 8</b> - Falta de penetração na raiz da solda [51]. .....	10
<b>Figura 9</b> - Falta de fusão [53]. .....	11
<b>Figura 10</b> - Fenda na zona de fusão [56]. .....	12
<b>Figura 11</b> - Inclusão de escória [57]. .....	12
<b>Figura 12</b> – Porosidades [57]. .....	12
<b>Figura 13</b> - Defeitos de forma na soldadura [44]. .....	13
<b>Figura 14</b> - Aplicações das ligas de alumínio [72]. .....	15
<b>Figura 15</b> - Efeito do intervalo de solidificação na contração [73]. .....	17
<b>Figura 16</b> - Emissão do sinal ultrassónico, adaptado de [84]. .....	20
<b>Figura 17</b> - Reflexão do sinal ultrassónico [84]. .....	21
<b>Figura 18</b> – Representação esquemática do método de inspeção por ultrassom [86]. .....	21
<b>Figura 19</b> - Diferentes meios de propagação sonora [80]. .....	22
<b>Figura 20</b> - Representação da propagação de uma onda longitudinal, adaptado de [87]. ..	23
<b>Figura 21</b> - Representação da propagação de uma onda transversal [87]. .....	23
<b>Figura 22</b> - Ondas superficiais. a) Onda superficial de <i>Rayleigh</i> ; b) Onda superficial de <i>Creeping</i> [90]. .....	24
<b>Figura 23</b> - Modos de propagação das ondas de <i>Lamb</i> [90]. .....	24

---

<b>Figura 24</b> - Atenuação sonora em estruturas com grãos distintos [83].	26
<b>Figura 25</b> - Incidência perpendicular duma onda, transmissão e reflexão [94].	26
<b>Figura 26</b> - Representação das variáveis da lei de Snell na inspeção por ultrassons [91].	27
<b>Figura 27</b> - Blocos padrão para diferentes aplicações [7, 91].	29
<b>Figura 28</b> - Elementos constituintes de um transdutor [100].	29
<b>Figura 29</b> - Transdutor de contato [102].	30
<b>Figura 30</b> - Transdutores de imersão [102].	31
<b>Figura 31</b> - Transdutor normal [103].	31
<b>Figura 32</b> - Transdutor de duplo-cristal [103].	32
<b>Figura 33</b> - Transdutor angular [102].	32
<b>Figura 34</b> - Ultrassom convencional vs. ultrassom <i>Phased Array</i> [91].	36
<b>Figura 35</b> - Composição de um sistema de inspeção por <i>PA</i> , adaptado de [106].	36
<b>Figura 36</b> - Exemplos forma de onda resultante através do feixe sónico pulsado, adaptado de [107].	38
<b>Figura 37</b> - Exemplos de transdutores <i>PA</i> [106].	38
<b>Figura 38</b> - Calços padrões utilizadas na inspeção por ultrassom <i>Phased Array</i> [106].	40
<b>Figura 39</b> - Variáveis para o cálculo da abertura ativa [91].	41
<b>Figura 40</b> - Tipos de varrimentos de feixe para transdutores multielemento, adaptado de [106].	42
<b>Figura 41</b> - Varrimento linear [108].	42
<b>Figura 42</b> - Varrimento setorial [108].	43
<b>Figura 43</b> - Influência do aumento da abertura no aprimoramento da resolução [106].	43
<b>Figura 44</b> - Efeitos de resolução angular. a) Uso de 4 leis focais e incrementos de 8°; b) uso de 8 leis focais e incrementos de 4°; c) uso de 32 leis focais e incrementos de 1° [106].	44
<b>Figura 45</b> - Esquema de vistas ultrassónicas (B-scan, C-scan e D-scan) , adaptado de [106].	44
<b>Figura 46</b> - Representação de dados: a) A-scan.; b) B-scan; c) C-scan; d) S-scan [106].	46

---

<b>Figura 47</b> - Indicação das variáveis de leitura necessárias para a localização do defeito [106]. .....	46
<b>Figura 48</b> – Variáveis utilizadas para o dimensionamento dos defeitos. ....	47
<b>Figura 49</b> - Caraterização de defeitos. a) Falha planar; b) Falha volumétrica [109]. ....	47
<b>Figura 50</b> - Caraterização de defeitos. a) Porosidade; b) Falta de fusão na parede lateral [109]. .....	48
<b>Figura 51</b> - Unidade de aquisição de dados OmniScan MX2. ....	50
<b>Figura 52</b> - Painel de menus e submenus da OmniScan MX2. ....	51
<b>Figura 53</b> - Aspeto do menu <i>Wizard</i> e seus respetivos submenus Submenus (seleção do submenu <i>Part &amp; Weld</i> ). ....	51
<b>Figura 54</b> –Tela de ajuda para ajuste dos parâmetros. ....	52
<b>Figura 55</b> – Desenho técnico do bloco de calibração usado. ....	53
<b>Figura 56</b> - Bloco padrão do tipo IIW-2 – Norma AFNOR EN 12223. ....	53
<b>Figura 57</b> - Sonda 5L16-A10. ....	53
<b>Figura 58</b> - Calço SA10-N55S. ....	54
<b>Figura 59</b> - Uso da glicerina como acoplante ultrassónico. ....	55
<b>Figura 60</b> - Identificação dos raios do calibre padrão. ....	55
<b>Figura 61</b> – Menu de calibração. ....	56
<b>Figura 62</b> - Calibração da velocidade. Detecção e maximização dos sinais correspondentes aos raios conhecidos. ....	56
<b>Figura 63</b> – Identificação dos elementos que caraterizam o sinal. ....	57
<b>Figura 64</b> - Criação do envelope para a calibração do atraso de calço. ....	58
<b>Figura 65</b> - Calibração do atraso do calço. a) Ajuste da calibração pela movimentação do transdutor; b) Obtenção do sinal linear. ....	58
<b>Figura 66</b> – Identificação do furo usado com refletor para a calibração da sensibilidade. ....	59
<b>Figura 67</b> - Calibração da sensibilidade. ....	60
<b>Figura 68</b> – Finalidade da calibração do atraso do calço juntamente com a calibração da sensibilidade. a) Detecção do furo; b) Profundidade e amplitude incorretas; c) Correção da profundidade; d) Correção da amplitude. ....	60
<b>Figura 69</b> – <i>Status</i> dos indicadores de calibração concluído. ....	60

---

<b>Figura 70</b> – Desenho técnico do corpo de prova. ....	61
<b>Figura 71</b> - Corpo de prova. ....	61
<b>Figura 72</b> - Inspeção ultrassónica para a deteção dos furos existentes na placa. ....	62
<b>Figura 73</b> – Sentido de inspeção do cordão de solda.....	63
<b>Figura 74</b> – Placas com juntas soldadas por TIG. A) Placa 1; b)Placa 2;c) Placa 3. ....	63
<b>Figura 75</b> - Placa 1 com junta soldada por MIG. ....	64
<b>Figura 76</b> - Placa 2 com junta soldada por MIG. ....	64
<b>Figura 77</b> – Placas com juntas soldadas através de <i>Friction Stir Welding</i> . a) Placa 1; b) Placa 2; c) Placa 3.....	65
<b>Figura 78</b> – Campo do valor de ganho. a) Janela da função de ganho; b) Cursor rotativo de ajuste.....	66
<b>Figura 79</b> - Configuração do feixe emitido pelo transdutor. ....	67
<b>Figura 80</b> – Deteção de furos. a) Deteção do furo 1; b) Deteção do furo 2; c) Deteção do furo 3.....	68
<b>Figura 81</b> – Deteção de furos. a) Deteção do furo 1; b) Deteção do furo 2; c) Deteção do furo 3.....	69
<b>Figura 82</b> – Deteção de furos. Deteção do furo 7; b) Deteção do furo 8; c) Deteção do furo 9.....	70
<b>Figura 83</b> – Procedimento usado para a medição e caraterização do defeito. ....	71
<b>Figura 84</b> – Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1. ....	71
<b>Figura 85</b> – Defeito 3 da região 1 com junta soldada pelo processo MIG. ....	72
<b>Figura 86</b> – Ecos obtidos durante uma inspeção de defeitos. a) Pico de entrada e pico de fundo; b) Pico de entrada e defeito grande; c) Pico de entrada, defeito pequeno e eco de fundo.....	72
<b>Figura 87</b> – Interpretação das indicações relacionadas com a deteção do defeito/falha. ...	73
<b>Figura 88</b> - Desaparecimento do defeito 4 da região 2, identificado na região 3 da placa.....	74
<b>Figura 89</b> - Desaparecimento do defeito 2 da região 6, identificado na região 7 da placa.....	75
<b>Figura 90</b> – Deteção de defeitos da placa 1 pelo processo MIG. a) Defeito 2 da região 1; b) Defeito 4 da região 2; c) Defeito 2 da região 6. ....	76
<b>Figura 91</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2.....	76

---

<b>Figura 92</b> – Desaparecimento de alguns defeitos da região 6, assinalado na região 7 da Placa 2. ....	77
<b>Figura 93</b> - Detecção de defeitos da placa 2 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 2; c) Defeito 1 da região 8. ....	78
<b>Figura 94</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1. ....	78
<b>Figura 95</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 4; c) Defeito 1 da região 12. ....	81
<b>Figura 96</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2. ....	81
<b>Figura 97</b> -. Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 2 da região 1; c) Defeito 1 da região 2. ....	82
<b>Figura 103</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 3. ....	82
<b>Figura 99</b> – Desaparecimento do defeito 1 da região 2, registado na região 3 da placa. ..	83
<b>Figura 100</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 4. ....	83
<b>Figura 101</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1. ....	84
<b>Figura 102</b> – Defeitos detetados na região 2 e 3 da placa 1 com junta soldada por <i>Friction Stir Welding</i> . ....	85
<b>Figura 103</b> – Visualização dos defeitos que restam da região 2, detetados na região 5 da placa. ....	85
<b>Figura 104</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo <i>Fricciona Stir Welding</i> . a) Defeito 2 da região 1; b) Defeito 1 da região 10. ....	87
<b>Figura 105</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2. ....	87
<b>Figura 106</b> – Defeitos detetados na região 7 da placa 1. ....	89
<b>Figura 107</b> – Desaparecimento do defeito 1 da região 7, assinlado na região 8 da placa. ..	89
<b>Figura 113</b> – Defeitos que restaram da região 10 identificados na região 12. ....	90
<b>Figura 109</b> - Detecção de defeitos da região 21 da Placa 2 pelo processo FSW. ....	92
<b>Figura 110</b> – Defeito restante da região 23. ....	92
<b>Figura 111</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo <i>Fricciona Stir Welding</i> . a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 13. ....	94
<b>Figura 112</b> - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 3. ....	95
<b>Figura 113</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 5. ....	95

---

<b>Figura 114</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo <i>Friccion Stir Welding</i> . a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 21. ....	99
<b>Figura 115</b> - Teclas do painel frontal do OmniScan MX2. ....	113
<b>Figura 116</b> - Exemplo do <i>status</i> da carga de bateria do OmniScan.....	115
<b>Figura 117</b> - Conexão da sonda PA no OmniScan MX2.....	116
<b>Figura 118</b> – Teclado virtual com teclado numérico, à esquerda, e sem à direita.....	117
<b>Figura 119</b> - Exemplo de várias visualizações com várias réguas/escalas. ....	118
<b>Figura 120</b> - Identificação dos campos de leitura com diferentes cores.....	118
<b>Figura 121</b> – Contorno vermelho referente aos parâmetros aplicados à porta A. ....	119
<b>Figura 122</b> - Indicação das cores do cursor. ....	120
<b>Figura 123</b> - Cor roxa para o eixo de ultrassom e modo botão. ....	121
<b>Figura 124</b> – Hierarquia do menu e sintaxe de identificação. ....	122
<b>Figura 125</b> - Aspeto dos submenus para configuração da aplicação.....	124
<b>Figura 126</b> – Especificação da dimensão, material e geometria da amostra. ....	125
<b>Figura 127</b> - Seleção da simetria da solda. ....	126
<b>Figura 128</b> – Identificação da <i>LAND</i> .....	126
<b>Figura 129</b> - Seleção do tamanho da <i>LAND</i> . ....	127
<b>Figura 130</b> - Definição da altura e ângulo da raiz da solda. ....	127
<b>Figura 131</b> - Especificação da altura e ângulo da zona de preenchimento da solda. ....	128
<b>Figura 132</b> - Etapa do submenu <i>Part &amp; Weld</i> finalizada. ....	128
<b>Figura 133</b> - Seleção do submenu " <i>Setup</i> ". ....	129
<b>Figura 134</b> - Primeiros parâmetros a serem definidos no menu " <i>Setup</i> ". ....	129
<b>Figura 135</b> - Seleção da sonda e calço. ....	130
<b>Figura 136</b> - Especificação da configuração das leis focais. ....	131
<b>Figura 137</b> - Configuração da lei focal. a) Varredura sectorial; b) Varredura composta; c) Varredura linear com ângulo; d) Varredura linear a 0°. ....	132
<b>Figura 138</b> - Especificação dos elementos do transdutor e dos ângulos de feixe.....	133
<b>Figura 139</b> - Especificação da profundidade do foco e da posição do transdutor.....	134

<b>Figura 140</b> - Parâmetros relacionados com o posicionamento do transdutor e do feixe..	135
<b>Figura 141</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 3 da região 1..	136
<b>Figura 142</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 3 da região 2.	136
<b>Figura 143</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 4.	136
<b>Figura 144</b> - Desaparecimento do defeito 2 da região 6, identificado na região 7 da placa.....	137
<b>Figura 145</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 8.	137
<b>Figura 146</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9; c) Defeito 3 da região 9.....	137
<b>Figura 147</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 3.	138
<b>Figura 148</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 4.	138
<b>Figura 149</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 5.	138
<b>Figura 150</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6; c) Defeito 3 da região 6; d) Defeito 4 da região 6; e) Defeito 5 da região 6. ....	139
<b>Figura 151</b> – Desaparecimento de alguns defeitos da região 6, assinalado na região 7 da Placa 2.....	139
<b>Figura 152</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 2 da região 1.....	140
<b>Figura 153</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 3..	140
<b>Figura 154</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 5..	140
<b>Figura 155</b> – Defeitos sobrepostos identificados na região 5 da Placa 1.....	140
<b>Figura 156</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 7..	141
<b>Figura 157</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 8; b) Defeito 2 da região 8.....	141
<b>Figura 158</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9.....	141
<b>Figura 159</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 10; b) Defeito 2 da região 10.....	141
<b>Figura 160</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 11.	142
<b>Figura 161</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 13.	142

---

<b>Figura 162</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 2. .	142
<b>Figura 163</b> – Desaparecimento do defeito 1 da região 2, registado na região 3 da placa.....	143
<b>Figura 164</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 5; b) Defeito 2 da região 5. ....	143
<b>Figura 165</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 2; b) Defeito 2 da região 2; c) Defeito 3 da região 2; d) Defeito 4 da região 2.....	143
<b>Figura 166</b> – Defeitos detetados na região 4 da placa 1. ....	144
<b>Figura 167</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6. ....	144
<b>Figura 168</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7; c) Defeito 3 da região 7; d) Defeito 4 da região 7-.....	144
<b>Figura 169</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 8; b) Defeito 2 da região 8. ....	144
<b>Figura 170</b> - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9. ....	144
<b>Figura 171</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Descontinuidade 1 da região 1. ....	144
<b>Figura 172</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 2 da região 2; c) Defeito 3 da região 2; d) Defeito 4 da região 2; e) Defeito 5 da região 2. ....	144
<b>Figura 173</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 3; b) Defeito 2 da região 3; c) Defeito 3 da região 2. ....	144
<b>Figura 174</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 5; b) Defeito 2 da região 5. ....	144
<b>Figura 175</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6. ....	144
<b>Figura 176</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7; c) Defeito 3 da região 7. ....	144
<b>Figura 177</b> – Desaparecimento do defeito 1 da região 7, assinalado na região 8 da placa.....	144
<b>Figura 178</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9. ....	144
<b>Figura 179</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Descontinuidade 1 da região 10; b) Defeito 2 da região 10. ....	144

---

<b>Figura 180</b> – Defeitos que restaram da região 10 identificados na região 12. ....	144
<b>Figura 181</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Descontinuidade 1 da região 14; b) Defeito 2 da região 14. ....	144
<b>Figura 182</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 15; b) Defeito 2 da região 15; c) Defeito 3 da região 15; d) Defeito 4 da região 15. ....	144
<b>Figura 183</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 16; b) Defeito 2 da região 16. ....	144
<b>Figura 184</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 17; b) Defeito 2 da região 17; c) Defeito 3 da região 17 d) Defeito 4 da região 17. ....	144
<b>Figura 185</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 18; b) Defeito 2 da região 18. ....	144
<b>Figura 186</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 21; b) Defeito 2 da região 21. ....	144
<b>Figura 187</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 26; b) Defeito 2 da região 26; c) Defeito 3 da região 26; d) Defeito 4 da região 26. ....	144
<b>Figura 188</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 28; b) Defeito 2 da região 28. ....	144
<b>Figura 189</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 29; b) Defeito 2 da região 29. ....	144
<b>Figura 190</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 30; b) Defeito 2 da região 30. ....	144
<b>Figura 191</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 31; b) Defeito 2 da região 31. ....	144
<b>Figura 192</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 31. ....	144
<b>Figura 193</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 33; b) Defeito 2 da região 33; c) Descontinuidade 3 da região 33. ....	144
<b>Figura 194</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 1. ....	144
<b>Figura 195</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 2; b) Defeito 2 da região 2. ....	144
<b>Figura 196</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 5. ....	144

---

<b>Figura 197</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6. ....	144
<b>Figura 198</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7;c) Defeito 3 da região 7; d) Defeito 4 da região 7. ....	144
<b>Figura 199</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 8. ....	144
<b>Figura 200</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região	144
<b>Figura 201</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 10. ....	144
<b>Figura 207</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 11; b) Defeito 2 da região 11. ....	144
<b>Figura 203</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 12; b) Defeito 2 da região 12. ....	144
<b>Figura 204</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 13; b) Defeito 2 da região 13. ....	144
<b>Figura 205</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 14; b) Defeito 2 da região 14; c) Defeito 3 da região 14. ....	144
<b>Figura 206</b> - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 15; b) Defeito 2 da região 15. ....	144
<b>Figura 207</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 16. ....	144
<b>Figura 208</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 17; b) Defeito 2 da região 17. ....	144
<b>Figura 209</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 18; b) Descontinuidade 2 da região 18. ....	144
<b>Figura 210</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 19. ....	144
<b>Figura 211</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 20; b) Defeito 2 da região 20; c) Defeito 3 da região 20. ....	144
<b>Figura 217</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 21. ....	144
<b>Figura 213</b> - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 23; b) Defeito 2 da região 23; c) Defeito 3 da região 23. ....	144

---



## Lista de tabelas

<b>Tabela 1</b> - Sistema de designação conforme a norma da ABNT NBR 6834, adaptado de [69].	15
<b>Tabela 2</b> - Funções dos elementos constituintes de um transdutor [100].	30
<b>Tabela 3</b> - Impedância acústicos de acoplantes e alguns materiais [92].	33
<b>Tabela 4</b> - Especificações da sonda 5L16-A10.	54
<b>Tabela 5</b> - Especificações do calço SA10-N55S.	54
<b>Tabela 6</b> – Parâmetros de soldadura.	64
<b>Tabela 7</b> – Dimensões das placas com juntas soldadas por MIG.	64
<b>Tabela 8</b> – Dimensões das placas com juntas soldadas por FSW.	65
<b>Tabela 9</b> – Parâmetros de soldadura usados para a formação da junta nas diferentes placas pelo processo FSW.	65
<b>Tabela 10</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 1 pelo processo MIG.	74
<b>Tabela 11</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo MIG.	74
<b>Tabela 12</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 1 pelo processo MIG.	74
<b>Tabela 13</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 1 pelo processo MIG.	75
<b>Tabela 14</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo MIG.	75
<b>Tabela 15</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo MIG.Mig 2.	75
<b>Tabela 16</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 2 pelo processo MIG.	76
<b>Tabela 17</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG.	76
<b>Tabela 18</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo MIG.	76

<b>Tabela 19</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo MIG. ....	77
<b>Tabela 19</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 2 pelo processo MIG. ....	77
<b>Tabela 20</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG. ....	77
<b>Tabela 22</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG. ....	77
<b>Tabela 23</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa pelo processo TIG. ....	79
<b>Tabela 24</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	79
<b>Tabela 25</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	79
<b>Tabela 26</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	79
<b>Tabela 27</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	79
<b>Tabela 28</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	80
<b>Tabela 29</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	80
<b>Tabela 30</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	80
<b>Tabela 31</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 11 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	80
<b>Tabela 32</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 12 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	80
<b>Tabela 33</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 1 pelo processo TIG. ....	81
<b>Tabela 34</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 2 pelo processo TIG. ....	81
<b>Tabela 35</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 2 pelo processo TIG. ....	81

---

<b>Tabela 36</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 3 pelo processo TIG.....	82
<b>Tabela 37</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo TIG.....	82
<b>Tabela 38</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 3 pelo processo TIG.....	83
<b>Tabela 39</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 3 pelo processo TIG.....	83
<b>Tabela 40</b> – Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 41 da Placa 1 pelo processo <i>Friction Stir Welding</i> . ....	84
<b>Tabela 41</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo FSW.....	85
<b>Tabela 42</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 1 pelo processo FSW.....	86
<b>Tabela 43</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 1 pelo processo FSW.....	86
<b>Tabela 44</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo FSW.....	86
<b>Tabela 45</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo FSW.....	86
<b>Tabela 46</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 1 pelo processo <i>Friction Stir Welding</i> . ....	87
<b>Tabela 47</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 2 pelo processo <i>Friction Stir Welding</i> . ....	88
<b>Tabela 48</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 2 pelo processo FSW.....	88
<b>Tabela 49</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo FSW.....	88
<b>Tabela 49</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 2 pelo processo FSW.....	88
<b>Tabela 51</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo FSW.....	89
<b>Tabela 52</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 2 pelo processo FSW.....	89

<b>Tabela 53</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 2 pelo processo FSW.....	90
<b>Tabela 54</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 2 pelo processo FSW.....	90
<b>Tabela 55</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 2 pelo processo <i>Friction Stir Welding</i> .....	90
<b>Tabela 56</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 14 da Placa 2 pelo processo FSW.....	91
<b>Tabela 57</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 15 da Placa 2 pelo processo FSW.....	91
<b>Tabela 58</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 16 da Placa 2 pelo processo FSW.....	91
<b>Tabela 59</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 17 da Placa 2 pelo processo FSW.....	91
<b>Tabela 60</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 18 da Placa 2 pelo processo FSW.....	92
<b>Tabela 61</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 21 da Placa 2 pelo processo FSW.....	92
<b>Tabela 62</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 25 da Placa 2 pelo processo FSW.....	93
<b>Tabela 63</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 26 da Placa 2 pelo processo FSW.....	93
<b>Tabela 64</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 28 da Placa 2 pelo processo FSW.....	93
<b>Tabela 65</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 29 da Placa 2 pelo processo FSW.....	93
<b>Tabela 66</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 30 da Placa 2 pelo processo FSW.....	93
<b>Tabela 67</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 31 da Placa 2 pelo processo FSW.....	94
<b>Tabela 68</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 32 da Placa 2 pelo processo FSW.....	94
<b>Tabela 69</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 33 da Placa 2 pelo processo FSW.....	94

---

<b>Tabela 70</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 3 pelo processo FSW.....	95
<b>Tabela 71</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 3 pelo processo FSW.....	95
<b>Tabela 72</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 73</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 74</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 75</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 76</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 77</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 3 pelo processo FSW.....	96
<b>Tabela 78</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 11 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 79</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 12 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 80</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 81</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 14 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 82</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 15 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 83</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 16 da Placa 3 pelo processo FSW.....	97
<b>Tabela 84</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 17 da Placa 3 pelo processo FSW.....	98
<b>Tabela 85</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 18 da Placa 3 pelo processo FSW.....	98
<b>Tabela 86</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 19 da Placa 3 pelo processo FSW.....	98

<b>Tabela 87</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 20 da Placa 3 pelo processo FSW.....	98
<b>Tabela 88</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 21 da Placa 3 pelo processo FSW.....	98
<b>Tabela 89</b> - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 23 da Placa 3 pelo processo FSW.....	99
<b>Tabela 90</b> - – Funções das teclas de controlo do OmniScan MX2.....	114
<b>Tabela 91</b> - Variações dos indicadores de carga da bateria.....	115



## Lista de símbolos e abreviaturas

END - Ensaio não destrutivo

END's - Ensaio não destrutivo

TIG – Tungsten Inert Gas

MIG– Metal Inert Gas

MAG - Metal Active Gas

FSW - Friction Stir Welding

PA - Phased Array

° - Graus (Unidade de Medida)

AWS - *American Welding Society*

GMAW - *Gas Metal Arc Welding*

Ar – Árgon

He – Hélio

O<sub>2</sub> – Oxigénio

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

ZTA – Zona Termicamente Afetada

SMAW - *Shielded Metal Arc Welding*

SAW - *Submerged Arc Welding*

% - Percentagem (Unidade de Medida)

ASNT - *American Society for Nondestructive Testing*

UT – Ultrassons

LP – Líquidos Penetrantes

IV – Inspeção Visual

PM – Partículas Magnéticas

CI - Correntes Induzidas

MHz – Megahertz (Unidade de Medida)

KHz – Quilohertz (Unidade de Medida)

Hz – Hertz (Unidade de Medida)

$\lambda$  - Comprimento de onda

V - Velocidade

f – Frequência

m/s – metros por segundo (Unidade de Medida)

kg/m<sup>2</sup>.s-1 – Quiliograma por metro quadrado por segundo (Unidade de Medida)

$\rho$  - densidade

$\alpha$  - Ângulo do feixe incidente

$\beta$  - Ângulo do feixe refletido ou refratado

$v_i$  - Velocidade da onda no meio de incidência

$v_r$  - Velocidade da onda no meio de referência

$\theta$  - Ângulo de incidência do calço

k – fator que assume valores em função da intensidade sónica

mm – milímetros

A – Abertura ativa

n - é o número de elementos da sonda

p - passo entre os elementos do transdutor

W - comprimento do elemento piezocompósitos

V – Volts

dB – decibel

IIW - International Institute of Welding

AFNOR - Association Française de Normalisation

EN - European norm

SW - Surface Wave

ASNT - *American Society for Nondestructive Testing*

API - Instituto Americano de Petróleo





# Capítulo 1: Introdução

---

## 1.1 *Enquadramento e motivação*

Nas últimas décadas, as indústrias têm procurado, intensivamente, formas de fabricarem produtos com a máxima qualidade pelo menor preço, com o objetivo de se manterem competitivas no mercado mundial. Dos vários processos de fabrico a soldadura é um dos mais utilizados para a união de metais ou plásticos, sendo que perto de metade da produção nacional, na maioria dos países, está diretamente ou indiretamente relacionado com a soldadura [1,2]. Os processos de soldadura representam boa parte dos custos de fabricação de um produto e isso justifica os crescentes esforços para se obterem melhorias nesta área [3, 4].

A engenharia da qualidade, indubitavelmente, constitui-se numa ferramenta imprescindível no processo de qualquer indústria. É através dela que é possível procurar, não só a melhoria do processo, identificando problemas na produção, como também, evita que haja custos desnecessários para o fabrico. Estes podem, inclusive, inviabilizar a competitividade e a viabilidade económica de qualquer projeto a ser desenvolvido [5, 6].

Os ensaios não destrutivos (END) são um vasto grupo de técnicas de inspeção utilizadas na ciência, na indústria e na engenharia da qualidade para avaliar propriedades de materiais, componentes ou sistemas, sem lhes causar danos. São técnicas extremamente valiosas, pois como não alteram, de forma permanente, o estado do componente a ser analisado, permitem economizar tempo e dinheiro na avaliação, resolução de problemas, prevenção da ocorrência de falhas e investigação do produto. Têm aplicações nos setores petroquímico, químico, eletromecânico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, celulose, entre outros [7, 8]. Os END são técnicas utilizadas para a inspeção de produtos,

diferentes materiais e equipamentos nas suas etapas de fabricação [5], manutenção [9] e no seu acabamento final [10], assegurando a integridade e confiabilidade de um produto [8].

Permitem também, um melhor controlo do processo de fabricação, diminuindo os custos de produção mantendo o nível de qualidade uniforme e, em última análise, garantir a satisfação do cliente final. Desta forma, estes tipos de ensaios influenciam e apoiam estudos de fiabilidade e, portanto, todos os aspetos da vida de um produto em qualquer indústria [11]. Existem diversas técnicas para realizar os END em ambiente industrial, sendo de destacar as técnicas de radiografia e as de ultrassons (convencionais e de *Phased Array*) [12].

A técnica de ultrassom *Phased Array* tem sido cada vez mais empregada em diferentes segmentos da indústria, devido às suas vantagens quanto à segurança, resolução e velocidade, comparados a outras metodologias de inspeção como o ultrassom convencional e a radiografia [13]. O *Phased Array* pode substituir o ultrassom convencional com a vantagem de registo de 100% da inspeção, permite inspecionar soldaduras com vários ângulos a partir de um único varrimento, possibilita maior precisão na identificação de defeitos e aumento na confiabilidade e redução dos tempos de inspeção [5, 14].

O presente trabalho descreve uma metodologia de pesquisa e estudo acerca da máquina OmniScan MX2 da Olympus, que usa a tecnologia *phased array*, de forma a avaliar a capacidade de deteção e dimensionamento de descontinuidades internas do cordão de soldadura em placas de alumínio, procurando um melhor entendimento das funcionalidades do equipamento. Para os estudos efetuados neste trabalho, foi usada uma sonda (5L16-A10) de feixe angular juntamente com um calço (SA10 N55S) composto por 16 elementos e com uma frequência de 5 MHz.

## 1.2 *Objetivos*

O objetivo geral deste trabalho é estudar e conhecer a técnica de inspeção por meio do ensaio não destrutivo, através da técnica de ultrassom *Phased Array*, de forma a detetar descontinuidades/defeitos internos nos materiais a inspecionar.

Os objetivos específicos são:

- Obtenção de conhecimentos da técnica *Phased Array* e conteúdos relacionados com o ultrassom;

- Estudo do manuseamento da máquina OmniScan MX2 da Olympus;
- Calibração do equipamento;
- Detecção e dimensionamento de defeitos internos em cordões de soldadura em juntas de ligas de alumínio soldadas com diferentes processos de soldadura.

### **1.3 Disposição do trabalho**

A presente dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos.

No Capítulo 1 apresenta-se, de forma genérica o trabalho desenvolvido, os objetivos que se pretendem concretizar e a descrição da organização do documento.

No Capítulo 2 são abordados os principais temas do trabalho, nomeadamente a soldadura e os ultrassons, dando ênfase aos conceitos relacionados com cada um para uma melhor compreensão e enquadramento do estudo.

No Capítulo 3 é feita uma abordagem mais detalhada acerca da técnica de ultrassons com a tecnologia *Phased Array*, bem como todos os princípios e características específicas associadas.

No Capítulo 4 são descritos todos os procedimentos e materiais/equipamentos necessários para efetuar uma correta calibração do equipamento, para este ficar apto e as inspeções das placas serem bem sucedidas e os resultados viáveis. É também referenciada a verificação da qualidade da calibração em corpo de prova (placa com furos), bem como a descrição da metodologia experimental e todas as especificações dos parâmetros necessários á inspeção das placas, tal como a configuração dos transdutores e todos os aspetos relativos aos ultrassons.

No Capítulo 5 expõem-se os resultados obtidos e analisam-se as imagens obtidas através do *software* OmniPC da Olympus.

No Capítulo 6 encontram-se as principais conclusões alcançadas neste trabalho, além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2: Fundamentação Teórica

---

Neste capítulo apresenta-se uma descrição dos temas fulcrais deste trabalho: a soldadura e os ultrassons. Quanto à soldadura vai ser referida a sua importância a nível industrial bem como os processos de soldadura existentes e todas as suas características associadas. Serão também descritos os defeitos que surgem neste tipo de processos e quais as suas consequências na qualidade da soldadura. Seguidamente, expõem-se as propriedades do alumínio e das suas ligas, uma vez que é o material das placas a inspecionar.

No que diz respeito aos ultrassons vão ser abordados os princípios físicos e os fenómenos que os envolvem, bem como os tipos de técnicas e transdutores existentes, as variáveis que englobam esta técnica e as vantagens em relações a outros métodos não destrutivos.

### 2.1 *A soldadura e a sua importância na indústria*

#### 2.1.1 *Introdução*

Os processos de fabrico sempre se caracterizaram como elementos importantes dentro de um sistema produtivo, sendo responsáveis por boa parte das operações de transformação e agregação de valor dos bens produzidos. Alguns exemplos incluem o fabrico, soldadura, forjamento, fundição, laminagem, trefilagem e extrusão, além de vários outros [15].

Entre os exemplos anteriores, a soldadura aparece como um dos processos de fabricação mais empregados pelos diversos ambientes industriais e a sua importância está associada ao fato desta permitir a união dos materiais para a fabricação desde estruturas simples, como grades e portões, até a produção de componentes necessários para aplicações com alto grau de responsabilidade [2, 15, 16].

Na literatura existem várias definições de soldadura, tais como: “operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas e metalúrgicas” [2, 17, 18] ou “processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de ligação entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais” [2,17,19].

A *American Welding Society* (AWS) define a soldadura como o processo de junção que produz a coalescência dos materiais pelo seu aquecimento a elevados níveis de temperatura, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso de metal de adição [2,15].

A soldadura é o principal processo usado para a união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Entretanto, apesar de ser considerada classicamente como um processo de união, verifica-se que nos últimos anos vários processos de soldadura vêm a ser utilizados para a deposição de material sobre uma determinada superfície com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Tal aplicação caracteriza o que se chama de soldadura de revestimento [16, 20, 21].

Dentre todas estas aplicações, cada processo de soldadura recebe uma parametrização específica levando em consideração o metal de base, o tipo de junta a ser executada e a aplicação da peça produzida. Esta diversidade de aplicações estimula a busca de controlos sobre o processo de soldadura com o objetivo de procurar o máximo desempenho em todas as funções exercidas, uma vez que o aumento da competitividade em áreas como a indústria automóvel, aeronáutica ou metalomecânica, tornou-se imperativo o aperfeiçoamento deste método de ligação, de forma a garantir a qualidade dos produtos [2, 22, 23, 24]. Na Figura 1 estão expostas algumas das muitas aplicações da soldadura na atualidade.



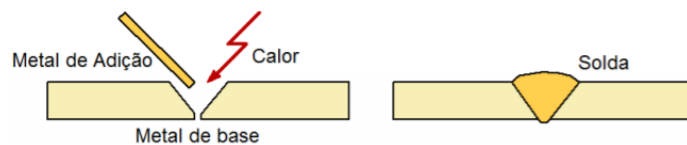
**Figura 1** - Aplicações da soldadura [25, 26, 27].

### 2.1.2 Processos de Soldadura

Atualmente existe uma grande diversidade de processos de soldadura, adaptados às diferentes necessidades, seja para a união primária, revestimento ou a manutenção de peças e/equipamentos, abrangendo uma variedade de materiais [2, 28, 29].

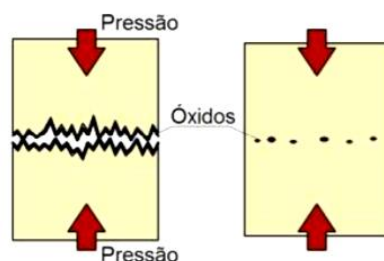
Os processos de soldadura podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia ou de acordo com a natureza da união. Pode-se dividir os processos de soldadura em dois grandes grupos: soldadura por fusão e soldadura no estado sólido [2, 30].

A soldadura por fusão é uma técnica de união que utiliza materiais iguais ou dissimilares que são aquecidos até ao seu ponto de fusão mediante uma fonte de calor, que pode ser termoquímica, elétrica (resistência elétrica, arco elétrico), mecânica (explosão) ou energia radiante (laser, feixe de eletrões), solidificando posteriormente. O metal fundido pode provir de peças a soldar caso sejam de pequena espessura ou pode incluir material proveniente de um fio-eléctrodo caso as chapas sejam espessas. Na Figura 2 está representado um esquema do processo de soldadura por fusão [30, 31, 32].



**Figura 2** - Representação esquemática da soldadura por fusão [33].

A soldadura no estado sólido inclui os processos que usam pressão para que os dois lados da junta estejam em contato a nível atômico, sendo isso conseguido através de deformação, difusão atômica ou a combinação dos dois. A ligação das peças ocorre a temperaturas inferiores à temperatura de fusão dos materiais base, em alguns casos, perto da temperatura ambiente e sem recurso a material de adição [2, 31, 34]. Na Figura 3 é possível visualizar, de forma esquemática, o processo de soldadura por pressão.

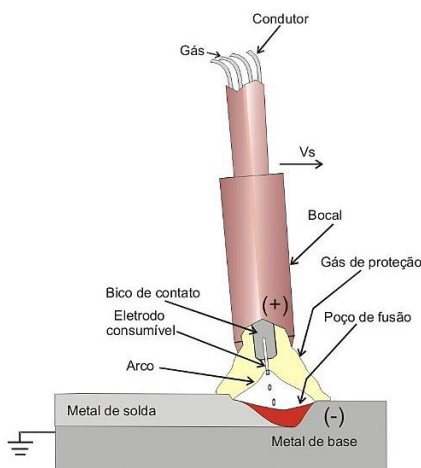


**Figura 3** - Representação esquemática da soldadura por pressão [33].

Dentre os processos de soldadura existentes vão ser apenas abordados os tipos de soldadura usados para unir as placas de alumínio inspeccionadas. São eles a soldadura MIG/MAG, soldadura TIG e soldadura for fricção (*Friction Stir Welding*).

### 2.1.2.1 Soldadura MIG/MAG

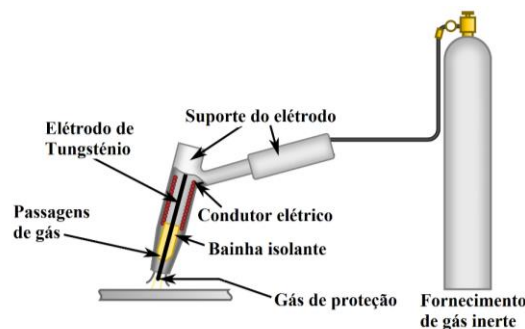
O processo de soldadura GMAW- *Gas Metal Arc Welding* ou MIG/MAG, como também é conhecido, tem como princípio de funcionamento a utilização de um arco elétrico para aquecer a superfície a ser soldada e um eletrodo metálico alimentado continuamente. O calor gerado pelo arco funde a ponta do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida dos efeitos nocivos do ar atmosférico, por intermédio de um gás de proteção, proveniente de uma fonte externa. A principal característica dos processos MIG/MAG é a proteção gasosa que envolve a atmosfera adjacente à poça de fusão. Esta proteção é obtida por um gás ou mistura de gases. Se o gás é inerte (Ar/He), o processo é chamado MIG (Metal Inert Gas), por outro lado, se o gás for ativo ( $\text{CO}_2$  ou misturas de Ar/ $\text{O}_2$ / $\text{CO}_2$ ), o processo é chamado MAG (Metal Active Gas). O processo MIG é usado para soldadura de diversos materiais como aços carbono, aços de baixo, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas magnésio e cobre. O processo MAG é usado na soldadura de aços de baixa liga [32, 36, 37]. O equipamento básico para utilização do processo MIG/MAG pode ser visto na Figura 4.



**Figura 4** – Representação esquemática da soldadura MIG/MAG [38].

### 2.1.2.2 Soldadura TIG

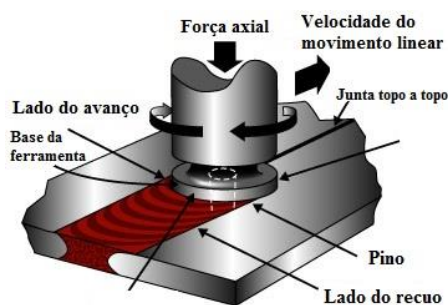
A soldadura GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*), mais conhecida por TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, normalmente o argon, ou mistura de gases (Ar e He). Pode ou não ser usado metal de adição. A soldadura TIG é mais utilizada para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas [32, 36, 37]. A Figura 5 mostra uma representação esquemática deste tipo de soldadura.



**Figura 5** - Representação esquemática do equipamento de soldadura TIG, adaptado de [39].

### 2.1.2.3 Soldadura por fricção

A Soldadura por fricção, (*Friction Stir Welding - FSW*) é um processo que utiliza uma ferramenta rotativa não consumível e provida de movimento linear que é usada para gerar calor através da sua fricção com as peças a soldar [40]. A energia calorífica resultante da fricção conduz ao amaciamento dos materiais a ligar, sem nunca atingir o seu ponto de fusão. Como resultado, o material sofre deformação plástica intensa sob a ação da ferramenta rotativa, sendo este arrastado pela ferramenta, sendo forjado por ação do pino e da base da ferramenta, e extrudido entre a ferramenta e o material mais frio. O escoamento dos materiais em torno do eixo da soldadura, promove a “mistura” no estado sólido dos materiais a ligar, originando a soldadura após arrefecimento. É conveniente referir que o processo não é simétrico em relação ao eixo da soldadura, pelo que se considera usualmente um lado do avanço, onde a ferramenta arrasta material para a frente, e um lado do recuo, onde o material é empurrado para trás [40, 41, 42, 43]. Na figura seguinte está a representação deste processo.



**Figura 6** – Representação esquemática do processo de soldadura por fricção, adaptado de [43].

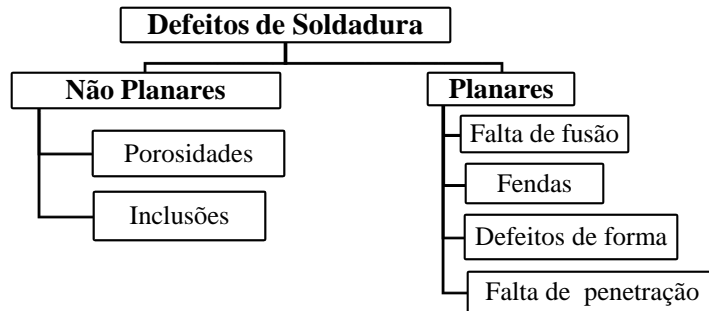
## 2.2 Defeitos na soldadura

Todos os processos de fabrico introduzem defeitos no material, e no processo de soldadura isso também acontece [44].

Os defeitos em soldadura podem estar relacionados com o próprio processo de soldadura e a sua realização, sendo por isso bastante importante uma escolha do processo de soldadura adequado a cada situação. Podem também ser originados pelo próprio projeto da junta que poderá não ser o mais adequado para o tipo de processo de soldadura utilizado, ou ainda por questões relacionadas com a metalurgia do material (base ou de adição) utilizado na realização da soldadura [44, 45, 46].

Os defeitos têm como característica a amplificação das tensões presentes nas soldaduras devido à redução da área resistente que a estes se encontra associada, ou seja, quanto maior o defeito, maior a redução da área resistente da soldadura e, conseqüentemente, menor a resistência da soldadura às solicitações. Por sua vez, estas discontinuidades apresentam diversas características que devem ser tidas em conta: a sua dimensão, a sua intensidade, orientação em relação à soldadura e a sua respetiva localização na soldadura [44, 45, 47].

Os defeitos podem assim dividir-se em dois grandes grupos: os planares e os não planares. Os defeitos planares são defeitos bidimensionais e separam os constituintes dos materiais que têm diferentes orientações cristalográficas e/ou diferentes estruturais cristalinas. Por outro lado, os defeitos não planares ou volumetricos, como o próprio nome indica, são defeitos que se apresentam no volume do sólido. A Figura 7 mostra a classificação dos defeitos de soldadura [44, 48, 49].

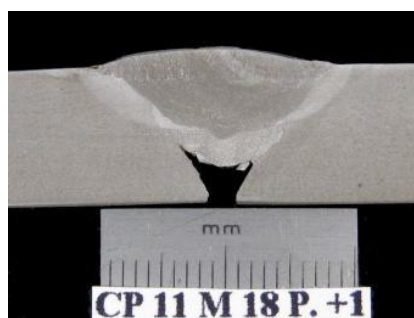


**Figura 7** - Defeitos na soldadura, adaptado de [44].

Dependendo do tipo de defeito, este poderá ocorrer na zona de fusão, na zona termicamente afetada (ZTA) ou no metal base. Há uma grande variedade de defeitos que podem comprometer a utilidade de uma junta soldada [48]. Os defeitos mais recorrentes no processo de soldadura são mencionados e explicados, sucintamente, de seguida.

### 2.2.1 Falta de penetração

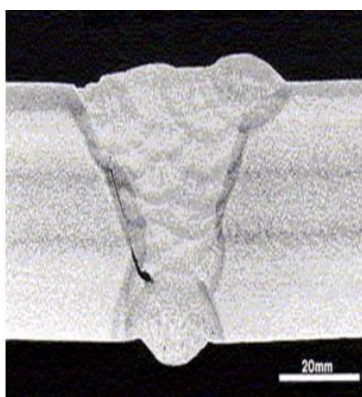
A falta de penetração é um defeito planar que consiste na falha na fusão do material, acontecendo geralmente na raiz da junta, dando origem a um espaço vazio entre os dois bordos da junta. Ocorre quando a espessura do metal base depositado é inferior à espessura das placas a unir, dando assim origem a um vazio. Pode também ocorrer devido a outros fatores, tais como a baixa temperatura de soldadura, geometria da junta desadequada, ângulo de posição da tocha incorreto, fraco controlo do arco elétrico ou elevada velocidade de soldadura. A falta de penetração é uma zona de concentrações de tensões que em grande parte dos casos inicializa fendas e está associada a carregamentos cíclicos originando falhas catastróficas da soldadura [32, 44, 50]. Este tipo de defeito é exibido na Figura 8.



**Figura 8** - Falta de penetração na raiz da solda [51].

### 2.2.2 Falta de fusão

A falta de fusão consiste na falta de ligação entre o material de adição e o material base ou caso não exista material de adição entre as duas peças a soldar. Este tipo de descontinuidade surge de técnicas de soldadura inadequadas, falta de preparação do material base, erro no formato da junta, falta de corrente de soldadura, falta de limpeza das juntas e o difícil acesso à junta. Uma vez que é uma zona de concentrações de tensões, pode facilitar a iniciação de fissuras, além de reduzir a seção efetiva do cordão de soldadura para resistir a esforços mecânicos [44, 52]. A Figura 9 mostra um exemplo da falta de fusão na parede lateral da soldadura.



**Figura 9** - Falta de fusão [53].

### 2.2.3 Fendas

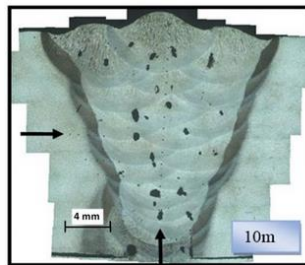
As fendas podem ocorrer no material de adição ou no material base quando a tensão de rotura do material é atingida. Geralmente estão associadas a concentrações de tensões junto às descontinuidades na soldadura e ao material base ou pela própria geometria do cordão de solda. As fendas podem ser classificadas como quentes ou frias dependendo do momento do processo em que ocorrem. As fendas quentes surgem a elevadas temperaturas durante ou imediatamente após a solidificação, apenas surgem na zona de fusão ou de fronteira com o material base nos limites de grão. As fendas frias desenvolvem-se após a solidificação resultando da concentração de tensões, propagando-se através e entre os grãos. As fendas podem ser longitudinais ou transversais em relação à soldadura, podendo ser de vários tipos consoante a sua orientação, localização e geometria [52, 54, 55]. Na Figura 10 está representada uma fenda na zona de fusão.



**Figura 10** - Fenda na zona de fusão [56].

#### 2.2.4 Inclusões

As inclusões são partículas que ficam retidas no interior da soldadura, ocorrendo com mais frequência as inclusões de escória, no entanto, poderão surgir inclusões de óxidos e inclusões metálicas. As inclusões surgem geralmente quando não se aplica as técnicas de soldadura adequadas para que a escória suba para a superfície da poça de fusão, dificuldades de acesso à zona da junta e a falta de limpeza das superfícies da junta, podendo esta estar contaminada com impurezas que irão dar origem a inclusões [52, 54, 55]. A Figura 11 mostra um exemplo de inclusão de escórias durante a soldadura.



**Figura 11** - Inclusão de escória [57].

#### 2.2.5 Porosidades

As porosidades são o tipo de defeitos mais frequente em todos os processos de soldadura, Figura 12. Trata-se de vazios na zona do cordão de soldadura, podendo encontrar-se à superfície ou na zona interior do cordão. As porosidades na soldadura são o resultado das bolhas de gás que ficam retidas no metal que está a solidificar, podendo ser causadas por técnicas de soldadura incorretas, materiais defeituosos, má limpeza da junta ou arco elétrico inadequado [52, 54, 55].



**Figura 12** – Porosidades [57].

### 2.2.6 Defeitos de forma

Os defeitos de forma consistem numa falha de conformidade geométrica do cordão para um perfil da própria peça a soldar. Os defeitos de forma dependem sobretudo da geometria da junta adotada, das especificações dimensionais utilizadas e da garantia de que estas são cumpridas durante o processo de soldadura. A maioria destes defeitos é independente do tipo de processo, podendo ocorrer em vários tipos de processos de soldadura, pois tratam-se de defeitos dimensionais [44, 58]. Na Figura 13 encontram-se exemplificados os defeitos de forma que podem existir durante o processo de soldadura.

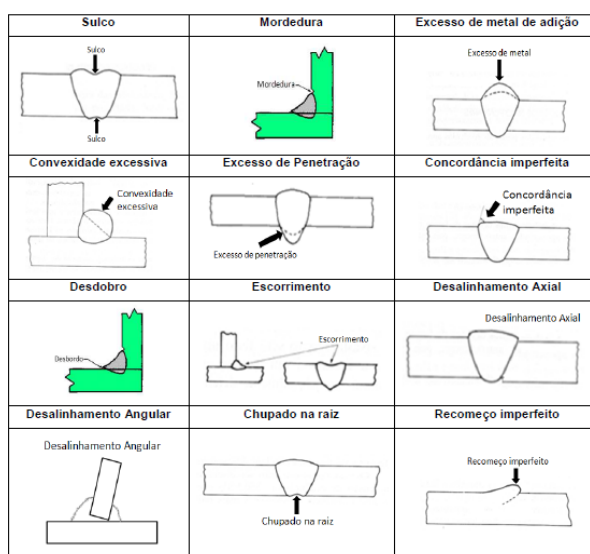


Figura 13 - Defeitos de forma na soldadura [44].

Como já foi referido anteriormente, o material usado nas placas a inspecionar foi uma liga de alumínio, por isso, é importante falar sobre esta e as suas propriedades.

### 2.3 Alumínio e as suas ligas

O desenvolvimento de novos materiais, visando melhorias de desempenho e redução de custos de fabricação e operação, tem-se vindo a acentuar e com isso a substituição dos materiais convencionais. No setor mecânico, as ligas ferrosas são as mais utilizadas e estão a ser, gradualmente, substituídas por compósitos, ligas de magnésio e ligas de alumínio, os quais apresentam boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão atmosférica, além de menor densidade [59, 60, 61].

O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, económicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. O alumínio é um metal de baixa

densidade ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), com cerca de um terço da densidade do aço, o que somado à sua elevada resistência mecânica o torna bastante útil na construção de estruturas móveis, como veículos e aviões [62]. Tem um baixo ponto de fusão,  $660^\circ$ , o que torna mais fácil a obtenção de ligas a partir deste metal. A boa resistência à corrosão, uma vez que os átomos da sua superfície se combinam com o oxigênio da atmosfera, formando uma camada de óxido protetor que impede a progressão da deterioração do material. Além disso, o alumínio com determinados tratamentos e/ou elementos de liga torna-se resistente à corrosão em meios mais agressivos. Tem ainda as vantagens de ser reciclável, não magnético, atóxico e exibe uma elevada deformabilidade. Apresenta, também, uma boa capacidade refletora, acima de 80%, para além de excelente condutibilidade térmica e elétrica [63, 64, 65, 66]. Para além destas características, as ligas de alumínio vêm a ganhar destaque devido ao preço inferior e ao processo de fabricação mais simples em comparação com outros materiais de características semelhantes [59].

Quanto às propriedades mecânicas, o alumínio puro (99,99% de pureza) no estado recozido apresenta uma excelente ductilidade, permitindo a produção de peças de formas bastante diversificadas. No entanto, ele apresenta uma baixa resistência mecânica, que é um fator que limita a sua aplicação industrial. O alumínio puro combinado com outros metais, tais como o cobre, manganês, magnésio, silício e o zinco, além de pequenas adições de cromo, ferro, níquel, vanádio, titânio e lítio, aliado ao tratamento mecânico ou termomecânico, produz ligas que apresentam alta resistência mecânica, dureza e ou tenacidade, sendo tão elevadas quanto a dos aços estruturais, com a grande vantagem de serem mais leves. Este facto ampliou a utilização do alumínio e das suas ligas em diversas áreas da atividade industrial, tais como a indústria aeroespacial, automóvel, ferroviária, naval e também na construção de pontes [65, 66, 67, 68].

A maioria das ligas de alumínio podem ter as suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional ou resistência à corrosão, melhoradas por meio de tratamentos térmicos, que são realizados visando remover ou reduzir as segregações e controlar algumas características metalúrgicas. O tipo de tratamento térmico a ser realizado depende, muitas vezes, das propriedades desejadas na peça fundida [69, 70].

As ligas de alumínio ainda podem ser divididas entre as tratáveis e as não tratáveis termicamente [69, 70].

As ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica [69, 70].

As ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a outros tratamentos térmicos como o de estabilização e recozimentos plenos ou parciais. No sistema proposto pela Aluminum Association (1984), as ligas de alumínio são identificadas por um número de quatro dígitos: o primeiro dígito identifica os principais elementos de liga e os três últimos, o grau de pureza e/ou composição química da liga [69,70,71], como pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Sistema de designação conforme a norma da ABNT NBR 6834, adaptado de [69].

SIGLA	COMPOSIÇÃO
1xxx	Alumínio puro não ligado com no mínimo de 99% de alumínio
2xxx	Ligas que contêm cobre como elemento de liga principal
3xxx	Ligas que contêm manganês como elemento de liga principal
4xxx	Ligas que contêm silício como elemento principal
5xxx	Ligas que contêm magnésio como elemento principal
6xxx	Ligas que contêm magnésio e silício como elementos principais
7xxx	Ligas que contêm zinco como elemento de liga principal
8xxx	Ligas cujas composições apresentam diferentes elementos com estanho ou Lítio
9xxx	Reservada para uso futuro

Algumas das principais aplicações do alumínio são exibidas na Figura 14.



**Figura 14** - Aplicações das ligas de alumínio [72].

### *2.3.1 Soldabilidade das ligas de alumínio*

Apesar do alumínio e as suas ligas hoje representarem uma grande parcela da matéria-prima utilizada no fabrico de diversos produtos, no que diz respeito à soldadura, o alumínio apresenta alguns aspetos particulares que dificultam a mesma. Neste sentido, os principais aspetos a serem considerados são o calor específico, a condutibilidade térmica, a solubilidade do hidrogénio, a camada de óxido, as alterações estruturais e o desenvolvimento de fissuras [67, 68, 69].

#### *2.3.1.1 Calor específico e condutibilidade térmica*

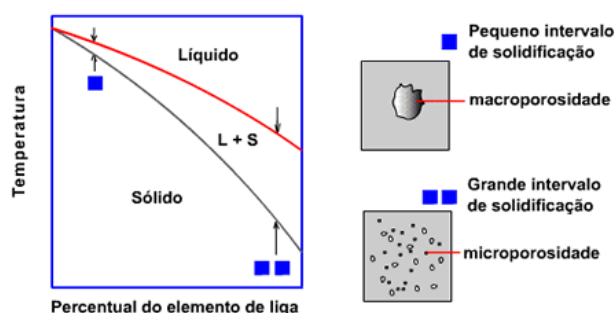
Embora a temperatura de fusão do alumínio seja consideravelmente menor que a das principais ligas ferrosas, devido ao calor específico associado à elevada condutibilidade térmica deste material, a quantidade de calor necessária à soldadura do alumínio pode ser igual ou superior à utilizada para o aço [67, 68, 69].

Esta condição torna-se um fator agravante, uma vez que o alumínio apresenta um coeficiente de expansão térmica duas vezes superior ao do aço, apresentando contração volumétrica durante a solidificação em torno dos 6%. Desta forma, torna-se bastante crítica e frequente a ocorrência de distorções geométricas, especialmente no caso de juntas altamente restringidas, como na grande maioria dos casos da estrutura soldada, aumentando a necessidade por processos que possibilitem menor inserção de calor, porém, sem prejuízo na qualidade da junta [68]. As fissuras também são resultado das tensões geradas pela soldadura devidoo à elevada expansão térmica e conseqüente contração térmica na solidificação. Outro fator importante é a condutividade térmica do alumínio e as suas ligas que, por ser elevada, torna-se um problema na soldadura. Esta propriedade pode levar a problemas característicos no início do cordão de solda com aparência insatisfatória, penetração insuficiente e reforço excessivo [68, 69, 70].

#### *2.3.1.2 Solubilidade do hidrogénio*

A solubilidade do hidrogénio sofre mudanças drásticas quando o alumínio passa do estado líquido para o estado sólido, gerando uma espécie de espuma durante a solidificação. Altas velocidades de soldadura podem favorecer a formação de porosidade da junta soldada. Na maioria dos casos esta transformação é acompanhada por um aumento da densidade, onde há uma contração. Como resultado, surgem poros no material, que podem ser de dois tipos: macro porosidades e micro porosidades. As condições para o

surgimento de micro ou macro porosidades depende do fator de dependência em relação ao intervalo de solidificação [68, 70, 73], tal como se pode ver na Figura 15.



**Figura 15** - Efeito do intervalo de solidificação na contração [73].

### 2.3.1.3 Camada de óxido

A principal influência da formação do óxido na soldabilidade do alumínio está relacionada com a grande diferença entre o seu ponto de fusão (2052°C) e o ponto de fusão do alumínio (660°C). Este facto significa, que tentar soldar o alumínio sem primeiro remover o filme óxido, resulta na fusão do metal base bem antes da fusão do óxido, podendo gerar defeitos como a falta de fusão localizada e a inclusão de óxidos na união. Além disso, a baixa condutividade térmica do óxido pode dificultar o fluxo de calor e contribuir para a falta da ligação dos materiais [68, 67, 73].

### 2.3.1.4 Aporte térmico, alterações estruturais e desenvolvimento de fissuras

Na grande maioria dos processos de soldadura a severidade do ciclo térmico imposto à junta soldada torna-se um fator crítico, quando são consideradas as possibilidades de alterações estruturais. Estas por sua vez, podem levar à redução ou à perda de propriedades adquiridas em tratamentos anteriores, ou ainda influenciar diretamente nos mecanismos de desenvolvimento de defeitos de soldadura [68, 69, 71, 73].

No caso particular da soldadura do alumínio e das suas ligas, dependendo de tratar-se de uma liga tratável ou não tratável termicamente, obtém-se resultados diferentes após a realização da soldadura e cada caso deve ser tratado isoladamente [73].

Relativamente ao aporte térmico (quantidade de energia gerada pelo processo de soldadura) na soldadura das ligas tratáveis termicamente, é importante considerar a suscetibilidade ao desenvolvimento de trincas a quente (fissuração formada a altas

temperaturas perto do estado sólido de metal, onde o metal tem coerência, mas é completamente frágil) ou de liquação (fissuras intergranulares que ocorrem em regiões aquecidas a temperaturas próximas da solidificação do metal base, e que são associadas com a formação, por diferentes causas, de bolsas de material líquido nesta região) [67, 69, 71, 73].

O desenvolvimento de fissuras na zona termicamente afetada nas ligas tratáveis termicamente tem sido atribuído, em alguns casos, à influência do aporte térmico na elevação da temperatura *solidus* (temperatura abaixo da qual o material é completamente sólido) do metal da solda, ocasionando a solidificação deste antes da solidificação de fases de baixo ponto de fusão que eventualmente podem formar-se na zona fundida e na zona termicamente afetada [67, 71, 73].

No caso das ligas não tratáveis termicamente, embora não alcancem os níveis de resistência mecânica das ligas tratáveis termicamente, a ausência de elementos de liga responsáveis pela formação de precipitados (formação de um sólido durante a reação química) reduz a suscetibilidade ao desenvolvimento de fissuras a quente na zona fundida e ZTA. Este facto traduz-se numa vantagem que favorece a soldadura destas ligas [67, 69, 74].

Neste grupo de ligas, o principal efeito do ciclo térmico imposto pelo processo de soldadura é o recozimento da ZTA, que induz a perdas localizadas de dureza, de resistência mecânica e ao aumento da ductilidade. Estas condições podem ser benéficas no comportamento mecânico da junta soldada, pois favorecem o aumento na capacidade de deformação da junta e, conseqüentemente, o alívio das suas tensões residuais. As juntas soldadas das ligas de alumínio pertencentes a este grupo devem, portanto, ser projetadas considerando o limite da sua resistência na condição recozida [67, 73, 74].

Embora menos suscetíveis a fissuras, as ligas de alumínio não tratáveis termicamente não podem ser consideradas imunes ao desenvolvimento deste tipo de defeitos [67, 73, 74].

A ocorrência de fissuras a quente na região fundida e fissuras de liquação na ZTA são fortemente dependentes dos níveis de tensões residuais desenvolvidos e estes, por sua vez, serão tanto maiores quanto maior a quantidade de calor inserida pelos processos de soldadura [67, 73, 74].

## 2.4 *Ensaaios mecânicos*

Atualmente, num mercado consumidor extremamente exigente e carente de objetos que facilitam a vida, é indispensável produtos eficientes e duráveis [75].

Por muitos séculos, a única maneira de testar se um produto cumpria as suas funções e vida útil, era com o seu próprio uso. Isso acarretava inúmeros transtornos, tais como perda de matéria-prima, tempo e dinheiro. Entretanto, com a expansão do capitalismo e industrialização, criou-se uma padronização na produção dos bens de consumo, o que permitiu estabelecer normas que garantissem os pré-requisitos dos mesmos, isto é, o controlo de qualidade [75].

A utilização de ensaios destrutivos ou não destrutivos é comum na indústria moderna, tendo em vista a garantia da qualidade dos produtos e obviamente a sua fiabilidade no uso dos mesmos. O controlo de qualidade precisa de começar pela matéria-prima e deve ocorrer durante todo o processo de produção, incluindo a inspeção e os ensaios finais nos produtos acabados. Os ensaios mecânicos são divididos em duas categorias: destrutivos e não destrutivos [75, 76].

### 2.4.1 *Ensaaios não destrutivos*

A substituição da avaliação de produtos e equipamentos por técnicas não destrutivas em detrimento de técnicas destrutivas é um facto incontestável, do ponto de vista económico, atendendo aos custos cada vez mais elevados de matérias-primas e, em termos de fiabilidade do produto, atendendo à capacidade crescente da sensibilidade de deteção de discontinuidades e defeitos em peças/equipamentos, contribuindo para a avaliação do balanço de custos, ponderando-se a integridade e necessidade de substituição ou reparação dos itens em causa [80, 81].

Os ensaios não destrutivos também permitem um melhor controlo do processo de fabricação, diminuindo os custos de produção, mantendo o nível de qualidade uniforme, e em última análise garantir a satisfação do cliente final. Assim os END influenciam e apoiam estudos de fiabilidade e, portanto, todos os aspetos da vida de um produto em qualquer indústria.

Os END consistem na aplicação de metodologias e técnicas de ensaio que visam analisar a sanidade de vários tipos de materiais, peças ou mesmo equipamentos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros. Deste modo é possível detetar falta de

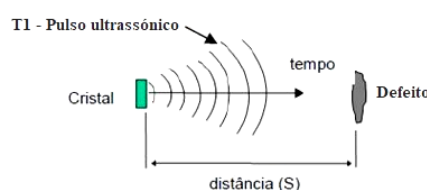
homogeneidade e defeitos através de princípios físicos definidos, sendo que ensaios não intrusivos não provocam qualquer alteração nos mesmos [80, 81]. Através desta técnica de ensaios é possível realizar todas estas verificações sem prejudicar as suas propriedades, tendo sido definida pela *American Society for Nondestructive Testing* - (ASNT) como “A aplicação de metodologias de teste para examinar um objeto, material ou sistema sem prejuízo das suas propriedades, performance ou utilidade futura” [82].

Tendo início nos primórdios da civilização, os END, passaram de uma simples aplicação laboratorial para uma importante ferramenta a nível industrial, tendo-se verificado o maior salto durante a segunda Guerra Mundial. Este desenvolvimento deve-se ao aparecimento de novas tecnologias e matérias de fabrico, resultantes do grande avanço a nível industrial durante a primeira metade do séc. XX. Com o aperto das regras de segurança e com a qualidade exigida nos produtos para a deteção de novos defeitos, resultantes de todo este avanço tecnológico, foi necessário criar e explorar novas e melhores tecnologias de END [80, 81, 82].

## 2.5 *Ultrassom*

### 2.5.1 *Princípio físico do ultrassom*

Os materiais sólidos são bons condutores de ondas sonoras. O princípio básico do ultrassom em ensaios não destrutivos é caracterizado pela técnica pulso-eco. O aparelho produz um pulso no instante (T1), onde o feixe sonoro utilizado no ensaio é transmitido ao material através da produção de ondas sonoras de um cristal (piezoelétrico) excitado por um campo elétrico que por sua vez origina um efeito oscilatório de volume no mesmo, ou seja, a produção de ondas mecânicas (sonoras) com a frequência desejada. Ao incidir numa descontinuidade (interface), Figura 16, que se encontra na distância (S), as ondas sonoras retornam para o cristal, gera-se o efeito inverso, onde a onda sonora provoca uma distribuição de cargas elétricas no cristal, que gera um campo elétrico medível e enviado para o equipamento, originando um sinal elétrico de alta frequência que é representado pelo eco de reflexão na tela do aparelho de ultrassom [83, 84], Figura 17.



**Figura 16** - Emissão do sinal ultrassônico, adaptado de [84].

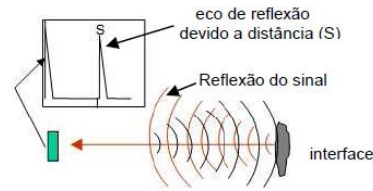


Figura 17 - Reflexão do sinal ultrassônico [84].

A introdução de frequências variáveis permite selecionar o comprimento de onda ajustados à sensibilidade de detecção desejada. Um menor comprimento de onda acompanha um aumento da sensibilidade na detecção de pequenas discontinuidades. A seleção da frequência permite também ajustar o ensaio aos diversos tipos de materiais e à sua estrutura. Conclui-se então que o ensaio deve ser realizado com feixes sonoros de alta frequência, sendo que, para inspeções de materiais não metálicos, são utilizadas frequências entre 50 kHz a 100 kHz, enquanto que para a inspeção de materiais metálicos são utilizadas frequências entre 0,5 MHz a 10 MHz [80].

Os feixes sonoros de alta frequência são normalmente refletidos pela superfície oposta da peça (se as superfícies da peça forem paralelas), chamados os ecos de fundo, ou então, são refletidos pelos defeitos ou descontinuidade presentes no material a inspecionar. Estes feixes sonoros são captados pelo transdutor e devido à incompatibilidade acústica do feixe sonoro que é refletido pelo defeito da peça e o que é refletido pelo final da peça (eco de fundo), permitindo determinar que a peça se encontra com um defeito. A Figura 18 mostra um esquema que representa a inspeção por ultrassom [80, 82, 83, 85].

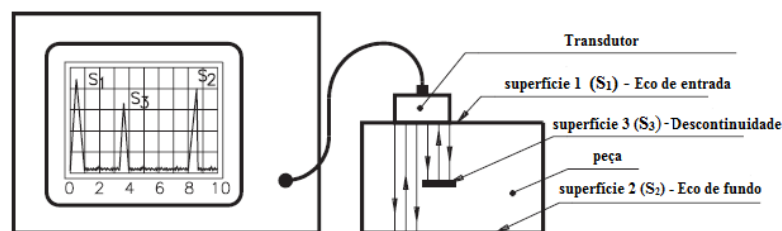


Figura 18 – Representação esquemática do método de inspeção por ultrassom [86].

### 2.5.2 Modo de propagação das ondas sonoras

Os materiais são constituídos de átomos dispostos em posições determinadas pelas forças de atração e repulsão existentes, quer interatómicas ou intermoleculares. A natureza das forças restituidoras da posição de equilíbrio determinará os modos de propagação

possíveis no material, tanto no interior de seu volume quanto próximo à sua superfície [80].

Nos materiais sólidos a densidade é muito elevada comparada com os líquidos e com os gases, ou seja, a distância entre os átomos é muito pequena. Para além disso, os átomos estão "arranjados" ou "arrumados" numa rede cristalina e as forças de ligação entre eles são muito fortes [80, 87]. Devido a estes factos, o som pode propagar-se de várias formas nos materiais sólidos, cada um com as suas características e sobretudo com uma velocidade própria e impedâncias acústicas diferentes. Nos gases as ondas sonoras são transmitidas através da compressão ou rarefação das moléculas no sentido de propagação [80, 87]. Nos sólidos a densidade é maior, as distâncias moleculares são menores e as forças de coesão são extremamente elevadas, principalmente em função das estruturas cristalinas organizadas, facto que possibilita as ondas sonoras se propagarem nos sólidos em quatro diferentes modos [80, 83, 87]. A Figura 19 exhibe os diferentes meios de propagação sonora.



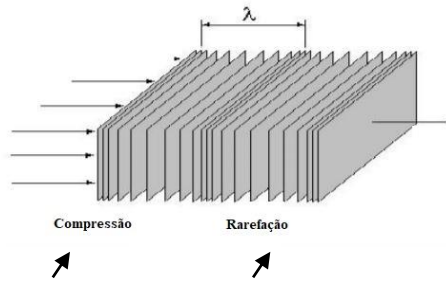
Figura 19 - Diferentes meios de propagação sonora [80].

#### 2.5.2.1 Tipos de ondas sonoras

Em materiais sólidos as ondas podem se propagar de quatro modos diferentes, tendo em consideração o deslocamento de partículas que compõem o meio em que a onda se está a propagar. As ondas ultrassónicas podem ser classificadas em ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais e ondas de Lamb [80, 83, 87].

- Ondas longitudinais

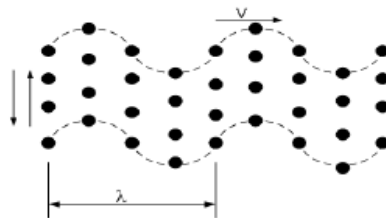
As ondas longitudinais são também chamadas de ondas de compressão com larga aplicação nas inspeções industriais. Estas ondas percorrem o material por uma série alternada de compressão e rarefação nas quais as partículas transmitem a vibração de um lado para o outro na direção de propagação da onda [83,85,87,89]. Uma representação esquemática das ondas longitudinais é mostrada na Figura 20.



**Figura 20** - Representação da propagação de uma onda longitudinal, adaptado de [87].

- Ondas transversais

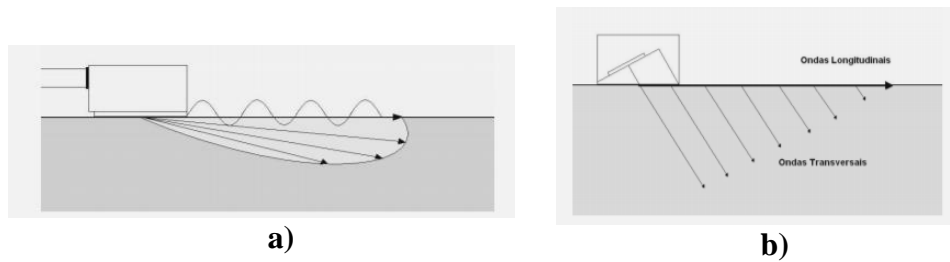
As ondas transversais também são muito utilizadas nas aplicações industriais. São conhecidas como ondas de corte, pois o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda. Para a propagação deste tipo de onda é necessária a existência de uma força de coesão entre as partículas vizinhas, portanto em meios gasoso e líquidos este tipo de onda não se pode propagar em virtude da pequena força de coesão entre as partículas que compõem estes meios [85, 87, 88]. A Figura 21 mostra a representação da propagação de uma onda transversal.



**Figura 21** - Representação da propagação de uma onda transversal [87].

- Ondas superficiais

Este tipo de onda propaga-se ao longo da interface de um corpo sólido e um gás (ar). Podem ser detetadas pequenas fissuras superficiais e discontinuidades que estão localizadas na superfície do componente a ser inspecionado. Podem ser utilizadas para realizar a inspeção de componentes com geometria complexa, desde que se avalie as condições de reflexão nas extremidades, pois podem gerar sinais que dificultem a análise de resultados. Existem dois tipos de ondas superficiais: as ondas de *Rayleigh* que são geradas quando uma onda transversal se desloca na superfície e as ondas de *Creeping* que são obtidas através da onda longitudinal na superfície [80, 85, 89, 90]. A Figura 22 ilustra a propagação de uma onda superficial de *Rayleigh* e de *Creeping*.

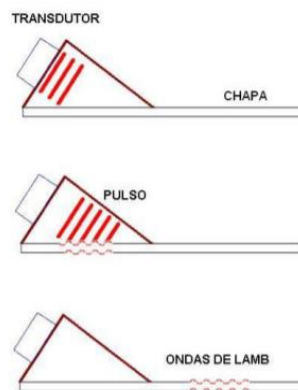


**Figura 22** - Ondas superficiais. a) Onda superficial de *Rayleigh*; b) Onda superficial de *Creeping* [90].

- Ondas de *Lamb*

Este tipo de onda consiste numa vibração complexa das partículas ao longo da espessura do material inspecionado. As ondas de *Lamb* estão associadas aos modos de propagação das estruturas, sendo também conhecidas como ondas de placas, e referem-se às perturbações elásticas que se propagam num material sólido (chapas, placas, etc.) com as interfaces ou contornos livres. A espessura do material deve ser da ordem de grandeza dos comprimentos de onda presentes. Nestas ondas, a movimentação da partícula ocorre tanto na direção de propagação quanto perpendicularmente ao comprimento do material [87, 89, 90].

As ondas de *Lamb* são constituídas de superposições de ondas longitudinais e transversais numa chapa fina e as características da propagação dependem intensamente das condições de contorno, tais como ângulo de incidência, forma de excitação, frequência central do transdutor, largura de banda e geometria do material. Os modos são denominados em função do movimento característico de suas partículas como ilustrado na Figura 23, podendo ser simétricos ou antissimétricos [85, 87, 89, 90].



**Figura 23** - Modos de propagação das ondas de *Lamb* [90].

### *2.5.3 Propagação das ondas acústicas no material*

#### *2.5.3.1 Atenuação acústica*

A onda sonora ao percorrer um material qualquer sofre, na sua trajetória, dois efeitos distintos, a dispersão e a absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer um material qualquer. Ambas as componentes da atenuação impõem limitações aos ensaios [91].

O fenómeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. A absorção deve-se à conversão de energia mecânica inerente à vibração das partículas sobre a forma de calor. Este fenómeno limita a energia transmitida, podendo absorver completamente o eco de uma descontinuidade. Este efeito pode ser contornado aumentando a tensão na sonda ou amplificando os sinais, ou então explora-se a menor absorção nas baixas frequências [80, 82, 83, 91].

A dispersão deve-se ao facto da matéria não ser totalmente homogénea, contendo interfaces naturais na sua própria estrutura ou processo de fabricação. A dispersão acaba por ser um efeito mais incómodo, pois mesmo nos casos em que não à redução significativa da altura do eco do defeito, originam-se numerosos ecos com tempos de chegada diferentes, nos quais os ecos de interesse se podem perder. Este distúrbio não pode ser contornado por aumento da tensão do transdutor ou da amplificação, dado que com o aumento destes se verifica um aumento simultâneo dos ecos sem interesse. Uma solução passa por baixar a frequência, contudo a detetabilidade dos pequenos defeitos diminui [82, 83, 87, 88].

O resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somados resultam na atenuação sónica. Na prática, este fenómeno pode ser visualizado, quando se observa na tela do aparelho de ultrassom, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda. O espalhamento da onda sónica causado pelos contornos de grão é fortemente dependente da relação entre o tamanho de grão e o comprimento de onda do ultrassom. A Figura 24 mostra a diferença da atenuação sónica em estruturas com grãos distintos [83, 91, 92, 93].

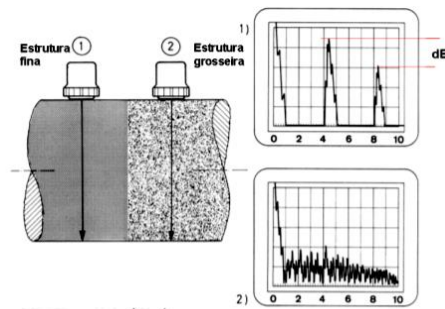


Figura 24 - Atenuação sonora em estruturas com grãos distintos [83].

### 2.5.3.2 Impedância acústica

O comportamento de uma onda quando incide na interface de dois materiais diferentes é fundamental num ensaio de ultrassons. Quando uma onda encontra uma mudança de meios pode ser transmitida, refletida, refratada, atenuada ou sofrer uma conversão de modo [83, 87, 91]. Quando uma onda sonora se propaga num determinado material e atinge um outro material (por exemplo, quando um feixe sonoro é aplicado num aço e atinge uma escória), parte da energia sonora continua a sua trajetória e parte é refletida na interface entre os dois materiais. Para incidência normal, a quantidade de energia sonora que será refletida e transmitida na interface dos dois materiais é a função das impedâncias acústicas dos dois materiais. Caso as impedâncias acústicas sejam similares não haverá reflexão. Quanto maior a diferença entre elas maior será a reflexão na interface [91, 93, 94, 95].

A impedância acústica,  $Z$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] é definida como o produto da densidade ( $\rho$ ) do material pela sua velocidade acústica ( $C$ ) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para um meio [94, 95], representada pela Equação 1:

$$Z = \rho \times C \quad (1)$$

À incidência de uma onda num meio está associada uma certa pressão acústica,  $P_i$ , bem como à transmissão,  $P_t$  e à reflexão  $P_r$  [94, 95], Figura 25.

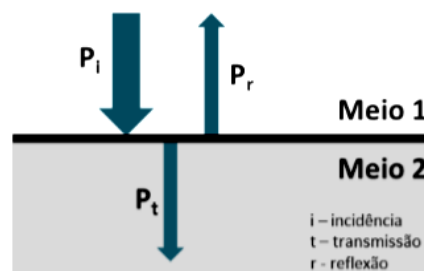


Figura 25 - Incidência perpendicular duma onda, transmissão e reflexão [94].

Quando a incidência for oblíqua, os fenômenos de conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação da onda transmitida) devem ser considerados. Os ângulos das direções de propagação das ondas são medidos em relação à direção normal à superfície de incidência, e seus valores são dados pela lei de Snell [91, 94, 95], que os relaciona com a velocidade de cada onda no seu meio através da Equação 2.

$$\frac{\text{sen}(\alpha)}{v_i} = \frac{\text{sen}(\beta)}{v_r} \quad (2)$$

Onde:

$\alpha$  - Ângulo do feixe incidente [radianos];

$\beta$  - Ângulo do feixe refletido ou refratado [radianos];

$v_i$  - velocidade da onda no meio de incidência [m/s];

$v_r$  - Velocidade da onda no meio de referência, no qual foi refletida ou refratada [m/s].

Conhecidas as velocidades das ondas nos meios e o ângulo de incidência, calculam-se, pela lei de *Snell*, os ângulos das ondas refletidas e refratadas. Semelhantemente, é possível determinar os ângulos de incidência para os quais as ondas refratadas longitudinais e transversais tangenciam a superfície [82, 91, 95, 96]. Estes ângulos são denominados primeiro e segundo ângulos críticos, respectivamente, e servem de referência para a construção de transdutores angulares quando se deseja apenas um modo de propagação presente na peça, a fim de facilitar a interpretação dos sinais gerados. A lei de Snell, é representada na Figura 26, onde  $\theta$  é o ângulo de incidência do calço. Esta avaliação é muito utilizada no projeto de sondas ultrassônicas [82, 91, 96].



**Figura 26** - Representação das variáveis da lei de Snell na inspeção por ultrassom [91].

#### *2.5.4 Variáveis do Ensaio de ultrassom*

Para o ensaio por ultrassom ser validado é necessário tomar algumas precauções e etapas sequenciais. Variáveis como o procedimento de calibração, frequência de inspeção, tipo de transdutor, velocidade do meio, entre outras, influenciam diretamente os resultados obtidos e, portanto, devem ser determinadas previamente à realização da inspeção [97].

##### *2.5.4.1 Calibração*

A calibração é uma das etapas mais importantes do ensaio por ultrassom, uma vez que permite a avaliação e o ajuste da precisão e da exatidão do equipamento a ser utilizado. Um mesmo equipamento de ultrassom pode ser utilizado para a inspeção de inúmeros materiais diferentes, e, portanto, cada inspeção possui características próprias que devem ser adequadas. A calibração permite ajustar vários parâmetros, até que os ecos de reflexão permaneçam em posições definidas na tela do equipamento, correspondentes ao caminho do som no bloco padrão [91, 97, 98].

##### *2.5.4.2 Blocos padrão*

Os blocos padrão, também denominados blocos de referência ou blocos de calibração, possuem descontinuidades no seu interior, onde todas as dimensões e descontinuidades são conhecidas, onde o controle dos atrasos e das velocidades podem ser calculados, em conjunto com os ecos de reflexão até que permaneçam na posição desejada na tela do equipamento de ultrassom. É importante que o bloco seja construído no mesmo material a ser inspecionado, pois as posições dos ecos de reflexão são dependentes da velocidade de propagação da onda ultrassônica, que é uma característica específica de cada meio [91, 97, 98].

Existem diversos blocos de calibração para os diferentes ensaios não destrutivos, cada qual com a sua função, e muitas empresas que os comercializam. Os blocos padrão para calibração de espessuras são lisos (ou curvos para aplicações de tubos ou tubagens) e consistem em simples variações de espessura no material. Existem ainda blocos padrão para a calibração de sondas angulares que usam furos laterais, entalhes e configurações geométricas para estabelecer relações de distância, tempo e amplitude. Na Figura 27 estão representados exemplos de blocos padrão para os diferentes tipos de aplicações [7, 91, 99].



**Figura 27** - Blocos padrão para diferentes aplicações [7, 91].

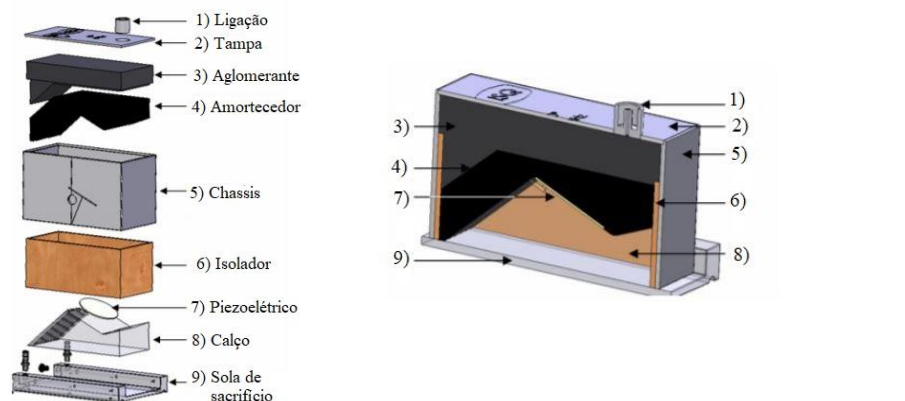
### 2.5.5 Transdutores ultrassônicos

De uma forma geral, são dispositivos que recebem um sinal e o retransmitem, independentemente da conversão de energia [94, 98].

A execução de ensaios ultrassônicos dá-se através de transdutores, que são formados por cristais piezoelétricos que são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor), por eletrodos e por uma armação externa e, em alguns casos, por um calço.

O principal elemento de um transdutor ultrassônico é o cristal piezoelétrico, que se caracteriza pela propriedade de transformar energia elétrica em mecânica ou vice-versa, ou seja, o cristal quando submetido a uma pressão gera um campo elétrico que pode ser recolhido como tensão elétrica. Desta forma, quando se aplica energia elétrica ao sensor, o cristal vibra. As vibrações comprimem e expandem moléculas de ar em ondas, desde a face do sensor até o objeto alvo, calculando a distância entre ambos [94, 98, 99, 100].

Fatores como sensibilidade e poder de penetração dependem diretamente do transdutor a ser utilizado na inspeção. É o transdutor que define qual será a frequência de inspeção e o modo de propagação da onda gerada. Por este motivo, é importante o cuidado direcionado à escolha do tipo de transdutor para cada tipo de ensaio [98, 99, 100]. Na Figura 28 estão representados os principais elementos constituintes de um transdutor.



**Figura 28** - Elementos constituintes de um transdutor [100].

Na Tabela 2 estão apresentados os elementos constituintes do transdutor bem como as suas respectivas funções.

**Tabela 2** - Funções dos elementos constituintes de um transdutor [100].

Elementos do transdutor		Funções
5)	Chassis	- Suporta as cargas e protege todos os elementos interiores; - Permite a ligação ao mecanismo de funcionamento automático.
6)	Isolador	- Isola acusticamente os elementos do exterior; - Assegura a fixação do calço ao chassis por aperto.
8)	Calço	- Suporta o piezoelétrico; - Propaga o som desde o piezoelétrico até ao material.
4)	Amortecedor	- Absorve o som emitido pela face oposta ao calço; - Contribui para a paralisação do piezoelétrico em eco pulsado; - Absorve ecos parasitas que poderiam mascarar ecos relevantes.
3)	Aglomerante	- Envolve a bobina, os condutores e cola a tampa; - Preenche o espaço vazio no interior da sonda.
2)	Tampa	- Suporta a ligação e fecha o interior da sonda.
9)	Sola de sacrifício	- Protege a superfície de contacto do calço; - Permite manter continuamente a presença de líquido acoplante.
7)	Piezoelétrico	- Emite e recebe impulsos sonoros.
	Bobina	- Anula a capacitância estática do piezoelétrico; - Atenua o zunido do piezoelétrico; - Reduz o ruído do sinal.
1)	Ligação	- Conecta a sonda ao dispositivo de geração e análise de sinal.

Os transdutores podem ser classificados de acordo com a sua aplicação ou com o tipo de onda gerada.

Quanto à sua aplicação podem ser:

- **Transdutores de contacto**

São usados para inspeções de contacto direto, automatizadas ou não, portanto devem possuir uma geometria adequada à sua manipulação. A estrutura externa destes transdutores deve ser de material que apresente boa performance sob esforços mecânicos, principalmente abrasivos [95, 98, 100, 101]. Na Figura 29 está representado um transdutor de contacto.



**Figura 29** - Transdutor de contacto [102].

- **Transdutor de imersão**

Este tipo de transdutores é projetado para operar num ambiente líquido, de forma a não entrarem em contacto com a peça a ser inspecionada. Frequentemente são empregados em tanques de água, por isso todas as suas ligações são à prova de água. A Figura 30 ilustra este tipo de transdutores [95, 98, 100, 101, 103].

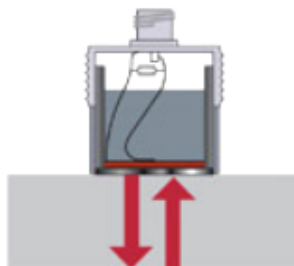


**Figura 30** - Transdutores de imersão [102].

Quanto ao tipo de onda gerada podem ser:

- **Transdutores normais ou retos**

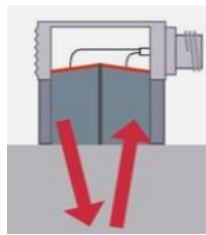
O transdutor normal ou reto são transdutores monocristais que geram ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento. Consiste num cristal piezoelétrico colocado entre uma cunha, paralela à superfície do material de inspeção e um bloco rígido (amortecedor) [83, 95, 101, 103]. A função da cunha é simplesmente de impedir o contato direto do cristal com a superfície do material a ser inspecionado, que o protege contra o desgaste mecânico, o que pode danificá-lo. O amortecedor é empregado com a finalidade de absorver as vibrações emitidas pela face do cristal com a qual ele entre em contato, de forma que estas sejam direcionadas apenas para o material a ser inspecionado [83 ,95, 103]. A Figura 31 apresenta a configuração deste tipo de transdutor.



**Figura 31** - Transdutor normal [103].

- **Transdutores de Duplo-Cristal**

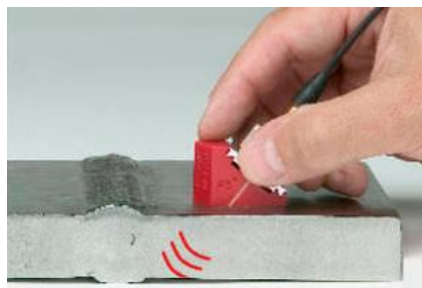
Os transdutores do tipo duplo-cristal são um dos mais indicados e utilizados na medição de espessura por ultrassom. Este transdutor é dotado de dois cristais levemente inclinados (este ângulo varia entre  $0^\circ$  a  $12^\circ$ ) em relação à superfície de contacto, separados por um material acústico isolante. Cada um funciona como recetor ou transmissor do feixe sonoro, sendo esta uma das grandes vantagens destes transdutores, pois permitem a seleção mais adequada para cada um dos cristais. Ideal para detetar descontinuidades logo abaixo da superfície do material. A Figura 32 mostra a estrutura de um transdutor de duplo-cristal [83, 95, 90, 103].



**Figura 32** - Transdutor de duplo-cristal [103].

- **Transdutores Angulares**

Os transdutores angulares possuem um cristal com uma certa angulação em relação a superfície do material. Este ângulo é obtido através da inserção de uma cunha de plástico entre o cristal e a superfície e vai servir de amortecedor após a emissão dos impulsos. O cristal recebe apenas ondas que penetram na cunha na direção paralela e contrária à de emissão. É muito utilizado na inspeção de soldaduras e descontinuidades à superfície do material a ensaiar. Normalmente o tipo de ondas utilizadas para este tipo de aplicações são as ondas transversais. As sondas de feixe angular consistem, num transdutor e um calço, que podem ser partes separadas ou embutidas numa única caixa. A Figura 33 mostra este tipo de transdutor [83, 95, 100, 102].



**Figura 33** - Transdutor angular [102].

### 2.5.6 Acoplantes

Quando se acopla uma sonda ao material a ser inspecionado, forma-se naturalmente uma camada de ar entre a sonda e a superfície do material. Esta camada de ar dificulta ou mesmo impossibilita a penetração da energia acústica enviada pela sonda ao material a ser inspecionado, ou seja, a impedância acústica do ar é muito diferente da impedância acústica do material a ser inspecionado. A interface água e aço apenas transmitem 12 % e reflete 88% da energia ultrassônica. São exemplos destes que forçam a utilização de um líquido que reduza esta diferença, denominados líquidos acoplantes. Estes líquidos são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, do seu tipo, da forma, das dimensões da área de estudo e posição de inspeção. Os acoplantes são moderadamente viscosos, líquidos não tóxicos, géis ou pastas. A Tabela 3 mostra a impedância acústica de alguns materiais e acoplantes [7, 95, 101, 104].

**Tabela 3** - Impedância acústicos de acoplantes e alguns materiais [92].

Acoplante	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm <sup>2</sup> .s)
Óleo ( SAE 30)	0,9	1700	1,5 x 10 <sup>5</sup>
Água	1,0	1480	1,48 x 10 <sup>5</sup>
Glicerina	1,26	1920	2,4 x 10 <sup>5</sup>
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76 x 10 <sup>5</sup>
Aço	7,8	5.900	46 x 10 <sup>5</sup>
Ar ou gas	0,0013	330	0,00043 x 10 <sup>5</sup>
Aço inoxidável	7,8	5.800	45,4 x 10 <sup>5</sup>
Alumínio	2,7	6.300	17,1 x 10 <sup>5</sup>
Acrílico	1,18	2.700	3,1 x 10 <sup>5</sup>
Cobre	8,9	4.700	41,6 x 10 <sup>5</sup>
Borracha	1,1	1.800	2 x 10 <sup>5</sup>
Titanio	4,5	6.100	27,3 x 10 <sup>5</sup>
Magnésio	1,74	5.800	10 x 10 <sup>5</sup>
Vidro	2,5	5.700	14,2 x 10 <sup>5</sup>

Como se pode ver na Tabela 3, a glicerina possui a maior velocidade de onda entre os líquidos à temperatura ambiente, o que a torna ideal para a aplicação em ensaios ultrassônicos não destrutivos.

A glicerina é um acoplante de uso geral. As vantagens da glicerina são a baixa viscosidade e a alta impedância acústica, tornando-a o acoplante indicado para superfícies ásperas e materiais muito atenuantes. A impedância acústica da glicerina é muito parecida com a do plástico, e é mais próxima do metal do que outros líquidos de acoplamentos comuns, proporcionando uma transmissão de som mais eficiente entre o transdutor e a

amostra. Em teste de metais, a glicerina proporciona normalmente um aumento de 3 a 6 dB na intensidade do sinal [104].

### *2.5.7 Vantagens e desvantagens do ensaio com ultrassons*

As vantagens da inspeção ultrassônica são a sua alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas; é uma técnica que não acarreta qualquer tipo de perigo para a saúde do operador; previne a ocorrência de falhas em serviço; o equipamento eletrônico fornece resultados instantâneos; maior agilidade da inspeção, pois dispensa processos intermediários; permite medir espessuras em vários materiais, bem como detectar a presença de corrosão ou desgastes dos mesmos; podem ser produzidas imagens detalhadas com o uso de sistemas automáticos; o ensaio pode ser realizado em materiais com elevadas temperaturas, utilizando o equipamento indicado para este efeito; a localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico e o equipamento é bastante leve, portátil e de fácil utilização [76, 85, 93, 99].

Quanto às desvantagens, a operação exige técnicos treinados e experientes; de difícil utilização em geometrias complexas, com superfícies irregulares, de dimensões muito pequenas ou finas; perda de sinal por atenuação; ferro fundido e outros materiais granulosos espessos são difíceis de inspecionar devido à baixa transmissão sonora e alto sinal de ruído; padrões de referência são exigidos para calibração do equipamento e para caracterização de defeitos; materiais rugosos, de forma irregular, muito pequenos, extremamente finos ou não homogêneos são muito difíceis de inspecionar e a exigência de grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor [10, 84, 92, 93].

## **Capítulo 3: Tecnologia *Phased Array***

---

Neste Capítulo apresenta-se uma fundamentação teórica sobre a tecnologia de ultrassons na variante *Phased Array*, os seus princípios de funcionamento, as características e a descrição do transdutor *Phased Array* e os seus parâmetros associados, que servem de base para o desenvolvimento do trabalho.

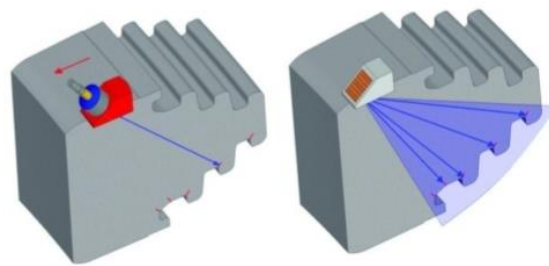
### **3.1 *Ultrassom convencional vs Phased Array***

Os princípios físicos que regem o funcionamento do ultrassom *Phased Array* são os mesmos que os do ultrassom convencional, ou seja, a física de propagação das ondas, reflexão, refração, conversão de modo e difração são as mesmas que definem o ensaio, no entanto, as técnicas de inspeção são distintas. O que diferencia as técnicas está no método de gerar e receber ondas ultrassónicas [85, 92].

Os ultrassons convencionais consistem num único transdutor que gera e recebe as ondas sonoras de alta frequência ou dois transdutores em paralelo, um para transmitir e outro para receber o sinal. Também podem ser usados vários transdutores, sendo cada um com um único ângulo fixo pré-definido, geralmente variando entre 10° e 15° entre cada transdutor, para ampliar a probabilidade de deteção, uma vez que a utilização de um único ângulo leva a uma capacidade limitada de deteção e dimensionamento de descontinuidades, pois o feixe sonoro não incide totalmente perpendicular em relação às superfícies de todas as orientações das descontinuidades existentes na peça. Em alguns casos, sondas de duplo-cristal ou monocristal com lentes focais são usadas para reduzir a zona morta e aumentar a resolução [85, 92, 95, 106].

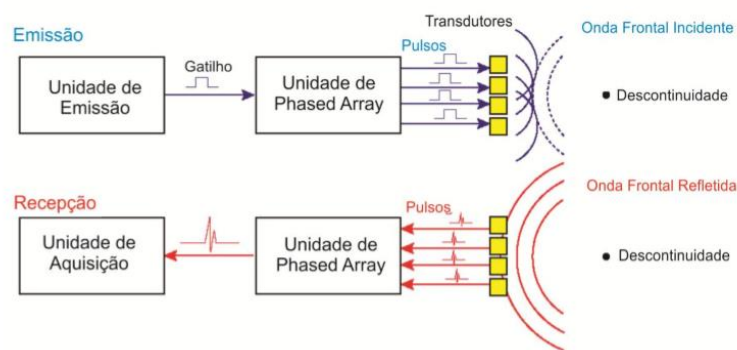
A principal característica da tecnologia *Phased Array* é o controlo computadorizado da excitação (amplitude e atraso) de elementos individuais num transdutor de múltiplos elementos de forma a gerar a configuração do feixe acústico pretendido. Ao pulsar

elementos individuais ou grupos de elementos com diferentes atrasos cria-se uma série de ondas com pontos de origem que se combinam numa frente única por interferência construtiva e com a direção desejada. Esta tecnologia permite o varrimento angular em todo o volume da solda somente com o movimento de um único transdutor no sentido longitudinal ao longo da solda, ou seja, sem a necessidade do movimento no sentido transversal. Estes fatores possibilitam o ensaio em situações onde transdutores convencionais são completamente ineficientes. O varrimento angular ou setorial permite detetar discontinuidades em quaisquer profundidades e com qualquer geometria ou orientação [92, 95, 106]. A Figura 34 mostra uma representação esquemática entre a técnica convencional e a tecnologia *Phased Array*.



**Figura 34** - Ultrassom convencional vs. ultrassom *Phased Array* [91].

A composição de um sistema de inspeção por *Phased Array* (*PA*) é mostrada na Figura 35. Este sistema é completo e pode ser aplicável tanto para a inspeção manual, mecanizada ou automática.



**Figura 35** - Composição de um sistema de inspeção por *PA*, adaptado de [106].

Para a construção programada do perfil do feixe sónico em cada região desejada da peça ensaiada, o pulso individual de cada elemento (cristal) do transdutor *PA* deve ser controlado por computador. Para obter uma emissão sequencial correta de pulsos, em intervalos de tempo precisos e programados, é necessário utilizar uma lei focal. Lei focal é

o nome dado a uma base de dados programados para emissão dos pulsos de cada elemento, com as respectivas amplitudes, tempos de atraso, entre outras informações. O tempo de atraso em cada elemento depende da configuração de inspeção, do ângulo de varrimento, do tipo e ângulo da cunha, da quantidade de elementos e do tipo de transdutor [106].

Se a sonda está acoplada a um calço, o tempo de atraso também depende da geometria do calço e da velocidade do som neste, bem como do posicionamento dos elementos e do ângulo de refração [106].

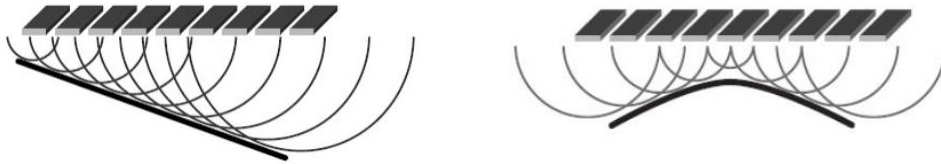
De modo a ser gerado um feixe em fase por meio de uma interferência construtiva, os vários elementos ativos da sonda são excitados em tempos ligeiramente diferentes, de acordo com uma lei focal (lei focal de emissão). Posteriormente, o sinal do defeito será recebido por cada um dos cristais elementares. O sinal resultante, isto é, o sinal somado, é o resultado dos diversos sinais elementares os quais serão somados tendo em conta a defasagem resultante da lei focal (lei focal de recepção) [106].

Os elementos são pulsados em sequências programáveis, geralmente em grupos de 4 a 32 com o propósito de melhorar a sensibilidade através do controlo da abertura, otimizando a energia acústica numa determinada área, o que reduz a disseminação indesejada do feixe e permite uma focagem mais nítida [106].

A geração das ondas acústicas pode ser dirigida de forma dinâmica, com vários ângulos, várias distâncias focais e várias dimensões do ponto focal, de tal maneira que uma só sonda tem a capacidade de gerar diferentes configurações de feixe conforme o tipo de material e geometria do componente. Esta variação do ângulo ou da distância focal é feita instantaneamente, o que torna este processo bastante rápido e com maior sensibilidade para inspecionar geometrias complexas ou de difícil acesso. Os ecos de retorno, provenientes de descontinuidades detetadas, são recebidos pelos vários elementos transdutores com tempos diferentes, de forma a compensar os atrasos que possam acontecer nas alterações de ângulos, focagem ou deslocação da sonda [106].

Ao contrário de um transdutor convencional, um transdutor *PA* pode ordenar espacialmente a frente de onda a retornar, de acordo com o tempo de chegada e amplitude de cada elemento.

A Figura 36 mostra exemplos da forma do feixe sónico pulsado por vários elementos ou grupos, proporcionado pela seleção dos ângulos de propagação.



**Figura 36** - Exemplos forma de onda resultante através do feixe sônico pulsado, adaptado de [107].

Os vários ângulos de feixe e comprimentos focais produzidos podem ser utilizados para inspecionar formas complexas tais como discos e pás de turbinas, *nozzles* de reatores, entre outras formas.

### 3.2 Transdutor *Phased Array*

O transdutor *Array* é aquele que possui vários cristais separados numa única estrutura, e o *Phased* refere-se ao modo como estes elementos são pulsados sequencialmente, cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação, independentemente, um dos outros, resultando na emissão de feixes sônicos diferentes. Estes elementos são pulsados num padrão programado. Uma quantidade maior de elementos aumenta o foco e a condutividade e pode aumentar também a área de cobertura. Isso gera uma maior velocidade de inspeção, uma vez que é possível fazer um varrimento com vários ângulos de refração diferentes através de circuitos. A Figura 37 mostra exemplos de alguns tipos de transdutores *PA* [106].



**Figura 37** - Exemplos de transdutores *PA* [106].

A resposta de qualquer sistema de teste por ultrassom é uma combinação de fatores: o tipo de transdutor utilizado; o tipo e configurações do aparelho usado e as propriedades acústicas do material do teste. As respostas produzidas pelos transdutores de *PA*, como os de quaisquer outros transdutores ultrassônicos para END, devem estar relacionadas tanto com os parâmetros do transdutor como a frequência, o tamanho, o amortecimento mecânico, assim como, os parâmetros de excitação do pulso usado para direcioná-lo.

Quatro parâmetros do transdutor têm uma quantidade de efeitos interrelacionados com a performance [106].

**Frequência:** na prática, as frequências mais altas podem proporcionar uma melhor relação de sinal-ruído que as frequências mais baixas, uma vez que oferecem um foco forte, estreito e um ponto focal mais otimizado. Ao mesmo tempo, a penetração em qualquer material de teste diminui com o aumento da frequência devido à atenuação do material por causa do aumento da frequência. As aplicações que envolvem trajetórias de som muito longas ou materiais de testes atenuantes ou dispersivos exigem frequências mais baixas.

**Tamanho do elemento:** quando o tamanho dos elementos individuais do *Array* diminui, a capacidade de direcionamento aumenta. O tamanho mínimo do elemento das sondas comerciais é de, normalmente, 0,2 mm. No entanto, se o tamanho do elemento é menor que o comprimento da onda, ocorrerão fortes lóbulos laterais indesejados. A geração de lóbulos discordantes ou laterais são dois fenômenos intimamente relacionados causados pela energia do som que se propaga a partir do transdutor noutros ângulos da trajetória primária. As trajetórias indesejadas dos raios podem refletir fora das superfícies das peças testadas e causar indicações falsas numa imagem [106].

**Quantidade de elementos:** à medida que a quantidade de elementos de um sistema aumenta, a área de cobertura física da sonda, a sensibilidade, o foco e a direção aumentam também. No entanto, com a frequência é preciso encontrar um ponto de equilíbrio entre a utilização das sondas com grande quantidade de elementos, a complexidade e os custos do sistema [106].

**Pitch e abertura:** *pitch* (ou passo) é a distância entre os elementos individuais, a abertura corresponde ao tamanho real do elemento pulsador - geralmente, é composto por um grupo de elementos que enviam pulsos simultâneos. Para otimizar a variação da direção, o *pitch* deve ser pequeno. Para otimizar a sensibilidade, dispersão mínima do feixe e um foco forte, a abertura deve ser grande. Os aparelhos *PA* atuais normalmente suportam leis focais de até 16 elementos. Sistemas mais avançados permitem 32 ou até mesmo 64 elementos [106].

Os transdutores *PA* produzem ondas longitudinais e transversais como ocorre também nos transdutores convencionais. Estes são fabricados numa variedade de formas e

tamanhos para diferentes aplicações. Em geral, as sondas *PA* industriais são oferecidas com frequências entre 1 MHz e 17 MHz, até 128 elementos.

### 3.2 Calços Phased Array para Aplicação Industrial

Conceitualmente, os transdutores *PA* podem gerar quaisquer ângulos sem a necessidade do uso de calços. Na prática, a geração de ângulos extremos é dificultada, sendo aconselhável o uso de calços tanto para ondas longitudinais quanto para ondas transversais. Esses calços realizam, basicamente, a mesma função num sistema de *PA*, como a detecção de defeitos com elementos únicos convencionais. A energia sonora do transdutor para a peça de teste é acoplada de tal maneira que o calço converte o modo ou refrata a um ângulo desejado, segundo a lei de Snell [106, 107].

Os calços *PA* estão disponíveis com ângulos padrões de refração de 0°, 55° e 60° em aço, para inspeção com uma faixa de ângulos variando de 30° a 70° com ondas transversais e longitudinais [106]. A Figura 38 mostra alguns calços padrões utilizadas nas inspeções com transdutores *PA*.

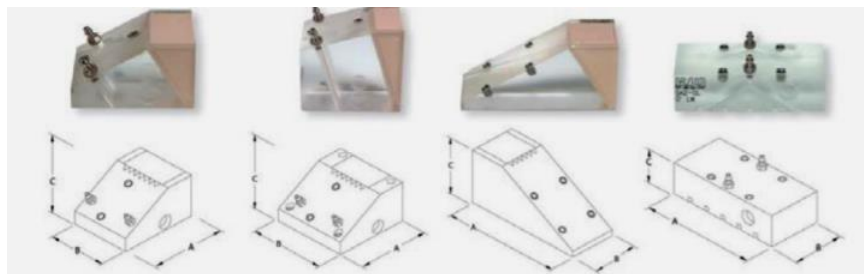


Figura 38 - Calços padrões utilizadas na inspeção por ultrassom *Phased Array* [106].

### 3.1 Tipos de varrimentos

O tipo de varrimento é outro recurso aplicado ao controlo do atraso eletrónico, além da ativação dos elementos para gerar o pulso. Ao conjunto de elementos seleccionados e excitados durante o intervalo de tempo necessário para criar um único pulso dá-se o nome de elementos ativos. Os elementos ativos da sonda são excitados através de um impulso elétrico, com uma duração que é função da frequência da sonda, por forma a colocar o cristal em ressonância. Os cristais são excitados com desfasamento no tempo entre si, de acordo com a lei focal utilizada [7, 106].

Fatores como a geometria da peça a ser inspecionada, superfícies de acesso, ou tipo de descontinuidades expectáveis (em termos de morfologia e orientação), assim como a capacidade do equipamento em termos de canais disponíveis são fatores que condicionam o tipo de varrimento. Estes fatores afetam diretamente o ângulo de incidência com a descontinuidade, o volume inspecionado e o tempo de inspeção [7, 106].

A capacidade de modificar ou controlar o perfil do feixe gerado por uma sonda *PA* leva a novas possibilidades de inspeção, através de diferentes técnicas de varrimento eletrônicas, nomeadamente linear, focalização dinâmica e sectorial, que não podem ser realizadas com os sistemas de ultrassons convencionais [106].

A abertura ativa do transdutor é uma das características fundamentais utilizadas para definir um transdutor *PA*.

A abertura ativa *A* é o comprimento total da sonda ativa e pode ser calculado pela Equação 3, onde segundo a Figura 39, *n* é o número de elementos da sonda *PA*, *p* é o passo (*pitch*) entre os elementos da sonda, ou seja, a distância entre centros de dois elementos adjacentes e *W* é o comprimento do elemento piezocompósito muitas vezes chamado de elevação [7, 106].

$$A = n \times p \tag{3}$$

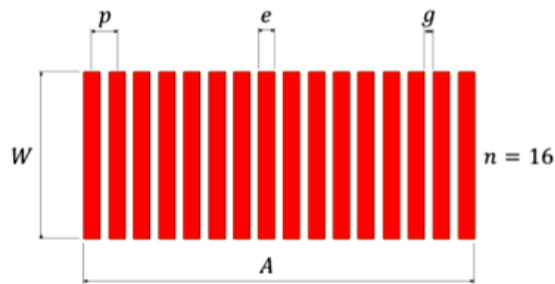
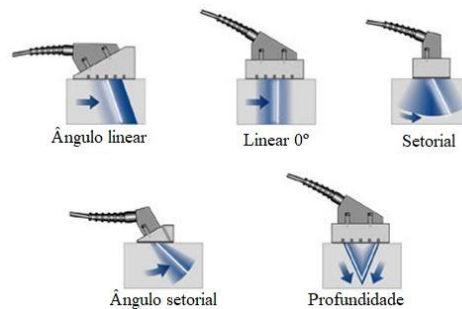


Figura 39 - Variáveis para o cálculo da abertura ativa [91].

No entanto, é possível obter um valor mais preciso para a abertura ativa segundo a Equação 4, onde *e* é a largura do elemento, que na prática é menor que metade do comprimento de onda,  $\lambda$ .

$$A = (n - 1) \times p + e \tag{4}$$

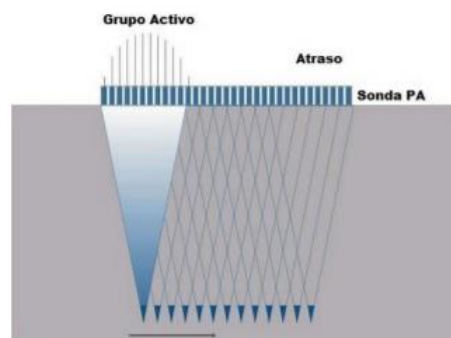
Estas informações são utilizadas pelo *software* do aparelho para gerar a forma de feixe desejada [106]. Alguns tipos de varrimentos de feixe para transdutores multielemento são exemplificados na Figura 40.



**Figura 40** - Tipos de varrimentos de feixe para transdutores multielemento, adaptado de [106].

Apesar de existirem vários padrões de tipos de varrimentos controlados por computador, os dois tipos principais e mais usados são [7, 106]:

- **Varrimento eletrônico (*Electronic-Scan* - E-Scan) ou linear:** é realizado através da multiplexagem entre os elementos ativos, sem alterar a lei focal, ou seja, sem alterar o ângulo e a focalização do feixe acústico ao longo do comprimento do transdutor *PA*. Se for utilizado um calço de ângulo, a lei focal compensa os diferentes atrasos dentro do calço [7, 106]. A Figura 41 mostra este tipo de varrimentos.



**Figura 41** - Varrimento linear [108].

- **Varrimento setorial ou azimutal ou angular (S-scan):** é realizado utilizando o mesmo grupo de cristais ativos e multiplexando com diferentes leis focais, de forma a variar o ângulo fixo de incidência entre um grande intervalo angular [7, 106], Figura 42.

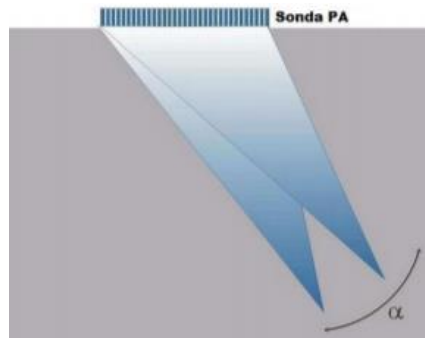


Figura 42 - Varrimento setorial [108].

A abertura do feixe depende de dois fatores, a geometria do transdutor e o valor máximo de abertura que esta dependente do número máximo de canais simultâneos do aparelho de ultrassom PA. Esses dois fatores afetam diretamente a geometria do feixe e a detetabilidade de possíveis descontinuidades [106].

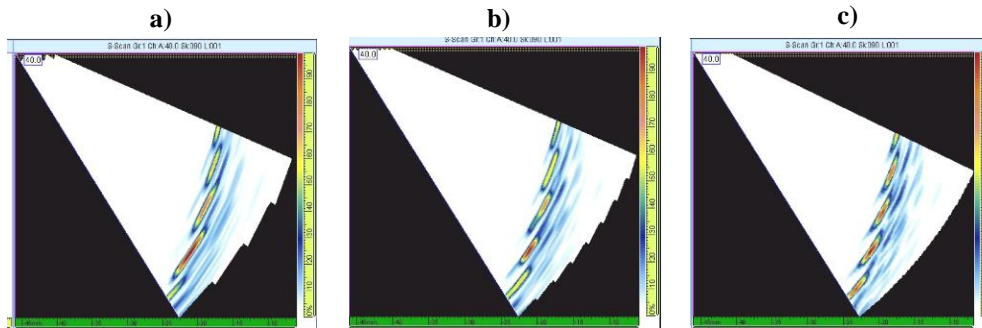
Dessa forma, o aumento da abertura favorece a focalização, conforme se pode ver na Figura 43. Com a energia do feixe concentrada num volume menor, melhora-se a capacidade de discriminar descontinuidades próximas entre si [106].



Figura 43 - Influência do aumento da abertura no aprimoramento da resolução [106].

Outro parâmetro que exerce influência na resolução lateral é o número de leis focais existentes num dado varrimento, ou em outras palavras, o número de passos para cobrir a região sob inspeção, que controlam de modo eficaz a quantidade de visualizações individuais utilizadas para gerar uma imagem. Uma quantidade maior de leis focais geralmente produz uma imagem mais detalhada, mas em detrimento da velocidade do rastreamento e do consumo de energia. Uma menor quantidade de leis focais significa que as imagens podem ser atualizadas mais rapidamente e o consumo de energia é menor, mas as imagens possuem menos detalhes.

A Figura 44 mostra diferentes varrimentos para uma série de furos laterais num bloco de referência com uma faixa de varrimentos de setor de 40 a 72 graus, usando uma sonda de 5 MHz programada com diferentes números de leis focais.

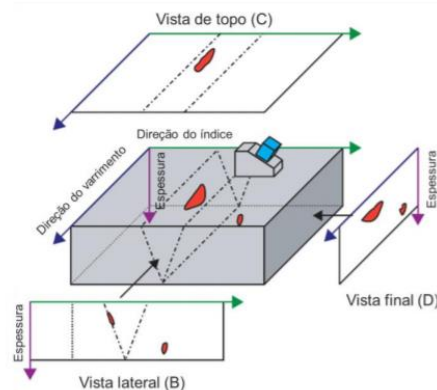


**Figura 44** - Efeitos de resolução angular. a) Uso de 4 leis focais e incrementos de 8°; b) uso de 8 leis focais e incrementos de 4°; c) uso de 32 leis focais e incrementos de 1° [106].

### 3.2 Tipos de visualização com Phased Array

A imagem de *PA* oferece a possibilidade de visualizar uma imagem em secção transversal do volume do material, através da utilização simultânea de vários ângulos de inspeção, o que permite visualizar mais facilmente a morfologia das discontinuidades e torna o dimensionamento das mesmas bastante mais fácil e preciso.

O sistema *PA* permite construir imagens com diferentes vistas entre o feixe acústico e os parâmetros de varrimento, quer seja varrimento eletrónico, ou mecânico. As vistas mais importantes, semelhantes a projeções de duas dimensões de um desenho técnico são exemplificadas na Figura 45, onde se pode representar os sinais em vistas de topo, alçado transversal e alçado lateral, que se designam de vistas C-scans, B-scans e D-scans respetivamente.



**Figura 45** - Esquema de vistas ultrassónicas (B-scan, C-scan e D-scan) , adaptado de [106].

Todos os equipamentos de ultrassons registam dois parâmetros fundamentais de um eco: a amplitude do sinal e o tempo de percurso. O tempo de percurso, associado com a informação do ângulo do feixe acústico, permite determinar a profundidade e a distância projetada, desde que se conheça a velocidade de propagação do som no material a ser inspecionado [7, 106], de acordo com a equação 5.

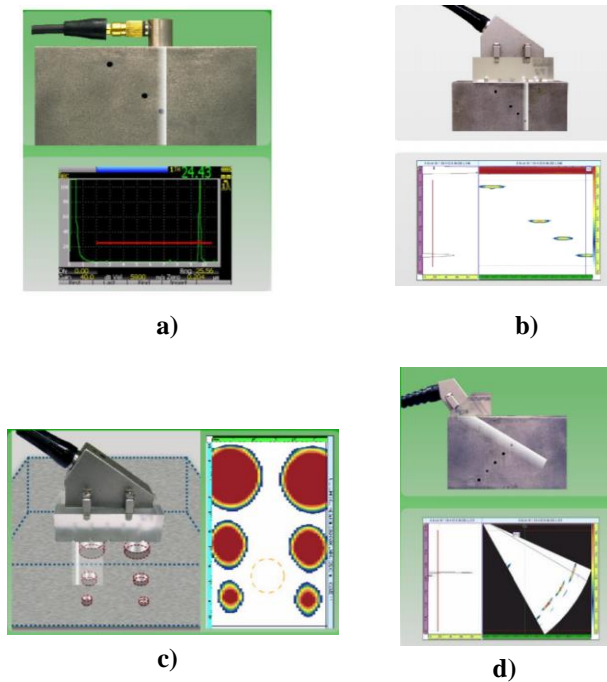
$$\text{Distância} = \text{Velocidade} \times \text{Tempo} \quad (5)$$

A representação básica dos sinais obtidos num ensaio de ultrassons é sob a forma de uma representação *A-scan*, onde o eco da amplitude e o tempo da trajetória são representados graficamente num gráfico com a amplitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal. Neste tipo de representação é visualizado um ecograma onde a posição dos picos representa a profundidade da superfície refletora medida a partir do ponto onde o transdutor é posicionado e a altura dos picos representa a intensidade do sinal recebido. A representação *A-scan* é a informação elementar que permite obter as diferentes vistas referidas anteriormente [7, 106].

O tipo *B-scan* é uma visualização transversal da peça. Este método exhibe ao operador o varrimento completo da peça, sendo útil para ensaios de deteção interna de corrosão em tanques e dutos. Os *B-scan* apresentam o tempo de percurso sonoro (eixo yy) em função do deslocamento da sonda (eixo xx). A imagem *B-Scan* pode ser imaginada como a secção da peça, num plano que contém a trajetória da sonda [7, 106].

O *C-scan*, é uma representação bidimensional dos dados como a visualização superior ou planar da peça de teste, similar a sua perspectiva gráfica de uma imagem de raios X, onde a cor representa a amplitude ou a profundidade do sinal de cada ponto mapeado da peça de teste em relação à sua posição. As imagens planares podem ser geradas em peças planas através da localização de dados em relação a posição X-Y. O tipo *S-scan* mostra o feixe sónico de forma lateral, permitindo mostrar o tipo de varrimentos, por exemplo, setorial ou linear [7, 106].

Os diferentes tipos de representação de dados estão expostos na Figura 46.



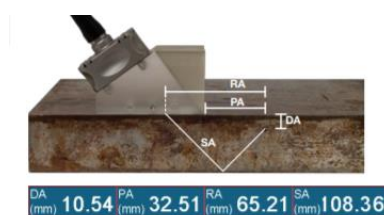
**Figura 46** - Representação de dados: a) A-scan.; b) B-scan; c) C-scan; d) S-scan [106].

### 3.3 Posicionamento e caracterização do defeito

Em inspeções manuais, é essencial fazer a leitura em tempo real para posicionar rapidamente a origem do sinal refletido em relação à geometria e/ou à localização da sonda. As leituras RA, PA, DA e SA auxiliam e permitem que os operadores localizem com precisão a posição do defeito em tempo real durante a inspeção [106].

- RA: distância entre o ponto de referência do calço e o refletor;
- PA: posição frontal do refletor em relação à ponta do calço;
- DA: profundidade do refletor na porta A;
- SA: comprimento da trajetória do som e o refletor.
- 

A Figura 47 mostra, de uma forma esquemática, a localização das diferentes variáveis necessárias para efetuar o posicionamento do defeito.



**Figura 47** - Indicação das variáveis de leitura necessárias para a localização do defeito [106].

As variáveis que são relevantes par o dimensionamento dos defeitos são: DA, que é a profundidade a que se encontra o defeito; U (m-r) que indica a altura do defeito; I(m-r) que se refere à altura e I.U (m-r) corresponde ao comprimento diagonal do defeito. Na Figura 48 estão representadas as variáveis utilizadas para a leitura das dimensões do defeito, exibidas na tela da máquina.

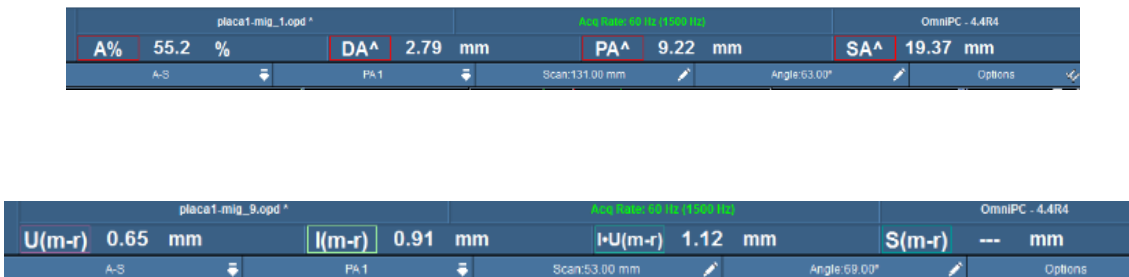


Figura 48 – Variáveis utilizadas para o dimensionamento dos defeitos.

As falhas volumétricas têm uma aparência muito diferente das falhas planares e a partir da visão de dados dos varrimentos A –scan é possível diferenciar esse tipo de falhas com base na sua aparência. As falhas planares como a falta de fusão, são indicadas por um curto aumento do sinal e tempo de queda curto, de forma semelhante a um refletor de identificação (furo, por exemplo). As falhas volumétricas, como a escória e a porosidade, têm um aumento longo no A-scan e um tempo de queda com múltiplos picos. A Figura 49 exhibe a diferença dos sinais no A-scan, para diferentes tipos de defeito [109].

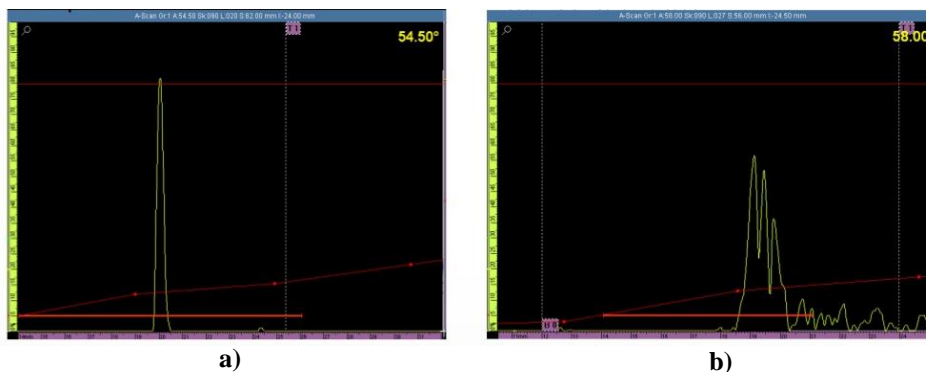
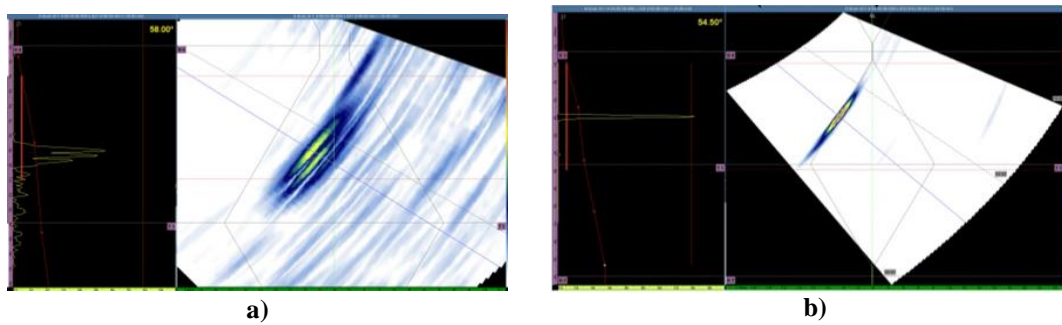


Figura 49 - Caraterização de defeitos. a) Falha planar; b) Falha volumétrica [109].

Com a ajuda da representação de dados em S-scan, pode-se ter uma melhor percepção do tipo de defeito, juntamente com a visão A-scan. A Figura 50 mostra a aparência de diferentes defeitos encontrados numa inspeção.



**Figura 50** - Caracterização de defeitos. a) Porosidade; b) Falta de fusão na parede lateral [109].

### 3.4 *Vantagens e desvantagens do uso do ultrassom Phased Array*

As vantagens principais da tecnologia *PA* em relação ao ultrassom convencional são provenientes da capacidade de usar uma variedade de elementos para direcionar, focar, analisar feixes, com um único conjunto transdutor. A diversidade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor, pode ser utilizada para mapeamento de componentes com ângulos apropriados podendo simplificar muito a inspeção de componentes com geometrias complexas. A pequena superfície do transdutor e o recurso de varrer o feixe sem a necessidade de se mover a sonda também auxilia na inspeção de tais componentes em situações onde o acesso para verificação mecânica é limitado. O rastreamento setorial é muito utilizado para inspecionar soldaduras, pois permite que as mesmas sejam avaliadas em vários ângulos com apenas uma sonda, aumentando muito a probabilidade de detecção de anomalias. O foco eletrônico permite otimizar o tamanho e a forma do feixe no local esperado do defeito, assim como um aumento na probabilidade de detecção.

### 3.5 *Ultrassom vs Radiografia Industrial*

A radiografia e o ultrassom são técnicas de ensaios não destrutivos complementares. As duas podem realizar inspeções volumétricas de soldas e de componentes para defeitos como trincas, falta de fusão, porosidade, etc. A escolha entre uma e outra depende das decisões do processo externo ou de pequenas diferenças na capacidade de detecção de um teste específico. No entanto, o ultrassom começou a substituir a radiografia devido à sua praticidade e por estar em conformidade com os códigos da Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos (ASME, sigla em inglês) e do Instituto Americano de Petróleo (API) [110].

Embora a maioria dos códigos não especifiquem o método ultrassônico, o ultrassom *Phased Array*, particularmente, tem-se tornado o método mais popular nos processos de inspeção. O equipamento de ultrassom *Phased Array* está a cada dia mais acessível, portátil e fácil de usar, tornando o ultrassom prático e um substituto seguro à radiografia. As principais vantagens dos ultrassons em relação à radiografia são [110]:

- Maior probabilidade de detecção, especialmente para trincas e falta de fusão:
- Na maioria das pesquisas realizadas, o ultrassom tende a detectar melhor os defeitos planares que a radiografia.
- A dimensão precisa da altura do defeito, a menor rejeição ou reparo usam a Avaliação Crítica de Engenharia:
- O ultrassom permite a medição da altura do defeito, o que permite a consideração volumétrica da gravidade do defeito (em vez de indicar apenas o tipo e o tamanho do defeito).
- Não emite radiação, é seguro e não exige licença adicional ou pessoal.
- Não precisa de ser operado em áreas protegidas. Pode-se trabalhar normalmente quando se realizam testes ultrassônicos nas proximidades.
- Não produz nenhum resíduo químico ou causa desperdício de material (diferente do filme utilizado na radiografia).
- A análise ultrassônica em tempo real das soldas pode fornecer avaliação instantânea e respostas ao soldador.
- A configuração e os relatórios de inspeção são em formato eletrônico (diferentemente do filme de radiografia).

As principais desvantagens do sistema *Phased Array* são o custo um pouco mais elevado e a necessidade de treinar os operadores, porém, esses custos, com frequência, são compensados por causa da flexibilidade e da redução do tempo necessário para realizar a inspeção [106].

## Capítulo 4: Materiais e métodos

---

Neste Capítulo vão ser mencionados todos equipamentos, peças e ferramentas usadas, bem como os procedimentos e especificações dos parâmetros necessários para uma correta calibração do equipamento, para ser possível obter uma deteção fidedigna, bem como as configurações necessárias para a inspeção das juntas soldadas das diferentes placas de alumínio obtidas por diferentes processos de soldadura, nomeadamente, MIG/MAG, TIG e *Fricciona Stir Welding* (fricção).

### 4.1 Introdução ao equipamento OmniScan MX2

A Figura 51 mostra a unidade de aquisição de dados OmniScan MX2 da Olympus utilizada nos ensaios. Esta unidade de aquisição de dados *PA* está equipada com um módulo 32:128, ou seja, permite trabalhar com 32 canais em paralelo, e 128 multiplexados, como tal, existem várias possibilidades de combinação de canais para formar diferentes feixes. Permite ainda trabalhar com 256 leis focais, reconhece automaticamente as sondas e os *setups*, a possibilidade de um impulso por elemento pode ser 45 V ou 90 V e permite um ganho de 0 a 80 [dB] na receção do sinal. Possui duas baterias, que podem ser usadas em simultâneo, ou uma de cada vez. O tempo de autonomia da máquina com as duas baterias é no mínimo de 6 horas.



Antes de se efetuar a inspeção, é necessário uma série de procedimentos de configuração da máquina OmniScan MX2. Esta é dotada de um menu assistente que possui um conjunto de submenus que permitem criar, passo a passo, uma configuração de um modo rápido para a aplicação em causa, tal como se pode ver na Figura 52.

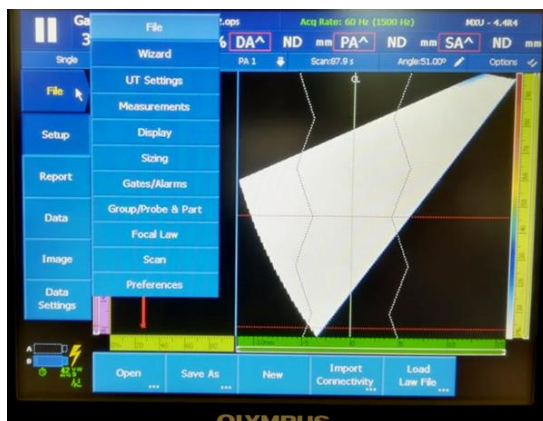


Figura 52 - Painel de menus e submenus da OmniScan MX2.

O menu *Wizard* inclui três submenus que devem ser especificados pela ordem que estão dispostos. No submenu “*Part & Weld*”, Figura 53, especificou-se a espessura, o material, o tipo de amostra, os parâmetros relacionados com esta e as especificações relacionadas com a soldadura.

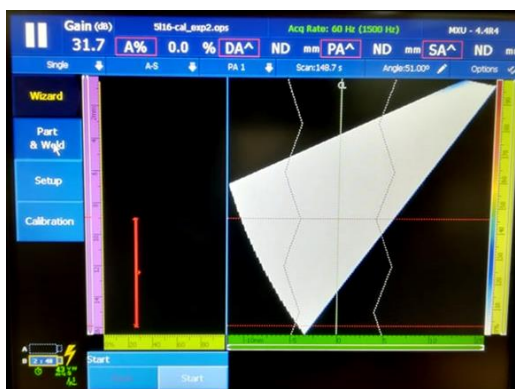


Figura 53 - Aspeto do menu *Wizard* e seus respectivos submenus (seleção do submenu *Part & Weld*)

A tela de ajuda de cada etapa do assistente fornece informação específica em relação aos parâmetros a serem ajustados, tal como se pode ver na Figura 54.

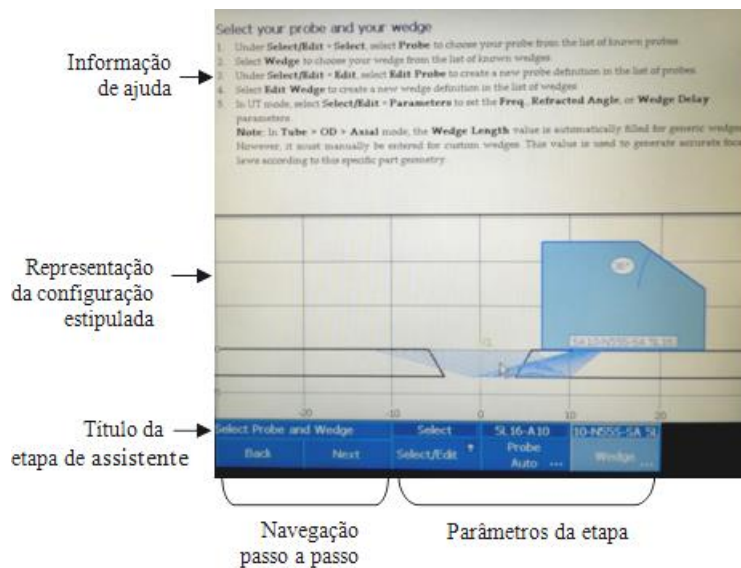


Figura 54 – Tela de ajuda para ajuste dos parâmetros.

Depois de especificado o tipo de amostra, a soldadura e os seus parâmetros, selecionou-se o menu “*Setup*” onde se efetuaram as configurações relativas às leis focais e elementos ativos, à sonda, ao calço e à definição dos ângulos de inspeção. As especificações mais detalhadas de cada parâmetro escolhido encontram-se no Anexo 3.

A etapa seguinte, e a mais complexa, foi a calibração do equipamento, que englobou uma série de procedimentos específicos.

#### 4.2 Procedimento de calibração

A primeira fase do procedimento experimental consistiu na configuração do equipamento, ao nível das especificações do material e da soldadura, bem como o *setup* dos parâmetros de inspeção, nomeadamente, a configuração das leis focais, dos elementos do transdutor e os parâmetros inerentes aos ultrassons.

Para a realização da calibração é necessário um transdutor, um calço e um bloco de calibração feito do mesmo material da peça a ser inspecionada.

A calibração do equipamento OmniScan MX2 foi realizada com um bloco padrão fabricado no mesmo material que o das placas a inspecionar, ou seja, a liga de alumínio 6061. O bloco foi construído no seguimento deste trabalho, sendo este um bloco do tipo IIW-2, as suas dimensões e características foram estabelecidas de acordo com a norma

AFNOR EN 12223, as quais se encontram indicadas no desenho técnico representado na Figura 55.

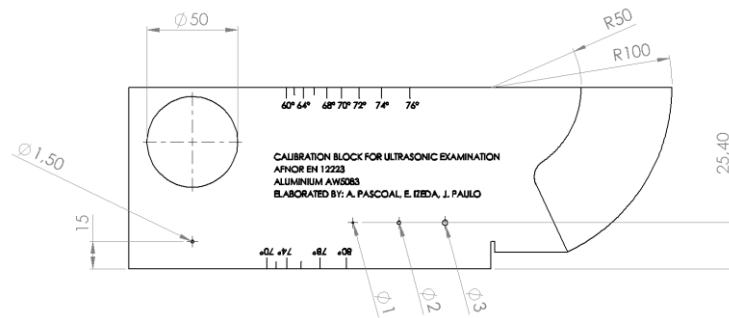


Figura 55 – Desenho técnico do bloco de calibração usado.

A Figura 56 mostra o bloco de calibração usado.

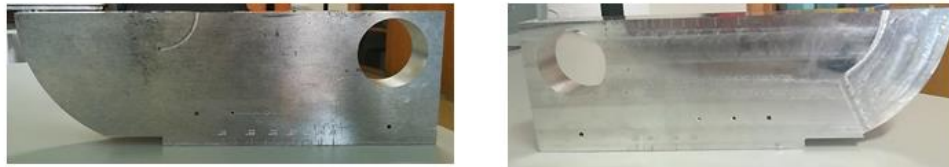


Figura 56 - Bloco padrão do tipo IIV-2 – Norma AFNOR EN 12223.

A sonda usada no desenvolvimento deste trabalho, também proveniente do fabricante Olympus, foi a 5L16-A10, representada na Figura 57. O OmniScan MX2 deteta automaticamente a sonda, uma vez que esta esteja inserida no equipamento.



Figura 57 - Sonda 5L16-A10.

As suas especificações estão indicadas na tabela que se segue.

**Tabela 4** - Especificações da sonda 5L16-A10.

5L16-A10	Especificações
Tipo de sonda	Arranjo linear
Tipo de feixe	Angular
Nº de elementos	16
<i>Pitch</i> (mm)	0,60
Frequência (MHz)	5
Abertura do feixe (mm)	9,6
Elevação (mm)	10

O calço utilizado foi o SA10-N55S, Figura 58, e as suas características são exibidas na Tabela 5.



**Figura 58** - Calço SA10-N55S.

**Tabela 5** - Especificações do calço SA10-N55S.

SA10-N55S	Especificações
Feixe de ângulo refratado nominal	55° SW
Tipo de onda	Transversal
Varrimentos recomendada (°)	de 40° a 70°
Orientação da sonda	Normal

De forma a facilitar a transmissão da energia sonora entre o transdutor e o bloco padrão utilizou-se glicerina como acoplante, Figura 59, uma vez que a energia sonora nas frequências ultrassônicas não é transmitida de modo eficaz através do ar. Mesmo uma camada de ar extremamente fina entre o transdutor e o bloco padrão impedirá a transmissão da energia sonora de forma eficiente e comprometerá a realização do teste.



Figura 59 - Uso da glicerina como acoplante ultrassônico.

Para o funcionamento adequado do equipamento de ultrassom *PA* são necessárias três calibrações, efetuadas pela seguinte ordem:

- Velocidade;
- Atraso do calço;
- Sensibilidade.

#### 4.2.1 Calibração da velocidade

O objetivo da calibração da velocidade é o de medir a velocidade real das ondas de ultrassom no material a ser inspecionado. A calibração da velocidade deve ser realizada antes da calibração do atraso do calço, pois o OmniScan utiliza o resultado da calibração da velocidade para calibrar o atraso do calço. Para efetuar a calibração da velocidade foi necessário colocar a sonda no bloco padrão e usar como referência os dois raios existentes no bloco, um com 50 mm de raio e outro de 100 mm, Figura 60.

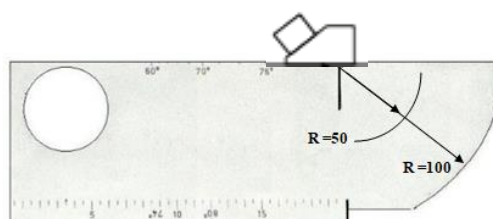
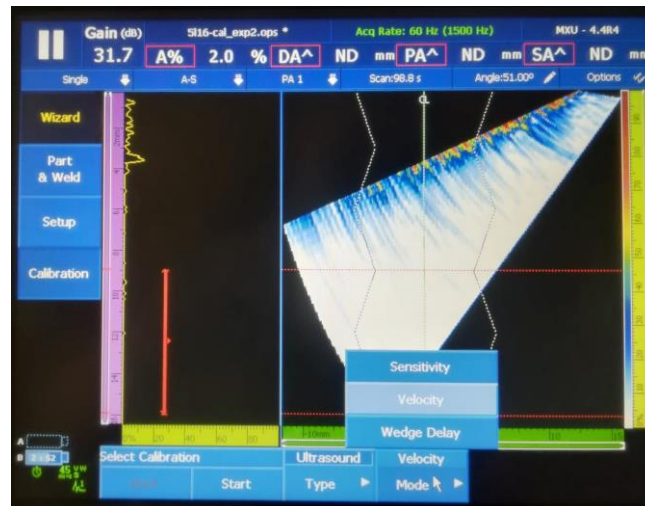


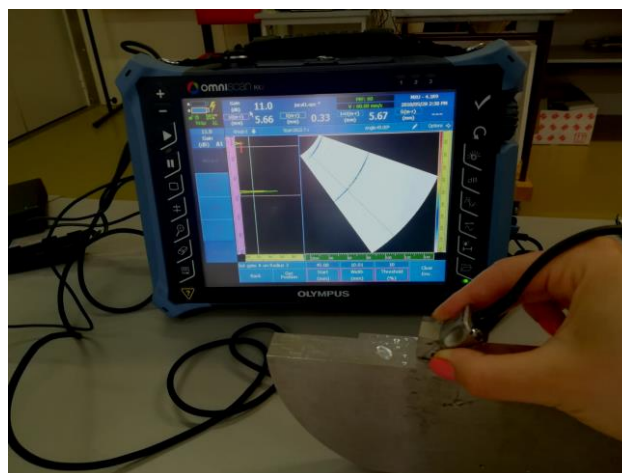
Figura 60 - Identificação dos raios do calibre padrão.

O menu da calibração inclui os três tipos de calibração a efetuar. Primeiro, seleciona-se o tipo de calibração que se pretende realizar, neste caso, a velocidade, e depois seleciona-se “*start*”, Figura 61.



**Figura 61** – Menu de calibração.

Depois de selecionar os parâmetros anteriores, moveu-se o transdutor perto dos raios, de forma a detetar os sinais correspondentes a cada um. Quando se detetaram ambos os raios na tela do aparelho, posicionou-se o transdutor, para que os picos correspondentes a cada raio fossem maximizados, criando um envelope adequado a cada um, sem mexer a sonda até ao final do procedimento, tal como se pode ver na Figura 62.



**Figura 62** - Calibração da velocidade. Detecção e maximização dos sinais correspondentes aos raios conhecidos.

De seguida, colocou-se a porta A a passar no sinal correspondente ao raio 50 mm, ajustando a largura desta, para garantir que contém toda a largura do envelope do sinal e selecionou-se a opção “*Get position*” para guardar a posição nesse ponto. Efetuou-se o mesmo procedimento para o sinal correspondente ao raio de 100 mm e selecionou-se a opção “*Accept*”. De salientar que o ganho deve ser ajustado, de modo que a amplitude do

signal alcance, aproximadamente, 80%, da altura da tela. A Figura 63 identifica os elementos que caracterizam o sinal obtido.

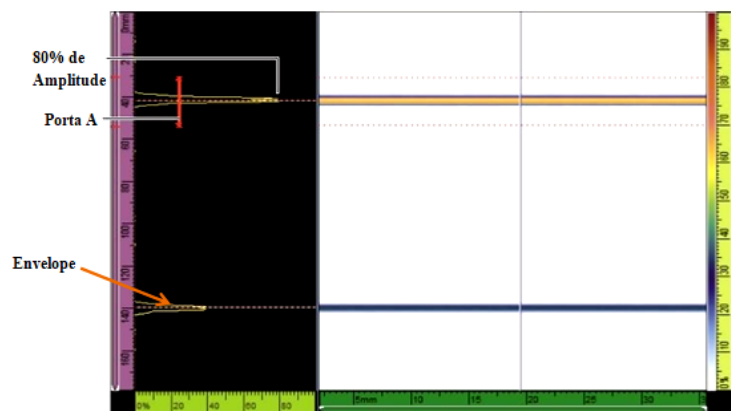


Figura 63 – Identificação dos elementos que caracterizam o sinal.

Após concluir a calibração da velocidade da máquina, o valor da velocidade calculada e exibida no parâmetro “velocidade do material” é de 3125 m/s, aceitável para o material do bloco de calibração, uma vez que a velocidade teórica das ondas transversais no alumínio corresponde a 3100 m/s.

#### 4.2.2 Calibração do atraso do calço

A calibração do atraso do calço é um processo que permite a identificação da face do calço em contato com a peça, que diz respeito à propagação do som dentro do calço. Esta ação corrige o atraso entre o disparo do transdutor para cada elemento, neste caso 16 elementos, e a entrada do som na peça de teste para todas as leis focais, de modo a que fiquem todas sincronizadas. Para esta calibração usou-se como referência o raio de 50 mm, posicionando o transdutor até detectar o sinal correspondente ao raio, depois ajustou-se o início e a largura da porta A, abrangendo a totalidade do sinal. De seguida, moveu-se, cuidadosamente, a sonda para frente e para trás do bloco de calibração para criar um envelope e selecionou-se a opção calibrar. Depois, mais uma vez, moveu-se o transdutor para trás e para frente, sobre o refletor (raio de 50 mm) de forma a garantir que o sinal fica dentro dos limites de tolerância, obtendo-se um sinal linear.

A Figura 64 mostra o *display* do equipamento durante a calibração do atraso do calço. O *software* do equipamento, registou os tempos de percurso ou profundidade correspondente à reflexão máxima obtida, para cada lei focal (ângulo) e calculou o atraso associado. A imagem apresenta duas linhas horizontais vermelhas, que representam o

intervalo de erro admissível para o tempo de percurso ou profundidade durante o processo de calibração.

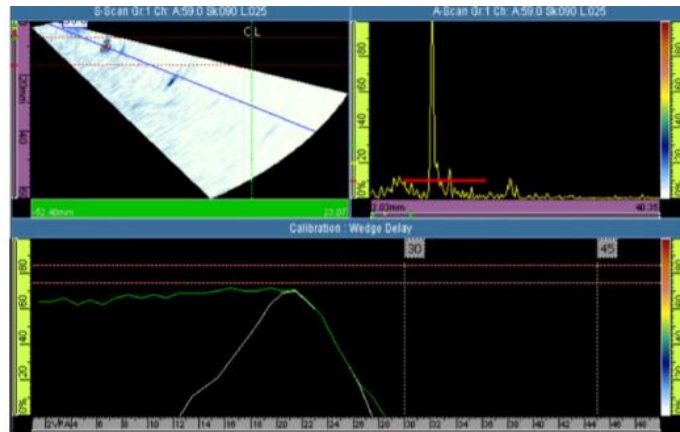
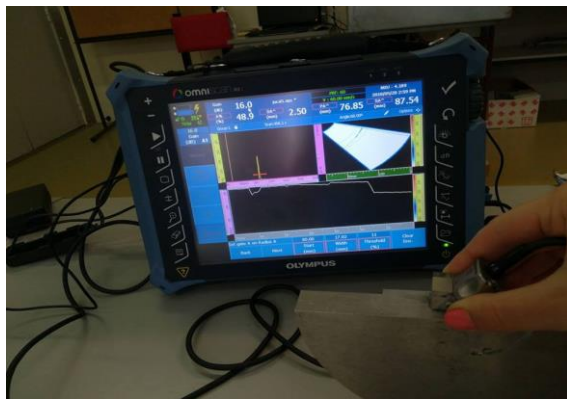
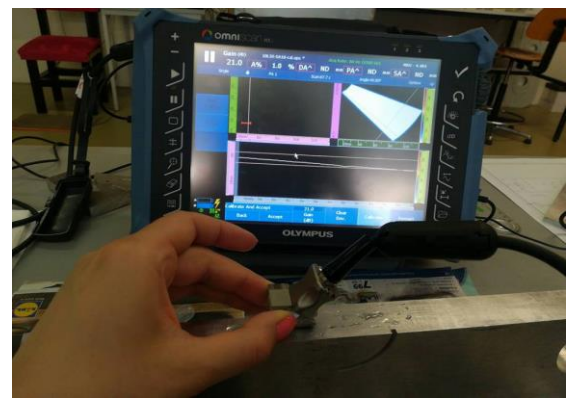


Figura 64 - Criação do envelope para a calibração do atraso de calço.

Quando a calibração está correta, o envelope fica entre as duas linhas vermelhas pontilhadas. Caso a calibração esteja errada, seleciona-se “Limpar envelope” e, em seguida, realiza-se uma nova passagem sobre o refletor, e quando se conseguir a calibração correta, seleciona-se “Aceitar”. Se for necessário, pode-se ajustar o ganho aplicado ao sinal. A Figura 65 mostra o procedimento efetuado para a calibração do atraso do calço.



a)



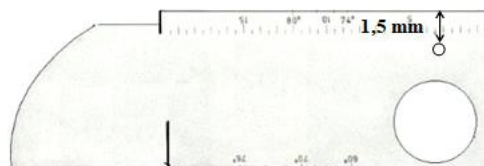
b)

Figura 65 - Calibração do atraso do calço. a) Ajuste da calibração pela movimentação do transdutor; b) Obtenção do sinal linear.

#### 4.2.3 Calibração da sensibilidade

A calibração da sensibilidade normaliza o ganho de todas as leis focais garantindo que todas elas produzem um sinal de amplitude similar para o refletor conhecido. Neste

caso o refletor usado foi o furo de 1,5 mm de profundidade, tal como se pode ver na Figura 66.



**Figura 66** – Identificação do furo usado com refletor para a calibração da sensibilidade.

Esta calibração é válida para todas as leis focais. Nesta etapa, definiu-se a amplitude de referência a 80% da tela, de modo a especificar o nível em que o pico do sinal atravessa a porta A e estipulou-se uma tolerância de 5 mm para a medição do furo de referência. Moveu-se a sonda para trás e para frente, de modo a detetar o furo e ajustou-se o início e a largura da porta A para que o envelope do sinal atravessasse o meio da porta, verificando se esta é grande o suficiente para conter toda a largura do envelope do sinal. De notar que, é necessário usar o ganho de compensação nos casos em que o sinal das leis focais periféricos é significativamente mais fraco do que as leis focais do meio do rastreamento. Nestes casos, a amplitude das leis focais na periferia do rastreamento está abaixo da sensibilidade mínima no gráfico e o assistente de calibração gera uma mensagem de erro ao tentar concluir a calibração.

O ganho de compensação nivela o perfil da amplitude das leis focais, permitindo que o perfil seja visível no gráfico de sensibilidade de uma forma uniforme. Deve-se mover o transdutor, cuidadosamente, para trás e para a frente, no bloco de calibração e no refletor, para construir um sinal linear, de modo a que o envelope fique dentro dos limites tolerados. Se a calibração for satisfatória, seleciona-se “Aceitar”. O *software* do equipamento, registou a amplitude de resposta correspondente à reflexão máxima obtida, para cada lei focal e vai calcular a compensação de ganho em [dB] associado. A imagem apresenta duas linhas horizontais vermelhas, que representam o intervalo de erro admissível para a amplitude de resposta durante o processo de calibração, como se pode ver na Figura 67.

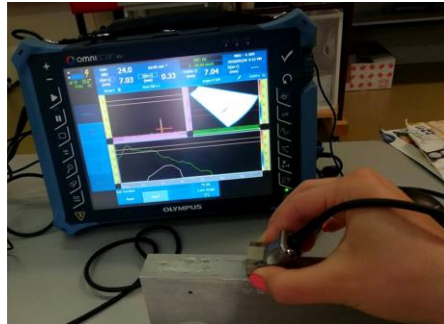


Figura 67 - Calibração da sensibilidade.

Para uma melhor compreensão do objetivo da calibração do atraso do calço juntamente com a calibração da sensibilidade, segue-se uma representação esquemática, apresentada na Figura 68, que mostra a correção da profundidade e da amplitude dos ângulos face ao refletor conhecido.

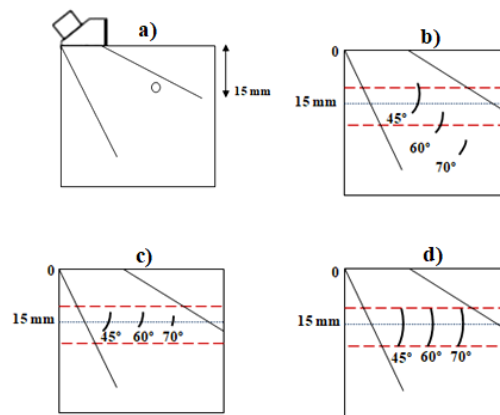


Figura 68 – Finalidade da calibração do atraso do calço juntamente com a calibração da sensibilidade. a) Detecção do furo; b) Profundidade e amplitude incorretas; c) Correção da profundidade; d) Correção da amplitude.

Uma vez concluídas as calibrações da máquina, pode-se ver que os indicadores pertencentes a cada tipo de calibração, ficam a verde, Figura 69, informando que as três calibrações foram bem-sucedidas e a máquina está preparada para efetuar uma inspeção.

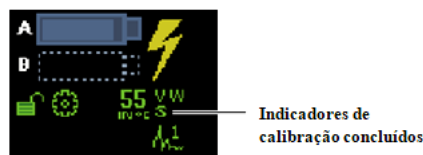


Figura 69 – Status dos indicadores de calibração concluído.

De salientar que ao desligar-se o equipamento OmniScan MX2 não é necessário efetuar uma nova calibração, basta guardar a mesma no dispositivo. Contudo, ao efetuar-se uma nova inspeção com um transdutor diferente, é necessário fazer uma nova calibração, inerente a esse tipo de transdutor.

#### 4.3 Verificação da qualidade da calibração em corpo de prova

Inicialmente foi usado como corpo de prova uma placa de alumínio Figura 76, onde foram feitos 9 furos com profundidades e distâncias distintas, para avaliar a capacidade de detecção dos furos com a OmniScan MX2. As medidas e especificações desta placa encontram-se exibidas na Figura 70.

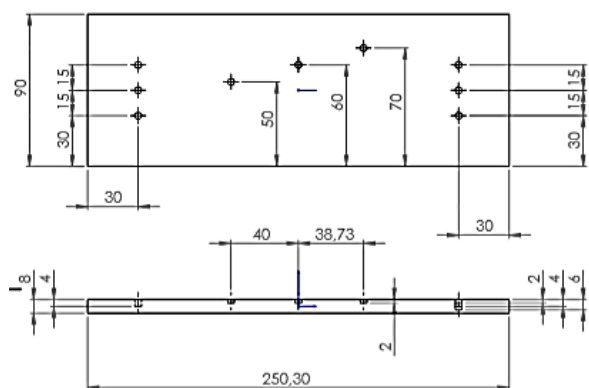


Figura 70 – Desenho técnico do corpo de prova.

Na Figura 71 pode-se ver a placa usada como corpo de prova para averiguar a qualidade da calibração.



Figura 71 - Corpo de prova.

Quanto às especificações do submenu *Part & Weld* face a esta placa, foi indicada a espessura de 8 mm, o material definido foi o alumínio, o tipo de amostra foi uma chapa e quanto ao tipo de soldadura, como não tinha qualquer tipo de solda, selecionou-se a opção

“none”. No submenu “Setup” foi estipulado o modo *PA* com que se iria trabalhar e a técnica de inspeção a soldadura. Quanto à sonda, esta como estava inserida no equipamento, foi detetada automaticamente, somente o calço teve de ser selecionado.

No que concerne às leis focais, foi estipulada uma configuração setorial que fornece um varrimento de múltiplos ângulos e o tipo de onda escolhido foi onda transversal, com uma velocidade de 3125 m/s, uma vez que o calço gera ondas transversais. A quantidade de elementos definida foram 16, o que se refere ao número de elementos que se deseja excitar, simultaneamente e, estabeleceu-se que o pulsador transmitia o impulso elétrico ao elemento número 1. Selecionou-se o elemento número 1 para iniciar a abertura ativa, e definiu-se um ângulo mínimo de 45° e o máximo de 70° com um passo de ângulo de 1°.

De seguida estipulou-se a profundidade do foco e depois a distância na qual os feixes de ultrassom focalizam o material inspecionado e por fim definiu-se a posição do calço relativamente á linha central da solda.

Depois de todas as configurações inseridas, passou-se à inspeção dos furos da placa em causa, posicionando o transdutor nas posições adequadas, com a ajuda da glicerina Figura 72.



**Figura 72** - Inspeção ultrassónica para a deteção dos furos existentes na placa.

Posteriormente passou-se à inspeção das placas com cordões de soldadura, para a deteção de defeitos e descontinuidades existentes nas mesmas.

#### 4.4 *Procedimento experimental*

Após realizar a configuração do equipamento e a verificação da inspeção face à localização dos furos, este está apto para ser usado na inspeção do cordão de solda das placas de alumínio. A inspeção por ultrassom *PA* foi realizada empregando-se ondas transversais sobre a soldadura. Cada varrimento foi realizado paralelamente ao eixo central do cordão de soldadura a uma distância fixa, utilizando um guia de referência, ilustrado na Figura 73.

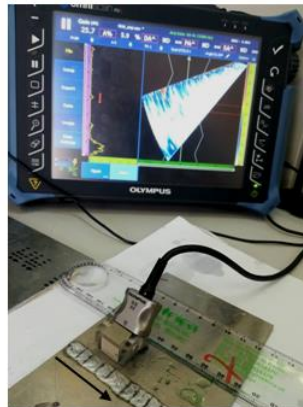


Figura 73 – Sentido de inspeção do cordão de solda.

As placas de alumínio usadas neste estudo têm uma espessura de, aproximadamente, 3 mm. Estas foram limpas de qualquer sujeira com um papel absorvente, para que o acoplamento entre a peça e o transdutor fosse bem efetuado, bem como o auxílio da glicerina. Foram efetuadas várias passagens com o transdutor ao longo do cordão, garantindo a detecção mais detalhada dos defeitos encontrados nas várias regiões. As placas têm o comprimento de 20 cm, 9,5 de largura e 4mm de espessura. As Placas com juntas soldadas por TIG são mostradas na Figura 74.

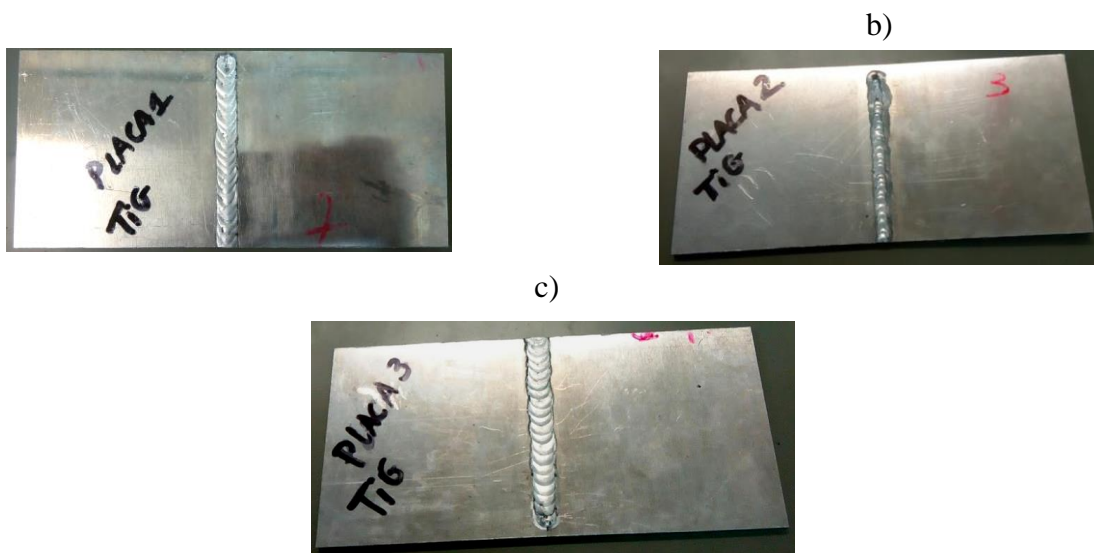


Figura 74 – Placas com juntas soldadas por TIG. A) Placa 1; b)Placa 2;c) Placa 3.

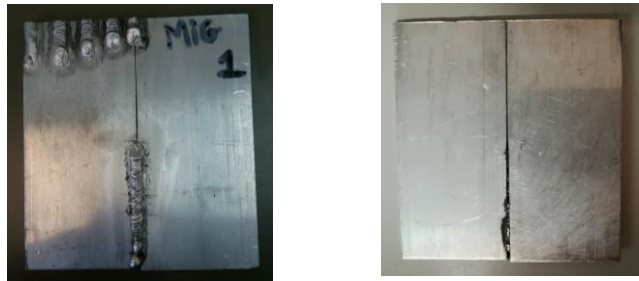
Os parâmetros de soldadura usados nas três placas para a formação da junta são mencionados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Parâmetros de soldadura.

	<b>Velocidade (mm/min)</b>	<b>Intensidade (Amp)</b>
Placa 1	150	100
Placa 2	400	
Placa 3	250	

#### 4.4.1 Placas com juntas soldadas por MIG

- **Placa 1**



**Figura 75** - Placa 1 com junta soldada por MIG.

- **Placa 2**



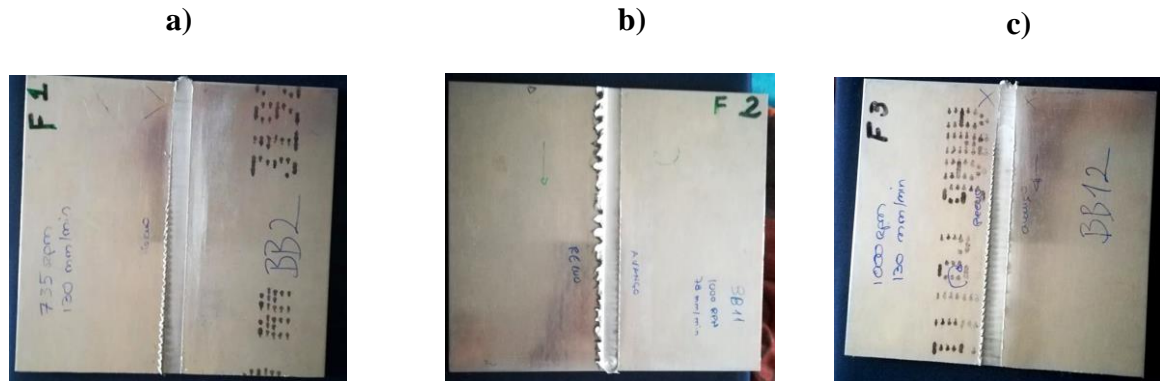
**Figura 76** - Placa 2 com junta soldada por MIG.

As dimensões das placas com juntas soldadas pelo processo MIG estão representadas na Tabela 7.

**Tabela 7** – Dimensões das placas com juntas soldadas por MIG.

	<b>Dimensões</b>		
	<b>Comprimento (cm)</b>	<b>Largura (cm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Placa 1	10,5	10	3
Placa 2	23,5	4	4

#### 4.4.2 Placas com juntas soldadas através de Friction Stir Welding



**Figura 77** – Placas com juntas soldadas através de *Friction Stir Welding*. a) Placa 1; b) Placa 2; c) Placa 3.

As dimensões das placas com junta soldada por FSW estão indicadas na Tabela 8.

**Tabela 8** – Dimensões das placas com juntas soldadas por FSW.

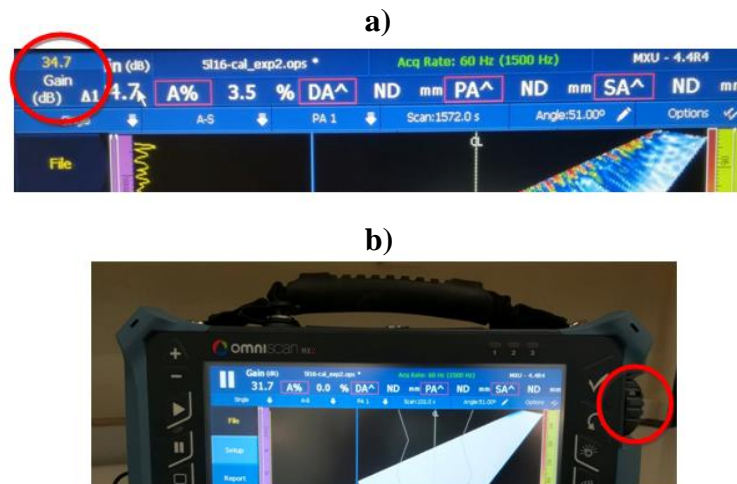
	<i>Dimensões</i>		
	<b>Comprimento (cm)</b>	<b>Largura (cm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Placa 1	19	20	3
Placa 2	21	23	3
Placa 3	19	20	3

A Tabela 9 mostra os parâmetros de soldadura utilizados na formação das juntas das placas pelo processo de *Friction Stir Welding*.

**Tabela 9** – Parâmetros de soldadura usados para a formação da junta nas diferentes placas pelo processo FSW.

	<b>Velocidade rotacional (rpm)</b>	<b>Velocidade de avanço (mm/min)</b>
Placa 1	130	735
Placa 2	78	1000
Placa 3	130	1000

Em passagens posteriores do transdutor foi sendo ajustado o ganho (*Gain*) do feixe de ondas, para uma melhor relação sinal/ruído, com o intuito de distinguir, de uma forma mais clara, os defeitos encontrados, para uma melhor análise das indicações. Contudo, em algumas inspeções, o ganho teve um valor mais alto e, conseqüentemente, o ruído aumentou, mas era necessário para não desvanecer o sinal de alguns defeitos. O valor do ganho aparece sempre na parte superior da tela e pode ser ajustado com o cursor rotativo do lado esquerdo, exibido na Figura 78 .



**Figura 78** – Campo do valor de ganho. **a)** Janela da função de ganho; **b)** Cursor rotativo de ajuste.

O procedimento de configuração é o mesmo que o usado no corpo de prova. Recorreu-se ao menu *Part & Weld* e introduziram-se todos os parâmetros necessários, acrescentado, neste caso, os parâmetros da geometria do cordão de soldadura, nomeadamente, a simetria, a altura e largura da zona da solda, bem como a altura e o valor do ângulo da raiz e do preenchimento da soldadura. Trata-se de uma placa de alumínio com 3 mm de espessura e com um tipo de solda em V.

De seguida, passou-se ao submenu “*Setup*”, onde se especificou a posição do transdutor relativamente ao cordão de soldadura, a profundidade do foco, o mínimo e máximo ângulo e a configuração das leis focais. De salientar, que ao definir a faixa de ângulos, deve-se ter cuidado para o feixe cobrir toda, ou o máximo possível, a região da solda, mas, simultaneamente, garantir que o feixe não passe na superfície do transdutor, o que pode fazer com que apareçam os denominados “ecos fantasma”. Estes ecos são falsas indicações adquiridos durante a inspeção, que podem limitar ou diminuir a qualidade dos dados adquiridos. Na Figura 79 pode-se ver a configuração do feixe estipulado neste trabalho, onde este toca ligeiramente no transdutor, mas cobre o máximo da zona do

cordão de soldadura. Como a espessura das placas é pequena, torna-se mais difícil controlar esta configuração, no entanto, foi possível dispor o feixe da forma mais adequada possível.

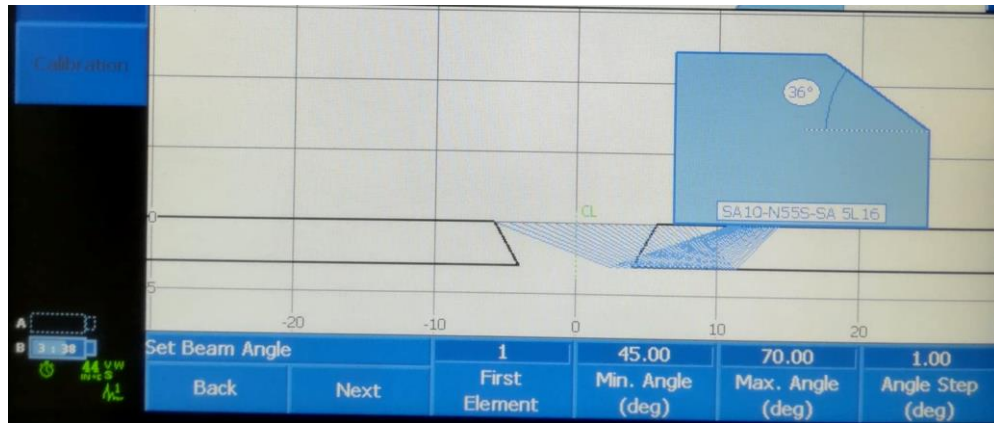


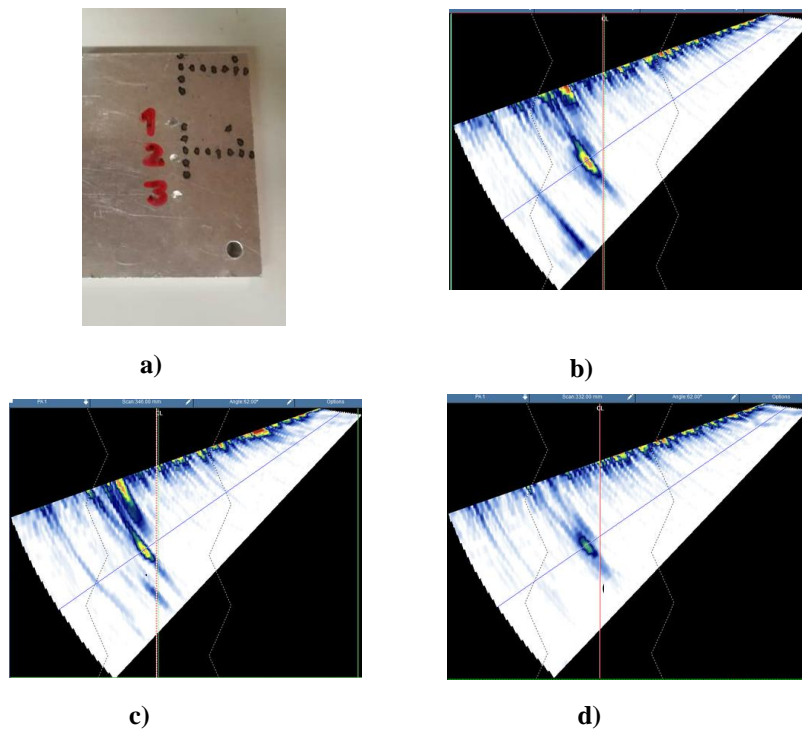
Figura 79 - Configuração do feixe emitido pelo transdutor.

## Capítulo 5: Análise e discussão de resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados deste estudo, nomeadamente, no que diz respeito à qualidade de inspeção na deteção dos furos da placa que serviu como corpo de prova bem como a análise da existência e caracterização de defeitos nas juntas soldadas das diferentes placas.

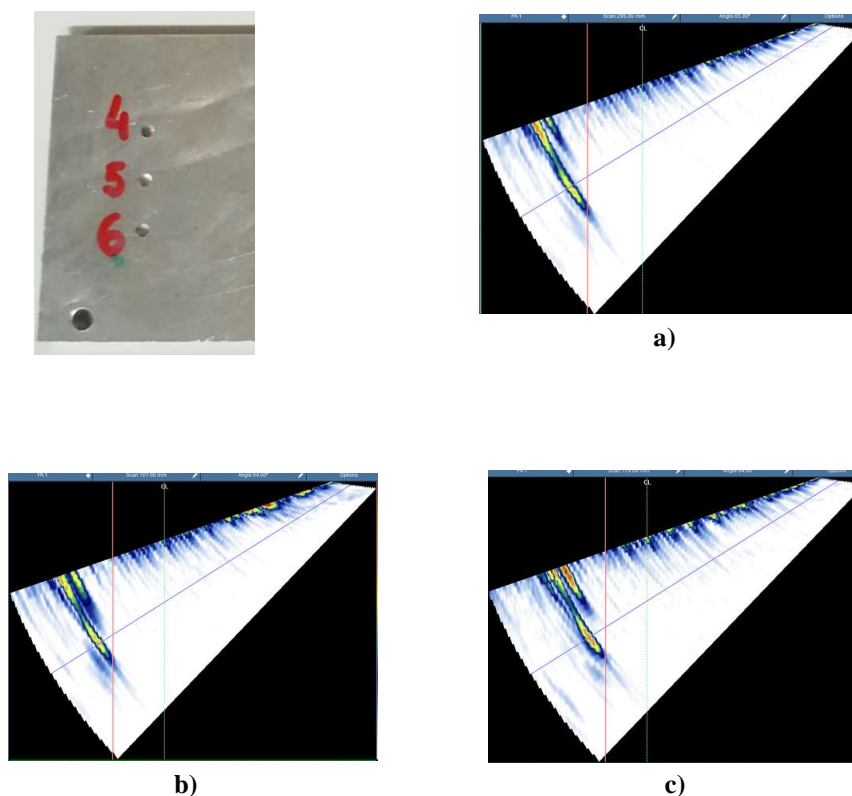
### 5.1 *Corpo de prova*

Visto que a espessura da placa com os furos é pequena, não é possível colocar na mesma imagem todos os furos da placa, mesmo com o ajuste da escala, pois acabaria por não se distinguirem na inspeção. Na Figura 80 podem se ver os furos detetados e exibidos de forma individual.



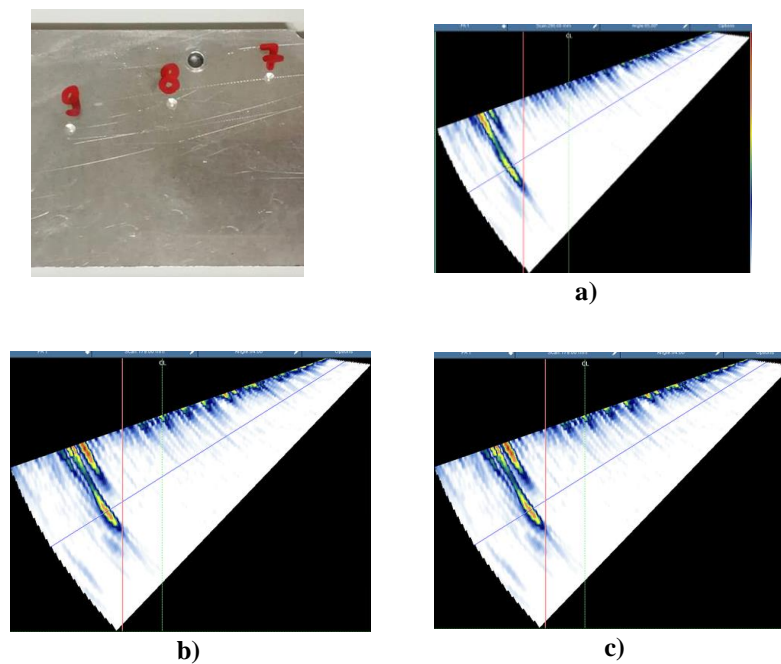
**Figura 80** – Deteção de furos. a) Deteção do furo 1; b) Deteção do furo 2; c) Deteção do furo 3.

Os três furos existentes na placa têm profundidades diferentes, sendo que o furo 1 apresenta a profundidade maior e o furo 3 a menor. Pela análise das imagens pode-se ver que a detecção corresponde à realidade, visto que a tonalidade do furo 1 é mais escura, apresentando uma zona vermelha maior e o furo 3 encontra-se mais desvanecido, exibindo uma menor profundidade. A Figura 81 mostra a detecção dos furos. 4, 5 e 6, que têm a mesma profundidade, aproximadamente, 4mm.



**Figura 81** – Detecção de furos. a) Detecção do furo 1; b) Detecção do furo 2; c) Detecção do furo 3.

A Figura 82 mostra a detecção dos furos. 7, 8 e 9, que têm a mesma profundidade, mas estão a distância distintas. Foi necessário mover o transdutor em linhas diferentes de referência para se detectarem os furos, uma vez que estão todos localizados em regiões diferentes.



**Figura 82** – Detecção de furos. Detecção do furo 7; b) Detecção do furo 8; c) Detecção do furo 9.

## 5.2 Casos de estudo

Quanto aos casos de estudo vão ser analisados os cordões de soldadura das placas que passaram pelos processos de soldadura MIG, TIG e *Friction Stir Welding*, para a deteção de defeitos internos. A análise dos dados recolhidos durante a inspeção foi realizada através do *software* OmniPC versão 4.1 da Olympus. Este *software* de análise de dados contém os mesmos recursos que o OmniScan Mx2, nomeadamente, os cursores de medição para dimensionamento de defeitos, sendo mais prático, uma vez que instalado no computador se consegue manipular mais facilmente os dados.

Durante a análise dos defeitos foram registados os seguintes parâmetros: amplitude, ângulo, comprimento, altura, largura, profundidade e localização. Para visualização foram utilizadas as vistas *A-scan* e *S-scan*.

### 5.2.1 Dimensionamento dos defeitos

Após realizar a inspeção, longitudinalmente, ao cordão de soldadura das placas e identificar a ocorrência de alterações, é possível assinalar os pontos onde as falhas se

detetam e onde estas desaparecem, para, posteriormente, ser possível averiguar as características de cada uma.

Para analisar o defeito, deve-se colocar o cursor de dados (linha azul) a passar em cima deste, que indica o ângulo que o defeito foi detetado, ao mesmo tempo que exibe o pico do sinal correspondente a este. Depois, é necessário colocar a porta a restringir o sinal para ser possível efetuar as leituras correspondentes aos dados deste, principalmente, a profundidade a que este se encontra. Através dos cursores de medição foi possível delimitar a falha a uma determinada área através dos cursores horizontais e verticais, possibilitando a indicação da altura, largura e comprimento da mesma. Uma vez que a falha aparece com diferentes tonalidades, deve-se delimitar o defeito a partir de, aproximadamente, 50% da amplitude do sinal, correspondente à cor amarela. A Figura 83 mostra o procedimento efetuado para a caraterização de um defeito.

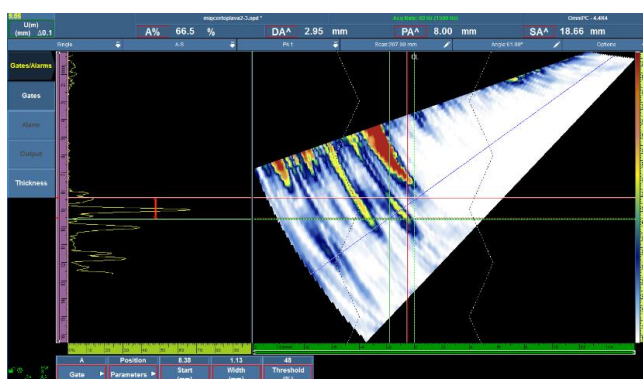


Figura 83 – Procedimento usado para a medição e caraterização do defeito.

### 5.2.1.1 Placas soldadas através do processo MIG

A Figura 84 mostra os defeitos assinalados, encontrados na inspeção da Placa 1.

- **Placa1**

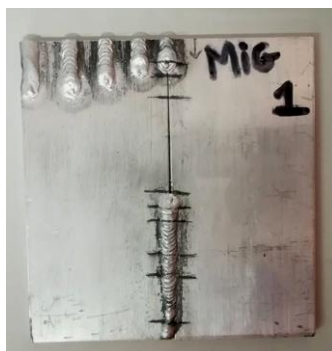


Figura 84 – Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1.

Com todas as falhas previamente identificadas e demarcadas na peça inspecionada, estas falhas podem ser analisadas mais criteriosamente, segundo as tabelas indicadas de seguida. As falhas foram registadas segundo regiões, uma vez que foram efetuadas várias passagens do transdutor ao longo do cordão e, inerente a cada região, foram indicados os defeitos existentes. Foram criadas tabelas para facilitar a interpretação dos dados referentes à medição e caracterização de defeitos.

A Figura 85 mostra um dos defeitos encontrados na Placa 1 da região pelo processo de soldadura MIG.

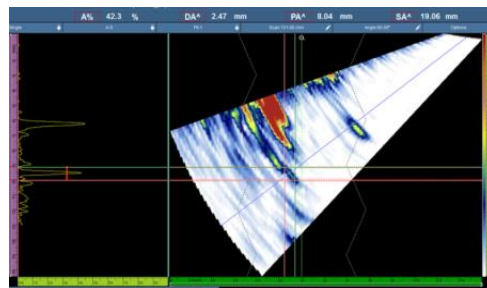


Figura 85 – Defeito 3 da região 1 com junta soldada pelo processo MIG.

Para se detetar e interpretar um defeito/descontinuidade é necessário que ocorra uma variação no modo de propagação sonora no material. Normalmente, tem-se um eco de entrada referente à interface entre o transdutor e a superfície da peça e um eco de fundo, que diz respeito ao fundo da peça (espessura). Se aparecer um eco no meio destes dois, está-se presente um defeito. Se o defeito for grande faz com o eco de fundo desapareça, se for um defeito pequeno o eco de fundo diminui, mas continua a aparecer, como está exemplificado na Figura 86.

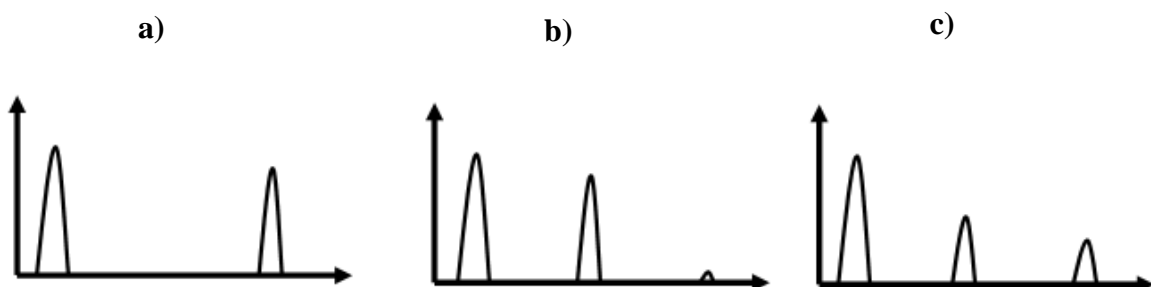


Figura 86 – Ecos obtidos durante uma inspeção de defeitos. a) Pico de entrada e pico de fundo; b) Pico de entrada e defeito grande; c) Pico de entrada, defeito pequeno e eco de fundo.

Quando se efetua a passagem com o transdutor pela placa, numa determinada região, este faz a varredura de toda a espessura da peça, e no momento em que as ondas interceitam a falha vão refletir e retornar essa informação na tela do aparelho, que é o pico mais acentuado que aparece na Figura 87. Quanto maior a profundidade a que está a falha, maior é a amplitude do sinal obtido.

Visualmente também se pode distinguir pela forma que a falha apresenta, ou seja, uma macha individual isolada com diferentes tonalidades, que se mantém durante algum tempo e depois desaparece, ao contrário do ruído, que se mantém ao longo da inspeção mais ou menos com o mesmo aspeto, dependendo do aumento/diminuição do ganho.

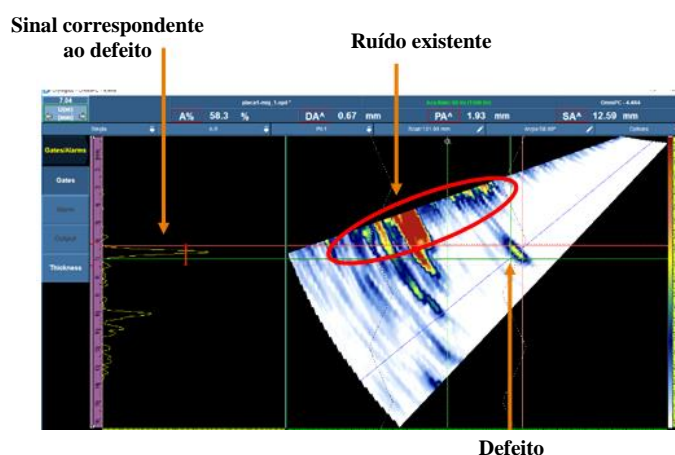


Figura 87 – Interpretação das indicações relacionadas com a deteção do defeito/falha.

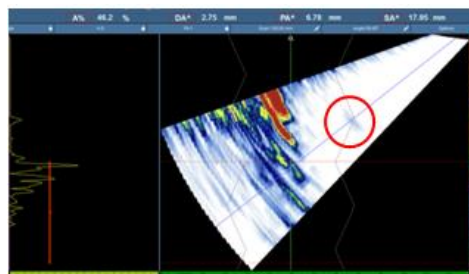
Nas tabelas que se seguem apresenta-se a quantidade de defeitos encontrados em cada região da solda, a amplitude do sinal correspondente ao defeito/descontinuidade encontrada, o ângulo no qual foi detetada a falha, o dimensionamento da falha (comprimento, altura e largura) e a localização da falha relativamente à junta soldada. De salientar que, estão indicados nas tabelas somente alguns exemplos dos defeitos mais significativos, sendo os restantes indicados no Anexo 4. As falhas que tiverem um comprimento menor que 1 mm serão consideradas descontinuidades e não defeitos.

**Tabela 10** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 1 pelo processo MIG.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	55,2	63	1,48	0,97	1,11	2,79	lado esquerdo do cordão
Defeito 2	58,3	58	1,14	0,72	0,88	0,67	limite do lado direito do cordão
Defeito 3	42,3	60	1,29	0,87	0,95	2,47	Junto á raiz do cordão

**Tabela 11** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo MIG.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	52,8	53	0,98	0,67	0,72	0,01	raiz do cordão
Defeito 2	56	58	1,31	1	0,85	2,24	raiz do cordão
Defeito 3	41,5	58	1,07	0,65	0,84	0,47	limite do lado direito do cordão
Defeito 4	71,2	62	1,17	0,87	0,78	2,76	junto á raiz do cordão



**Figura 88** - Desaparecimento do defeito 4 da região 2, identificado na região 3 da placa.

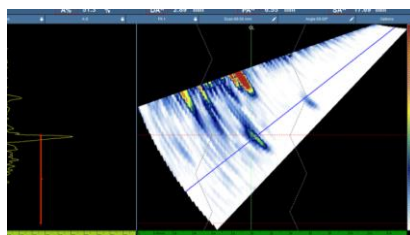
**Tabela 12** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 1 pelo processo MIG.

Região 4	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	72,8	67	1,61	1,17	1,11	0,8	Junto ao cordão

De salientar que na região 5 mantiveram-se os mesmos defeitos encontrados na região 4 da placa1.

**Tabela 13** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 1 pelo processo MIG.

Região 6	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	78,7	68	3,15	2,47	1,96	2,08	junto á parede do lado esquerdo do cordão
Descontinuidade 2	52,8	59	0,98	0,7	0,69	2,14	raiz do cordão



**Figura 89** - Desaparecimento do defeito 2 da região 6, identificado na região 7 da placa.

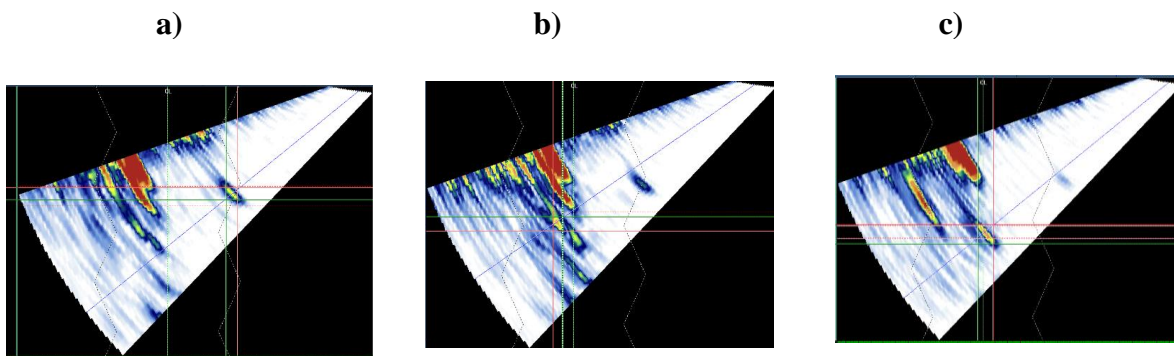
**Tabela 14** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo MIG.

Região 8	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	72,8	57	2,24	1,12	1,94	2,65	Raiz do cordão

**Tabela 15** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo MIG. Mig 2

Região 9	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	59,1	69	1,12	0,65	0,91	1,11	Junto do limite do lado esquerdo do cordão
Defeito 2	45,4	59	1,23	0,82	0,91	2,87	Raiz do cordão
Defeito 3	48,9	57	1,05	0,7	0,78	0,52	Junto do limite do lado direito do cordão

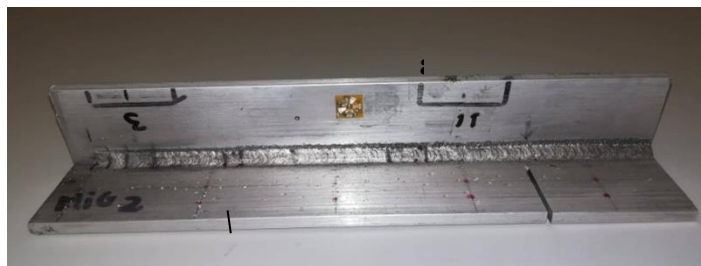
A Figura 90 mostra a detecção de alguns dos defeitos encontrados na Placa 1.



**Figura 90** – Detecção de defeitos da placa 1 pelo processo MIG. a) Defeito 2 da região 1; b) Defeito 4 da região 2; c) Defeito 2 da região 6.

A Figura 91 mostra os defeitos assinalados, encontrados na inspeção da Placa 2 com junta soldada pelo processo MIG.

- **Placa 2**



**Figura 91** - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2.

**Tabela 16** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	76,3	57	1,99	1,3	1,5	1,53	raiz da solda

**Tabela 17** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	84,2	59	3,5	2,17	2,74	2,43	raiz da solda

**Tabela 18** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 3	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	66,5	61	1,75	1,2	1,27	2,95	raiz da solda

**Tabela 19** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo MIG.

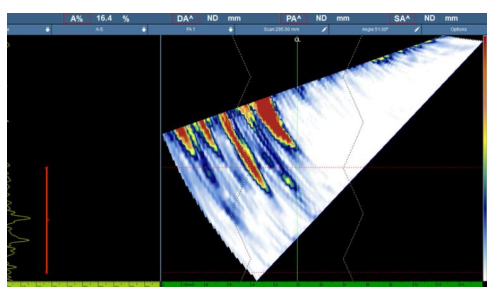
Região 4	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	50,5	62	1,72	1,2	1,24	0,69	junto da parede lateral do cordão

**Tabela 20** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 5	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	77,1	52	1,34	1,11	0,75	2,45	junto da raiz do cordão

**Tabela 21** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 6	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	56,8	57	1,34	0,75	1,11	1,96	Raiz do cordão
Defeito 2	74,8	61	1,77	1,12	1,37	2,74	Raiz do cordão
Defeito 3	52,8	61	1,06	0,75	0,76	0,58	Parede lateral esquerda do cordão
Defeito 4	54,4	62	1,32	0,92	0,95	2,61	Lado esquerdo do cordão
Defeito 5	78,7	68	2,77	2,05	1,86	1,43	Junto á parede lateral esquerda do cordão

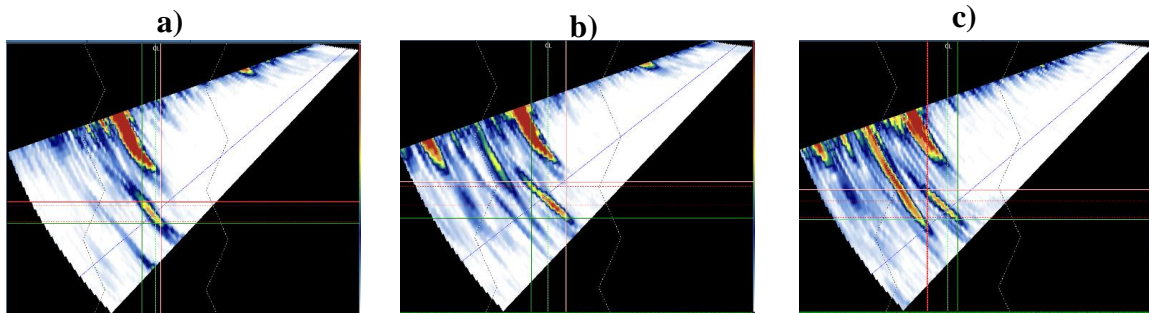


**Figura 92** – Desaparecimento de alguns defeitos da região 6, assinalado na região 7 da Placa 2.

**Tabela 22** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo MIG.

Região 8	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	76,3	57	2,96	1,8	2,35	1,66	raiz do cordão

A Figura 93 mostra vários defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 2 pelo processo MIG.



**Figura 93** - Detecção de defeitos da placa 2 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 2; c) Defeito 1 da região 8.

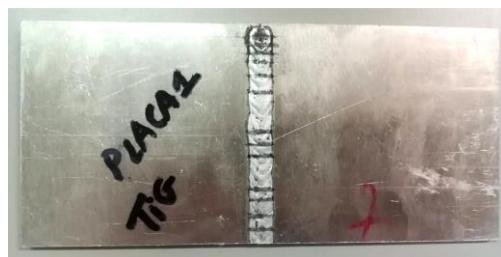
Através dos resultados obtidos relativamente à deteção de defeitos nas placas com juntas soldadas com o processo MIG, é assinalada a falta de fusão ao longo da raiz do cordão nas duas placas. Em algumas regiões da Placa 1 e 2 encontram-se alguns defeitos juntos às paredes do cordão. O maior defeito encontrado na Placa 1 foi junto à parede lateral esquerda do cordão, cujo comprimento é de 3,15 mm, a largura 1,96 mm e a altura 2,47mm. O defeito que se encontra a maior profundidade situa-se no lado esquerdo do cordão a 2,19 mm da superfície da placa.

O maior defeito detetado na Placa 2 encontra-se na raiz da solda, com 3,5 mm de comprimento, 2,17mm de altura e 2,74 mm de largura. O defeito que se encontra a maior profundidade encontra-se também na raiz do cordão a 2,74 mm.

#### 5.2.1.2 Placas com juntas soldadas através do processo TIG

A Figura 94 mostra a demarcação dos defeitos encontrados na Placa 1.

- **Placa 1**



**Figura 94** - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1.

**Tabela 23** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa pelo processo TIG.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Descontinuidade 1	61,1	60	0,95	0,63	0,72	2,62	raiz do cordão
Defeito 2	47	56	1,09	0,72	0,82	0,55	Raiz do cordão
Defeito 3	61,1	62	2,62	1,87	1,83	2,68	lado esquerdo do cordão

Os defeitos detetados na região 1 mantiveram-se na região 2 da placa 2.

**Tabela 24** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 3	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,1	53	1,12	0,72	0,85	1,94	Lado esquerdo do cordão

**Tabela 25** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 4	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	77,1	54	2,26	1,38	1,79	2,17	lado esquerdo do cordão
Defeito 2	59,1	54	2,04	1,13	1,7	1,75	lado esquerdo do cordão

**Tabela 26** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 5	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	93,2	54	2,86	1,73	2,28	1,98	lado esquerdo do cordão

Os defeitos detetados na região 5 mantiveram-se na região 6 da placa 2.

**Tabela 27** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 7	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	81,8	54	2,9	1,82	2,25	2,35	Junto ao lado esquerdo do cordão

**Tabela 28** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo TIG

Região 8	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	54,4	56	1,79	1,12	1,37	2,14	Limite lateral esquerdo do cordão
Defeito 2	80,2	57	4,31	2,85	3,23	0,61	Lado esquerdo do cordão

**Tabela 29** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo TIG

Região 9	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	69,7	55	2,11	1,38	1,6	2,28	Limite lateral esquerdo do cordão
Defeito 2	57,6	55	2,53	1,75	1,83	1,15	Junto da raiz do cordão

**Tabela 30** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 1 pelo processo TIG

Região 10	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	76,3	55	2,02	1,27	1,57	1,33	Lado esquerdo do cordão
Defeito 2	57,5	55	1,57	1	1,21	0,97	Lado esquerdo do cordão

**Tabela 31** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 11 da Placa 1 pelo processo TIG

Região 11	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	86,1	54	2,34	1,5	1,8	1,61	Lado esquerdo do cordão

**Tabela 32** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 12 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 12	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Descontinuidade 1	59,1	53	0,78	0,48	0,62	1,65	perto da raiz do cordão
Descontinuidade 1	55,2	53	0,81	0,52	0,62	2,71	limite lateral direito do cordão

Tabela 33 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 13	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	54,4	53	1,25	0,72	1,01	1,79	perto da raiz do cordão

A Figura 95 mostra vários defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 2 pelo processo MIG.

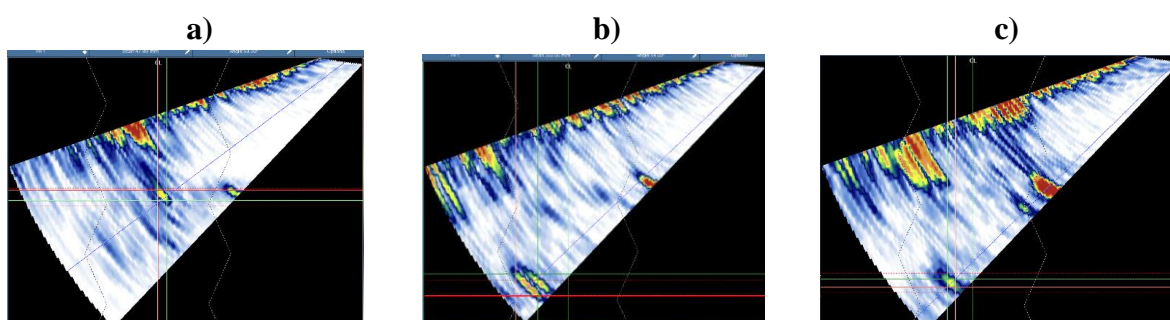


Figura 95 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 4; c) Defeito 1 da região 12.

- **Placa 2**

A Figura 96 mostra a delimitação dos defeitos encontrados na Placa 2.



Figura 96 - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2.

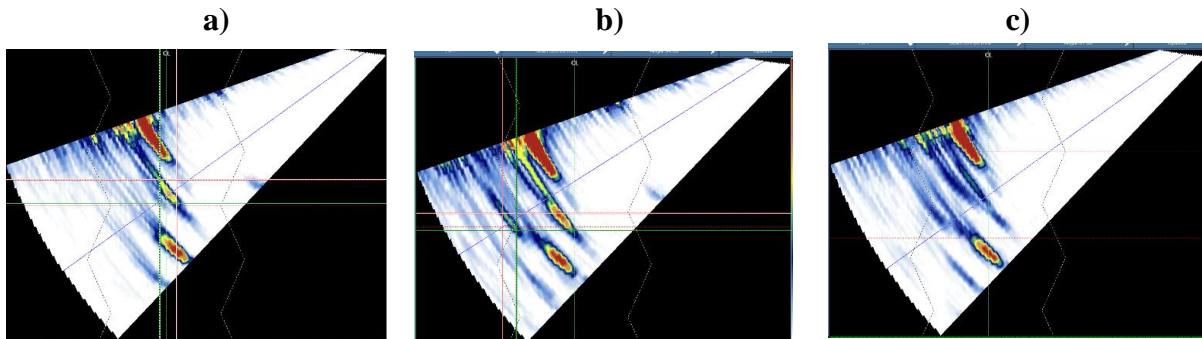
Tabela 34 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 2 pelo processo TIG.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	74,8	61	1,79	1,32	1,21	2,36	raiz do cordão
Defeito 2	67,3	56	2,63	1,55	2,12	1,12	raiz do cordão

Tabela 35 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 2 pelo processo TIG.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	49,7	64	1,43	0,97	1,05	2,44	limite lateral esquerdo do cordão

A Figura 97 mostra vários defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 2 pelo processo TIG.



**Figura 97** -. Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 2 da região 1; c) Defeito 1 da região 2.

- **Placa 3**

A Figura 99 mostra a demarcação dos defeitos encontrados na Placa 1.



**Figura 98** - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 3.

**Tabela 36** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 3 pelo processo TIG.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	68,1	55	1,54	0,95	1,21	0,07	raiz do cordão
Defeito 2	75,5	62	3,01	2,2	2,06	2,8	junto da raiz do cordão

**Tabela 37** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo TIG.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	79,5	55	2,06	1,33	1,57	0,12	raiz do cordão

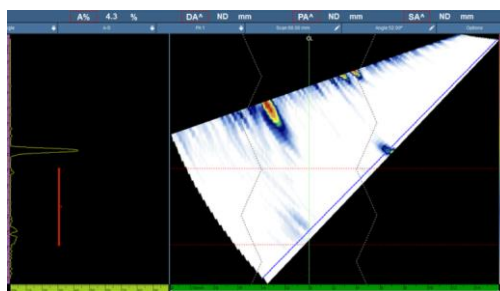


Figura 99 – Desaparecimento do defeito 1 da região 2, registado na região 3 da placa.

Tabela 38 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 4 da Placa 3 pelo processo TIG.

Região 4	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	52	55	1,51	1,02	1,11	1,1	perto da raiz do cordão

Tabela 39 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 3 pelo processo TIG.

Região 5	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	50,5	60	1,62	1,08	1,21	2,82	Raiz do cordão
Defeito 2	45,4	54	2	1,77	0,91	1,01	Junto á raiz do cordão

A Figura 100 mostra vários defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 3 pelo processo TIG.

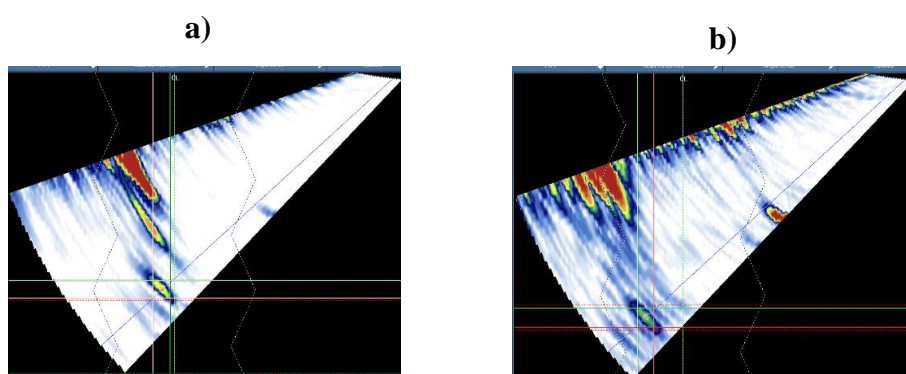


Figura 100 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 4.

Na junta soldada pelo processo TIG, Placa 1, encontraram-se a maioria dos defeitos no lado esquerdo do cordão, sendo que o maior defeito detetado tem as seguintes dimensões: 4,31 mm de comprimento, 2,85 mm de altura e 3,23 mm de largura. O defeito

com maior profundidade localizou-se no limite lateral direito do cordão a 2,71mm da superfície.

Na Placa 2 foram detetados a maioria dos defeitos na raiz do cordão, uma vez que ao longo do cordão houve falta de fusão do material, sendo que o maior tinha 2,63 mm de comprimento, 1,55 mm de altura e 2,12 mm de largura. O único defeito detetado no limite lateral esquerdo do cordão foi o que se encontrou a maior profundidade, sendo esta de 2,44 mm.

Os defeitos encontrados na Placa 3 situam-se, maioritariamente, na raiz do cordão e junto desta. De notar que foi detetado um defeito no lado direito do cordão, situado na zona termicamente afetada, possivelmente obtido pelo aquecimento e solidificação dessa zona. Este defeito não foi medido, pois não aparecia por completo, na inspeção.

### 5.2.1.3 Placas com juntas soldadas através do processo Friction Stir Welding

- **Placa 1**

A Figura 101 mostra a marcação dos defeitos encontrados na Placa 1.



**Figura 101** - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 1.

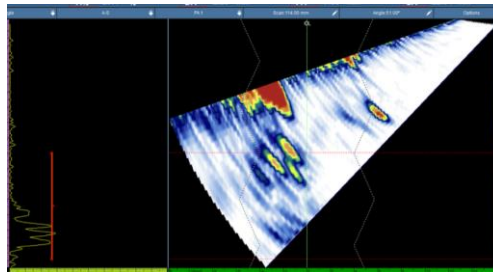
**Tabela 40** – Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 41 da Placa 1 pelo processo *Friction Stir Welding*.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	59,9	62	2,61	1,47	2,15	0,42	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	60,7	63	1,7	1,12	1,27	2,4	junto da parede lateral esquerda do cordão
Defeito 3	75,5	62	2,22	1,6	1,53	2,65	lado esquerdo do cordão
Defeito 4	69,7	62	1,43	0,9	1,11	2,65	raiz do cordão

**Tabela 41** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 1 pelo processo FSW.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	69,7	58	1,76	1,25	1,24	1,73	raiz do cordão
Defeito 2	76,3	58	1,49	0,83	1,24	0,47	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	90,8	61	1,94	1,22	1,5	2,97	lado esquerdo do cordão
Defeito 4	77,1	64	2,27	1,5	1,7	2,11	junto á raiz do cordão

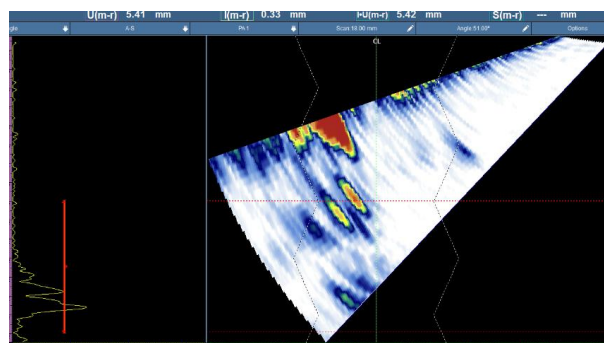
Os defeitos da região 2 mantiveram-se na região 3 da placa. A Figura 102 mostra esses defeitos existentes.



**Figura 102** – Defeitos detetados na região 2 e 3 da placa 1 com junta soldada por *Friction Stir Welding*.

Alguns defeitos da região 2 começam a desaparecer na região 4 da placa.

A Figura 103 mostra os defeitos que restam da região 2, detetados na região 5 da placa.



**Figura 103** – Visualização dos defeitos que restam da região 2, detetados na região 5 da placa.

**Tabela 42** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 1 pelo processo FSW.

Região 6	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	69,7	57	1,44	0,82	1,17	1,14	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	80,2	65	2,4	1,62	1,76	2,49	junto da parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 43** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 1 pelo processo FSW.

Região 7	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	78,7	56	1,56	0,95	1,24	0,6	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	86,9	65	2,39	1,65	1,73	2,62	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 3	57,5	64	1,53	1,05	1,11	2,47	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 4	48,5	60	1,11	0,75	0,82	1,41	perto da parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 44** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 1 pelo processo FSW.

Região 8	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	77,9	62	2,41	1,67	1,73	2,61	junto da parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	69,7	57	1,43	0,85	1,14	0,52	parede lateral direita do cordão

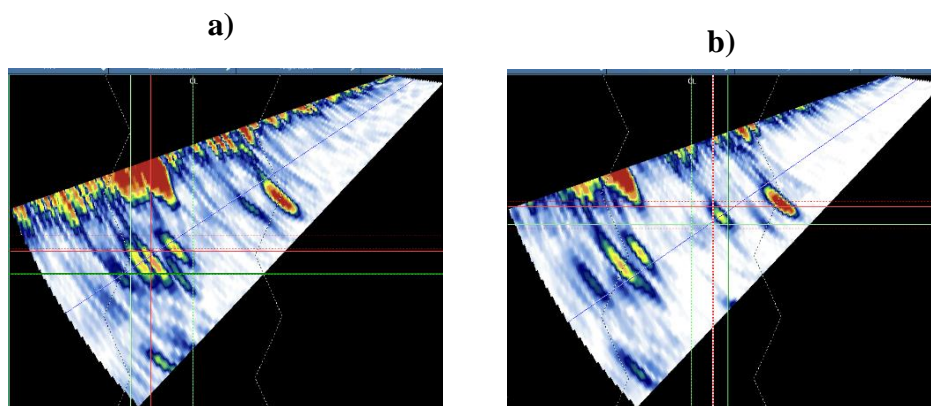
**Tabela 45** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 1 pelo processo FSW.

Região 9	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	51,3	62	2,12	1,5	1,5	1,94	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	43,8	62	1,6	1,05	1,21	2,57	parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 46** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 1 pelo processo *Friction Stir Welding*.

Região 10	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,1	62	1,29	0,87	0,95	1,06	lado direito do cordão
Defeito 2	78,7	60	2,49	1,45	2,02	0,02	parede lateral direita do cordão

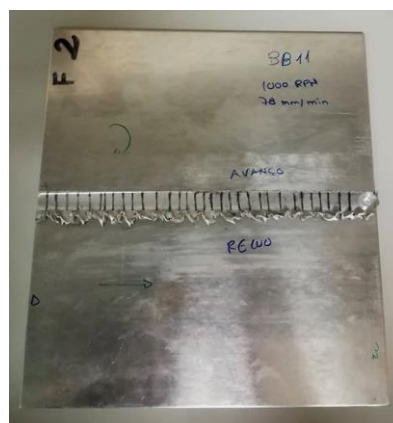
A Figura 104 mostra alguns defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 1 pelo processo *Friction Stir Welding*.



**Figura 104** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo *Fricção Stir Welding*. a) Defeito 2 da região 1; b) Defeito 1 da região 10.

- **Placa 2**

A Figura 105 exibe a delimitação dos defeitos encontrados no cordão da Placa 2.



**Figura 105** - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 2.

**Tabela 47** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 2 pelo processo *Friction Stir Welding*.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Descontinuidade 1	49,7	56	0,88	0,47	0,75	0,69	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	73,2	60	1,45	0,85	1,17	0,45	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	77,9	65	2,85	1,82	2,19	2,09	lado esquerdo do cordão

**Tabela 48** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 2 pelo processo FSW

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	75,5	55	1,87	1,02	1,57	0,68	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	72,8	62	1,68	1,1	1,27	0,13	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	62,6	61	2,55	1,77	1,83	2,76	lado esquerdo do cordão
Defeito 4	60,7	64	1,59	1	1,24	2,7	lado esquerdo do cordão
Defeito 5	56,8	65	1,9	1,27	1,4	1,89	lado esquerdo do cordão

**Tabela 49** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 3	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,1	62	2,14	1,17	1,79	0,06	lado direito do cordão
Defeito 2	75,5	63	2,12	1,4	1,6	2,47	lado esquerdo do cordão
Defeito 3	61,8	63	1,06	0,67	0,82	2,72	lado esquerdo do cordão

Os defeitos da região 3 mantiveram-se na região 4 da Placa 2.

**Tabela 50** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 5 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 5	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	74,8	56	1,2	0,7	0,98	0,51	junto a parede lateral direita do cordão (parte de fora)
Defeito 2	57,5	62	2,16	1,3	1,73	0,02	parede lateral direita do cordão

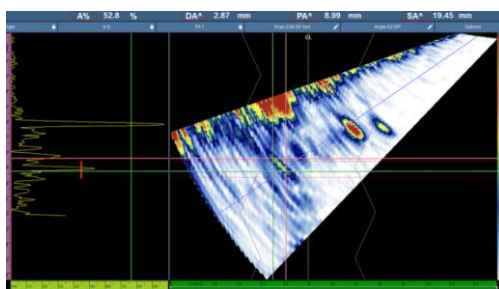
**Tabela 51** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 6	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	60,7	63	1,44	0,92	1,11	2,72	lado esquerdo do cordão
Defeito 2	73,2	62	1,89	1,05	1,57	0,02	parede lateral direita do cordão

**Tabela 52** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 2 pelo processo FSW.

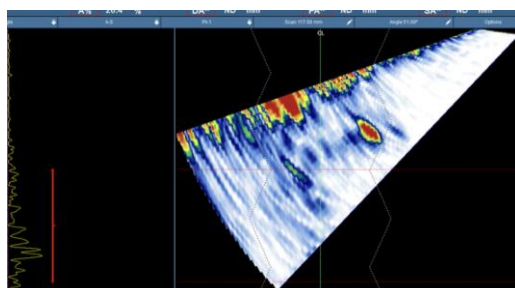
Região 7	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	59,1	57	1,08	0,62	0,88	0,3	Limite direito do cordão
Defeito 2	70,5	58	2,19	1,3	1,76	1,05	Junto a parede lateral direita do cordão
Defeito 3	52,8	62	1,40	0,85	1,11	2,87	Lado esquerdo do cordão

A Figura 106 mostra os defeitos encontrados na região 7 da placa 2 com junta soldada pelo processo *Friction Stir Welding*.



**Figura 106** – Defeitos detetados na região 7 da placa 1.

A Figura 107 exibe o desaparecimento do defeito 1 da região 7, assinalado na região 8 da placa.



**Figura 107** – Desaparecimento do defeito 1 da região 7, assinalado na região 8 da placa.

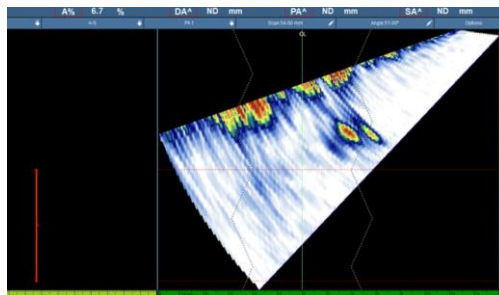
**Tabela 53** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 9	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	48,5	56	1,08	0,57	0,91	0,51	junto a parede lateral direita do cordão (parte de fora)
Defeito 2	58,3	60	1,65	1,05	1,27	0,49	parede lateral direita do cordão

**Tabela 54** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 10	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Descontinuidade 1	59,1	56	0,82	0,5	0,65	0,73	junto a parede lateral direita do cordão (parte de fora)
Defeito 2	68,9	58	1,84	1,15	1,44	1,01	parede lateral direita do cordão

Os defeitos detetados na região 10, mantiveram-se não região 11, restando alguns defeitos identificados na região 12.



**Figura 108** – Defeitos que restaram da região 10 identificados na região 12.

**Tabela 55** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 2 pelo processo *Friction Stir Welding*.

Região 13	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	82,6	60	1,5	0,97	1,14	0,85	junto a parede lateral direita do cordão
Defeito 2	54,4	60	2,11	1,25	1,7	0,02	parede lateral direita do cordão

**Tabela 56** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 14 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 14	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Descontinuidade 1	62,6	56	0,93	0,5	0,78	0,95	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	53,6	59	0,97	0,57	0,78	0,77	parede lateral direita do cordão

**Tabela 57** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 15 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 15	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,1	57	1,06	0,63	0,85	0,64	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	67,3	64	2,1	1,47	1,5	2,63	perto da parede lateral esquerda do cordão
Descontinuidade 3	54,4	60	0,92	0,57	0,72	1,32	lado direito do cordão
Defeito 4	48,9	60	1,46	0,82	1,21	0,85	lado direito do cordão

**Tabela 58** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 16 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 16	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	68,1	54	2,82	1,7	2,25	1,08	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	70,5	60	1,53	0,97	1,17	0,89	perto da parede lateral direita do cordão

**Tabela 59** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 17 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 17	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	81,8	56	1,37	0,8	1,11	0,6	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	56,8	60	1,18	0,6	1,01	0,73	junto á parede lateral direita do cordão
Defeito 3	54,4	63	1,71	1,17	1,24	2,87	junto á parede lateral esquerda do cordão
Defeito 4	43	63	1,43	0,97	1,04	2,85	junto á parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 60** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 18 da Placa 2 pelo processo FSW.

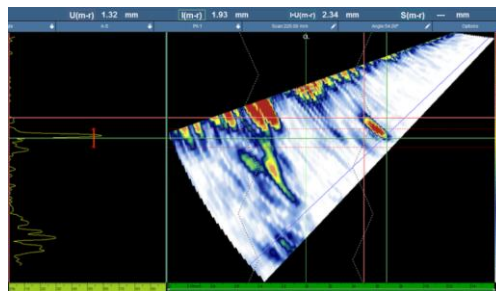
Região 18	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	65,8	60	2,51	1,4	2,09	0,06	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	56,8	63	1,43	0,97	1,04	2,99	perto da parede lateral esquerda do cordão

Os defeitos detetados na região 18 mantiveram-se na região 19, desaparecendo o defeito 1 na região 20.

**Tabela 61** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 21 da Placa 2 pelo processo FSW.

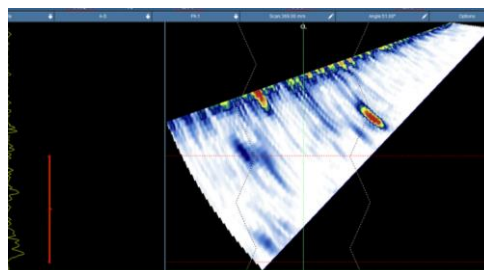
Região 21	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	80,2	63	3,83	3,27	1,99	2,63	perto da parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	59,1	54	2,34	1,32	1,93	0,94	parede lateral direita do cordão

A Figura 109 mostra os defeitos detetados na região 21 da placa 2 com junta soldada pelo processo *Friction Stir Welding*.



**Figura 109** - Detecção de defeitos da região 21 da Placa 2 pelo processo FSW.

Os defeitos da região 21 mantiveram-se na região 22. Aparecem novamente na região 23 e na região 24 ficou somente o defeito apresentado na Figura 110.



**Figura 110** – Defeito restante da região 23.

**Tabela 62** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 25 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 25	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	56	61	1,49	0,87	1,21	0,72	perto da parede lateral direita do cordão

**Tabela 63** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 26 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 26	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	64,2	59	2,8	2,15	1,79	1,41	junto á parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	59,9	65	2,05	1,4	1,5	2,95	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 3	52,8	52	1,21	0,82	0,88	2,3	lado esquerdo do cordão
Defeito 4	36,4	52	0,9	0,55	0,72	2,94	perto da parede lateral esquerda do cordão

Os defeitos da região 26 mantiveram-se na região 27 da placa.

**Tabela 64** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 28 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 28	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	66,5	61	1,98	1,42	1,37	2,88	perto da raiz do cordão
Defeito 2	54,4	63	1,62	1	1,27	2,95	perto da parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 65** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 29 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 29	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	73,2	60	1,47	1,14	0,92	0,57	Junto ao limite lateral direito do cordão
Defeito 2	59,1	60	1,17	0,77	0,88	0,85	perto da parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 66** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 30 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 30	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	81	62	2,22	1,35	1,76	0,54	lado direito do cordão
Defeito 2	52	59	1,52	0,87	1,24	0,85	junto á parede lateral direita do cordão
Defeito 3	59,1	60	2,43	1,4	1,99	0,18	parede lateral direita do cordão

**Tabela 67** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 31 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 31	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	77,9	63	2,23	1,52	1,63	0,65	lado direito do cordão
Defeito 2	51,3	61	1,91	1,3	1,4	2,34	lado direito do cordão

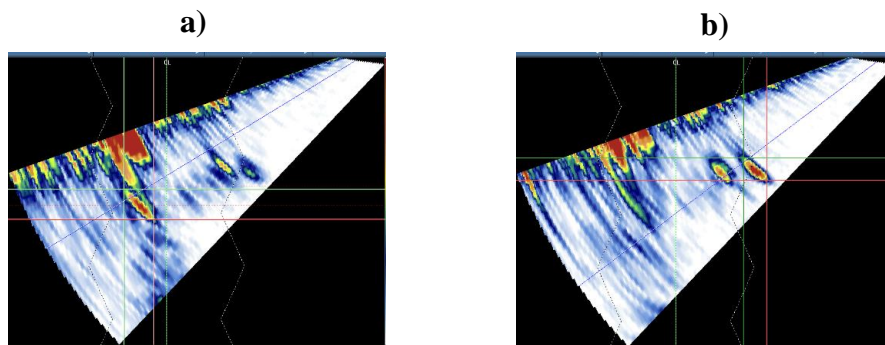
**Tabela 68** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 32 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 32	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,8	59	2,86	2,05	1,99	1,49	junto à parede lateral direita do cordão

**Tabela 69** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 33 da Placa 2 pelo processo FSW.

Região 33	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	73,2	63	1,94	1,27	1,47	2,62	lado esquerdo do cordão
Defeito 2	53,6	63	1,97	1,35	1,44	2,7	junto à parede lateral esquerda do cordão
Descontinuidade 3	52,8	61	0,96	0,6	0,75	2,46	lado esquerdo do cordão

A Figura 111 mostra alguns defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 2 pelo processo *Friction Stir Welding*.



**Figura 111** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo *Friction Stir Welding*. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 13.

- **Placa 3**

A Figura 112 mostra a marcação dos defeitos encontrados no cordão da Placa 3.

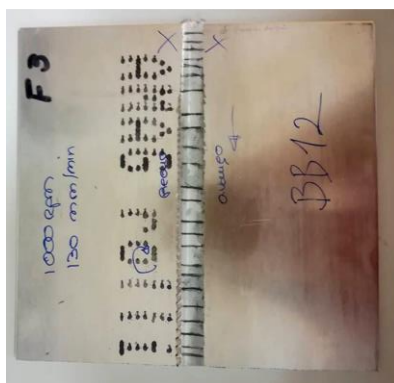


Figura 112 - Indicação dos defeitos encontrados na Placa 3.

Tabela 70 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 1 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 1	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	58,3	58	2,77	1,9	2,02	1,78	junto á raiz do cordão
Defeito 2	42,3	60	1,43	0,97	1,04	1,68	lado esquerdo do cordão
Defeito 3	47,8	64	1,64	1,15	1,17	2,18	lado esquerdo do cordão

Tabela 71 - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 2 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 2	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	56	57	1,5	0,85	1,24	0,34	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	70,5	63	2,26	1,5	1,7	2,99	lado direito do cordão

Os defeitos da região 2 mantiveram-se na região 3 da placa, começando a desaparecer alguns na região 4 da placa. O único defeito detetado na região 4 manteve-se na região 5 da placa 3 com junta soldada por *Friction Stir Welding*, como se pode ver na Figura 113.

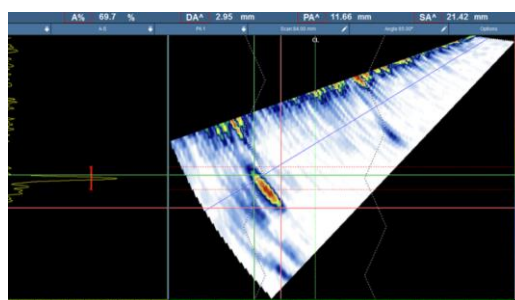


Figura 113 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 5.

**Tabela 72** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 3 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 5	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	69,7	65	2,96	2,02	2,15	2,95	parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 73** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 6 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 6	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	53		1,87	1,2	1,44	2,79	junto á parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	49,7	58	1,38	0,82	1,11	0,55	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	65	66	3,52	2,4	2,58	2,84	parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 74** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 7 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 7	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	52,8	54	1,9	1,27	1,4	2,95	parede lateral esquerda do cordão
Defeito 2	77,1	59	2,05	1,2	1,66	0,16	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	61,1	63	1,93	1,25	1,47	1,11	raiz do cordão
Defeito 4	56	67	3,23	2,22	2,35	2,83	parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 75** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 8 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 8	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	68,1	57	1,18	0,7	0,95	0,99	parede lateral direita do cordão

**Tabela 76** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 9 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 9	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	46,2	54	1,93	1,07	1,6	0,85	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	79,5	60	2,14	1,42	1,6	1,6	lado direito do cordão

**Tabela 77** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 10 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 10	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	68,9	60	2,07	1,35	1,57	1,56	lado direito do cordão

**Tabela 78** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 11 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 11	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	70,5	56	1,59	0,95	1,27	0,65	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	57,5	62	0,96	0,7	0,65	0,8	lado direito do cordão

**Tabela 79** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 12 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 12	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,8	57	1,25	0,77	0,98	0,95	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	73,2	61	1,91	1,22	1,47	1,06	lado direito do cordão

**Tabela 80** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 13 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 13	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	65,8	62	1,85	1,27	1,34	1,61	raiz do cordão
Defeito 2	74,8	62	3,18	1,82	2,61	0,16	parede lateral direita do cordão

**Tabela 81** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 14 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 14	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	74	65	2,18	1,55	1,53	1,09	raiz do cordão
Defeito 2	61,8	54	3,31	2	2,64	1,17	parede lateral direita do cordão
Defeito 3	49,7	53	1,2	0,7	0,98	0,15	raiz do cordão

**Tabela 82** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 15 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 15	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	72	54	3,45	2,22	2,64	1,22	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	59,9	64	1,7	1,05	1,34	1,63	raiz do cordão

**Tabela 83** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 16 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 16	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	59,1	64	1,72	1,22	1,21	1,87	junto da raiz do cordão

**Tabela 84** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 17 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 17	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	80,2	56	2,02	1,27	1,57	0,73	parede lateral direito do cordão
Defeito 2	47,8	63	1,01	0,6	0,82	1,29	raiz do cordão

**Tabela 85** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 18 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 18	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	71,2	55	1,69	0,95	1,4	0,64	parede lateral direita do cordão (lado de fora)
Descontinuidade 2	80,2	61	1,63	0,97	1,31	0,83	lado direito do cordão

**Tabela 86** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 19 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 19	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	77,9	57	1,42	0,85	1,14	0,56	parede lateral direita do cordão

**Tabela 87** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 20 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 20	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	68,1	55	2,08	1,32	1,6	0,91	parede lateral direito do cordão
Defeito 2	72	63	2,21	1,25	1,83	0,29	lado direito do cordão
Defeito 3	47,8	62	1,47	1	1,08	2,5	junto á parede lateral esquerda do cordão

**Tabela 88** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 21 da Placa 3 pelo processo FSW.

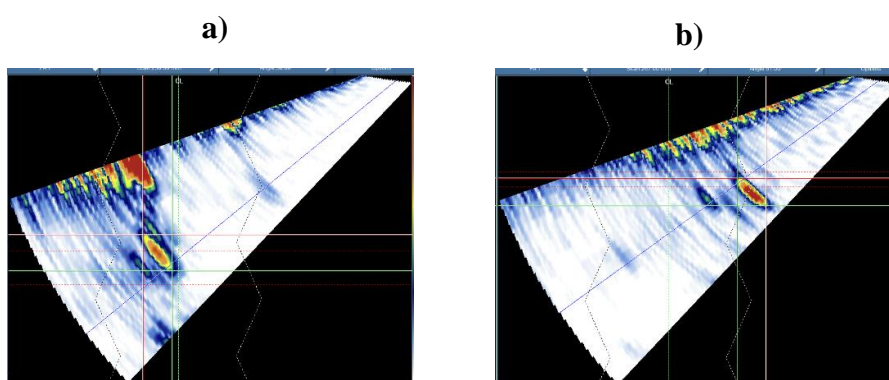
Região 21	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	61,8	61	2,46	1,45	1,99	0,28	parede lateral direita do cordão

Os defeitos detetados na região na região 21 mantiveram-se na região 22.

**Tabela 89** - Medição e caracterização dos defeitos existentes na região 23 da Placa 3 pelo processo FSW.

Região 23	Amplitude (%)	Ângulo (°)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Localização
Defeito 1	52	56	1,63	0,87	1,37	0,69	parede lateral direita do cordão
Defeito 2	72	60	1,7	1,05	1,34	0,77	junto à parede lateral direita do cordão
Defeito 3	53,6	62	1,42	1,02	0,98	2,61	perto da parede lateral esquerda do cordão

A Figura 114 mostra alguns defeitos encontrados em diferentes regiões do cordão da Placa 3 pelo processo *Friction Stir Welding*.



**Figura 114** - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo *Friction Stir Welding*. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 1 da região 21.

Os defeitos encontrados na junta soldada pelo processo *Friction Stir Welding* (Placa 1) localizam-se, maioritariamente, nas paredes laterais. O defeito maior situa-se na parede lateral direita do cordão, com 2,61 mm de comprimento, 1,47 mm de altura e 2,15 mm de largura. O defeito com maior profundidade encontra-se a 2,97 mm.

Quanto à Placa 2, os defeitos só se situam nas paredes do cordão, sendo que o defeito maior tem 3,83 mm de comprimento, 3,27 mm de altura e 1,99 de largura, sendo este detetado no lado esquerdo do cordão. O defeito com maior profundidade encontra-se a 2,99 mm.

Na Placa 3 os defeitos detetados, também se encontram na maioria nas paredes do cordão ou próximas destas, sendo que alguns se encontram na raiz do cordão. O defeito com maiores dimensões apresenta 3,45 mm de comprimento, 2,22 mm de altura e 2,64 mm de largura. O defeito com maior profundidade encontra-se no lado direito do cordão a 2,99 mm.

De salientar que os defeitos com menores profundidades foram encontrados nas placas com juntas soldadas pelos *Friction Stir Welding*, sendo que as profundidades menores se localizaram na Placa 2, a 0,02 mm da superfície. Pela caracterização dos sinais obtidos na análise destas placas pode-se concluir que, possivelmente, se tratam de porosidades ou a formação de vazios dispersos no cordão.

## **Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos futuros**

---

Com o trabalho desenvolvido foi possível compreender os princípios físicos e alguns conceitos relacionados com a técnica de ultrassons, bem como a aquisição de inúmeros conhecimentos acerca da máquina OmniScan MX2 e do seu manuseamento, as especificações e parâmetros necessários para as inspeções efetuadas, a calibração do equipamento até à interpretação e análise dos resultados.

O uso da tecnologia *Phased Array* demonstrou ser uma ferramenta com grande aplicabilidade, sensibilidade, inspeção e cobertura, o que torna o processo mais prático e mais rápido. No entanto, é preciso ser metuculoso durante a inspeção, no que diz respeito à passagem do transdutor, neste caso, ao longo da junta soldada, pois basta um pequeno desvio deste, para que os defeitos desaparecem da tela de visualização. É preciso também ter em conta a relação sinal/ruído, uma vez que o ruído interfere na deteção, podendo dar a indicação de sinais falsos.

O ruído aparecia de uma forma mais significativa nas inspeções pois as placas usadas tinham uma espessura pequena e o feixe sonoro também incidia, ligeiramente, na superfície do transdutor.

No que concerne à calibração do equipamento, trata-se de um processo moroso, pois o ajuste dos parâmetros requer muita sensibilidade por parte do operador. A calibração mais complexa de se efetuar foi a da sensibilidade, pois o objetivo é que todas as leis focais produzam um sinal de amplitude semelhante para o refletor conhecido (furo) e o ajuste através do transdutor no bloco é algo muito rigoroso.

A definição dos parâmetros inerentes à inspeção deve ser a mais adequada possível para o ensaio, material e tipo de amostra em estudo, para que a deteção dos defeitos seja a mais eficiente possível. Deve-se ter cuidado ao definir a faixa de ângulos, de modo a que o feixe não toque na superfície do transdutor, ou que passe o menos possível para evitar os

“ecos fantasma” que são indicações falsas de sinais e que causam mais ruído nas inspeções.

A técnica *Phased Array* foi considerada adequada para a aplicação pois foi possível realizar a detecção dos 9 furos da placa que serviu como corpo de prova, confirmando a possibilidade de qualificação da detecção dos defeitos nas placas com juntas soldadas.

Uma grande vantagem que esta tecnologia apresenta, é a possibilidade de gravar o sinal para posterior tratamento e análise. Neste caso, usou-se o *Software OmniPC* que foi uma ferramenta muito útil no dimensionamento e localização dos defeitos, efetuando-se uma análise simples e prática.

Pode-se verificar que o transdutor angular é o mais indicado para detecção de defeitos em juntas soldadas, uma vez que o cordão apresenta uma geometria saliente (reforço), impossibilitando o acoplamento do transdutor nessa zona, o que requer uma inspeção lateral da solda através de um feixe em um determinado ângulo. Por outro lado, a orientação das descontinuidades não é paralela à superfície da peça o que exige este tipo de transdutor.

Quanto à análise dos resultados obtidos pode-se concluir que nas placas com juntas soldadas por MIG os defeitos assinalaram corretamente a falta de fusão do material na raiz do cordão, assim como, na Placa 2 com junta soldada por TIG. Na Placa 1, com junta soldada por TIG, como o cordão estava um pouco saliente detetaram-se a maioria dos defeitos na parede lateral esquerda e quanto à Placa 3, os defeitos encontraram-se na raiz do cordão e junto desta, possivelmente por falta de fusão do material em algumas regiões no centro da soldadura.

Nas placas com juntas soldadas pelo processo *Friction Stir Welding* encontraram-se a maioria dos defeitos nas paredes laterais da solda, sendo que nestas placas se detetaram os defeitos com as menores profundidades, entre 0,02 a 0,95 mm, onde as restantes são superiores a estes valores. Pela aparência dos sinais obtidos, pode-se aferir que, possivelmente, se tratam de porosidades ou vazios espalhados no interior e perto da superfície da solda.

Para continuar este estudo seria interessante usar outros tipos de transdutores com diferentes frequências para diferentes tipos de materiais como, por exemplo, os compósitos. Depois poder-se-ia cortar e analisar a amostra ao microscópio, para averiguar se a detecção dos defeitos estava coerente com a sua real localização.

Poder-se-ia, também, criar defeitos, propositadamente, em placas com diferentes espessuras para verificar a influência que tem na deteção de defeitos e na relação sinal/ruído.

Por outro lado, seria interessante correlacionar os diferentes parâmetros de soldadura com a deteção de defeitos, averiguando de que forma estes parâmetros influenciam no aparecimento de defeitos/descontinuidades.

Outra sugestão seria utilizar a técnica de ultrassom *Phased Array* na avaliação da extensão de corrosão ou desgaste de um determinado componente.

## **Bibliografia**

- [1] Fernandes, P. M. P., “Sistema de controlo de soldadura baseado em visão por computadores,” Braga, 2015.
- [2] Modenesi, P. J., Marques, P. V. e Santos, D. B., “Introdução à Metalurgia da Soldagem,” Belo Horizonte, 2012.
- [3] Benedette, C. E. P. e Neto, M. R. M. “Controle de qualidade em juntas soldadas: Um estudo de caso em fabricante de equipamentos criogênicos,” em *VIII SAEPRO - Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção*, Viçosa, 2013.
- [4] Schwedersky, V. M. B., Dutra, J. C., Okuyama, M. P. e Silva, R. H. G. e. “Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 16, n.º 4, pp. 333-340, 2011.
- [5] S. G. Filho, “Controle da Qualidade em Indústrias Mecânicas Pesadas,” São Paulo, 2009.
- [6] Duarte, G. D., “O Controle da Qualidade em Processos de Produção Mecânica Não-Seriada,” São Paulo, 2010.
- [7] Silva, G. D. F. d., “Desenvolvimento e Produção de Componentes Soldados Padrão Defeituosos para Ensaio Não Destrutivos,” Lisboa, 2013.
- [8] Lemos, L. d. C., “Ensaio não destrutivo: dispersão de fluxo magnético,” *Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, vol. 1, pp. 213-217, 2010.
- [9] Silva, P., Miranda, R.M. e Quintino, L., “Proposta de uma metodologia para avaliação de defeitos de soldadura na manutenção de equipamentos sobre pressão,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 16, n.º 2, pp. 177-188, 2011.
- [10] Santos J. F. O., *Ensaio Não Destrutivos - Guia do Formando*, Lisboa: Copyright, 1999.
- [11] Pereira, J. A. V., “Estudo e Aplicação de Ensaio Não Destrutivos - Líquidos penetrantes, Ultrassom, Radiografia digital, Técnica tangencial medição de espessuras,” Porto, 2013.
- [12] Lopes, D., Albuquerque, C. M., Oliveira C. T. e Souza, I. S., *Visão Geral Sobre A Inspeção Em Cordões De Solda Através De Técnicas Não Destrutivas Ultrassônicas*.

- [13] Santos, D. D., “Avaliação da Técnica de Ultrassom Phased Array na Inspeção de Soldas Circunferenciais de Inconel® 625 em Tubulações de Aço API 5L X70 Revestidas,” Rio de Janeiro, 2017.
- [14] Trombini, M., “Avaliação da técnica de ultrassom 'phased array' para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados,” Campinas, 2015.
- [15] Gomes, J. H. D. F., “Análise e Otimização da Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço ABNT 1020 com Utilização de Arame Tubular Inoxidável Austenítico,” Itajubá, 2010.
- [16] Schio, F., “Análise Comparativa entre Soldagem Mig/Mag Manual e Robotizada,” Panambi, 2013.
- [17] Escola Estadual de Educação Profissional - [EEEP], *Mecânica - Processos de Soldagem*, Ceará.
- [18] Ferraresi, V. A., *Fundição e Soldagem*, Uberlândia, 2016.
- [19] Fardin, H. D., Junior, E M. R., “Acompanhamento da Utilização e do Controle de Qualidade das Soldas da Construção e Montagem de Pontes Metálicas,” Vitória, 2009.
- [20] Villani, P., Modenesi, P. J. e Bracarense, A. Q., *Soldagem : Fundamentos e Tecnologia*, Minas Gerais: Elsevier Brasil, 2016.
- [21] “Análise Estatística da Dureza na Interface Substrato/Metal De Solda De Revestimentos Contra Corrosão,” em *III CONAPESC*, Campina Grande, 2018.
- [22] Vale, O. J. D. D., “Redução de Problemas de Qualidade, Custos e Paradas de Linha De Produção Relacionada à Solda Por Resistência,” Curitiba, 2013.
- [23] Siqueira, T. A., “Controle de Uma Célula de Soldagem Através de Um Pda,” Brasília, 2005.
- [24] Moura, M. L. D., “Análise dos Efeitos dos Semiângulos de Fieira de Trefilação Utilizados na Fabricação de Arames Sólidos na Estabilidade do Processo de Soldagem GMAW,” Belo Horizonte, 2014.
- [25] “Perfilmóvel - Alumínios,” [Online].  
Available:<http://www.perfilmovel.com/conteudo/servicos/aluminios/alum-portoes/Portoes-aluminio>. [Acedido em 23 Junho 2018].

- [26] Trommer, G., “Welding Productivity,” [Online]. Available: <http://weldingproductivity.com/article/steel-performance/>. [Acedido em 21 Abril 2018].
- [27] Acuña, V., “SlideShare - Importancia de la soldadura,” 2009. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/VinicioAcuna/inportancia-de-la-soldadura/3>. [Acedido em 5 Março 2018].
- Available: <https://pt.slideshare.net/VinicioAcuna/inportancia-de-la-soldadura>. [Acedido em 11 Junho 2018].
- [28] Capra, A. R. *et al.*, “Desenvolvimento de procedimentos de reparo de trincas e recuperação de cavitação em turbinas hidráulicas fundidas em Aço Inoxidável Martensítico Macio CA6NM,” 2015.
- [29] Martins, R. J. D., “Estudo de Revestimentos por Soldadura em Equipamentos de Processo,” Coimbra, 2011.
- [30] Lavoura, S. S. M. S., “Avaliação de Riscos em Postos de soldadura,” Coimbra, 2013.
- [31] Reis, M. I. V. d., “Caracterização da resistência dinâmica na soldadura por resistência por pontos de varões de aço A500EL,” Lisboa, 2015.
- [32] Silva, F., “Soldadura Robotizada com Tecnologia CMT,” Setúbal, 2015.
- [33] Anschau, L. D., “Análise de Fumos de Soldagem, Sistemas de proteção e Desenvolvimento de Protótipo para Estudo da Emissão de Fumos de Soldagem para Processo MIG/MAG,” Rio Grande do Sul, 2014.
- [34] Almeida, F. J. S., “Estudo e otimização de juntas do tipo Tpeel soldadas, adesivas e híbridas,” Porto, 2015.
- [35] Paredes, R. S. C., “EME733 INTRODUÇÃO À SOLDAGEM,” Paraná.
- [36] Júnior, L. P. N., “Otimização de Um Processo de Solda Mig/Mag para Aplicação na Indústria Automobilística através da Utilização da Técnica do Projeto e Análise de Experimentos,” Itajubá, 2003.
- [37] Sgarbi, P. V., “Construção e Validação de um Calorímetro com Vazão Contínua de Água para Avaliação do Rendimento Térmico em Processos de Soldagem,” Porto Alegre, 2003.
- [38] “METALIZA,” [Online]. Available: <http://metaliza.com.br/wp-content/uploads/2015/02/solda-mig-mag.jpg>. [Acedido em 13 Maio 2018].

- [39] “Wikipédia,” [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura\\_TIG](https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura_TIG). [Acedido em 13 Maio 2018].
- [40] Santos, T. F. d. A., Torres, E. A., e Ramirez, A. J., “Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível de Aços Inoxidáveis Duplex,” *Soldagem & Inspeção*, pp. 59-69, 2016.
- [41] Lapão, P. J. T., “Soldadura por fricção linear de ligas de alumínio: Influência das propriedades do material,” Coimbra, 2008.
- [42] Farias, A. d., “Avaliação do Processamento por Atrito Linear em Chapas da Liga de Titânio Ti-6Al-4V,” São Paulo, 2015.
- [43] “Friction Stir Link,” [Online]. Available: <http://frictionstirlink.org/resource.php>. [Acedido em 13 Maio 2018].
- [44] Machado, P. J. B., “Avaliação da Resistência Estrutural de Juntas Soldadas de Um Quadro de Uma Bicicleta,” Setúbal, 2010.
- [45] Meira, H. S., “Especificidades Da Fiscalização De Obras Em Construção Metálica,” Viana do Castelo, 2018.
- [46] Jr., L. G. e Ramalho, J. P., “Processo de Soldagem por Arco Submerso,” *Infosolda*, 2013.
- [47] Soldadura Mecanizada, Orbital e Soldadura Robotizada - Soldadura Robotizada, Future Weld.
- [48] Silva, E. M. d., Kitsuda, E. F., Santos, R. S. d. e Costa, A. F. d., “Trincas: Causas e métodos de prevenção em aços estruturais soldados.,” São Paulo, 2012.
- [49] Rosa, V. d., “Engenharia da Produção,” Horizontina, 2015.
- [50] Modenesi, P. J., “Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas,” Belo Horizonte, 2012.
- [51] Gomes, D. P., “Estudo de um Procedimento de Soldagem para liga de Alumínio,” Rio de Janeiro, 2017.
- [52] Guarani, F., “Análise de Revestimento Duro de Solda no Aço SAE 1045 com e sem Amanteigamento,” Panambi, 2014.
- [53] “TWI,” [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weld-defects-imperfections-in-welds-lack-of-sidewall-and-inter-run-fusion-041/>. [Acedido em 2 Junho 2018].

- [54] Morganti, M. P. d. S., “Estudo da influência do espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de junta sobreposta para arame de 1,2 mm,” São Caetano do Sul, 2013.
- [55] Duarte, J. F. S., “Análise comparativa de soldaduras obtidas em estado sólido e por fusão,” Coimbra, 2015.
- [56] “Inspector World,” 2016. [Online]. Available: <http://learnweldinginspector.blogspot.com/2016/06/welding-imperfections-according-to-bs.html>. [Acedido em 2 Junho 2018].
- [57] Jacob, F., “O Calculista de Aço - Estruturas Metálicas sem Mistério,” 2017. [Online]. Available:<http://calculistadeaco.com.br/6-defeitos-comuns-em-soldas-de-eletrodo-revestido-e-como-evita-las/>. [Acedido em 2 Junho 2018].
- [58] Baughurst, L., “Welding Defects, Causes & Correction,” *ASPEC Engineering*, 2011.
- [59] Araujo, M. R. d. e Naveiro, R. M. “Desenvolvimento de Novos Materiais e Novos Produtos na Indústria Automobilística,” em *ENEGEP*, Rio de Janeiro, 1999.
- [60] Kulekci, M. K., . Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 851-865, 2008.
- [61] Cole, G. S., & Sherman, A. M., . Lightweight materials for automotive applications. *Materials characterization*, 35(1), 3-9, 1995.
- [62] Sabini, N. B., “Influência de Cargas de Talco nas Propriedades Microestruturais e Mecânicas na Matriz de Carbetto de Silício em Compósitos de Matriz Cerâmica,” Ponta Grossa, 2007.
- [63] Monteiro, R. L., “Análise do Efeito de Tratamento Térmico T4 em Ligas de Al-Cu produzidas pelo Processo de “Direct Squeeze Casting”,” Marabá, 2011.
- [64] Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., & Elangovan, K., Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(3), 286-296, 2009.
- [65] Rangel, J. P. V., “Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas T soldadas por MIG na liga AA6082,” Coimbra, 2012.
- [66] Figueiredo, K. M. d., “Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio,” Uberlândia, 2000.

- [67] Júnior, M. A. B. P., “Soldagem de alumínio naval através do processo MIG com pulsação térmica,” Belém-Pará, 2016.
- [68] Fagundes, R. F., “Avaliação das técnicas de soldagem MIG-P CA e MIG-P CC+ aplicadas ao passe de enchimento em liga de alumínio AA5083,” Rio Grande do Norte, 2014.
- [69] Rodrigues, G. L., “Efeitos dos Tratamentos Térmicos em Ligas de Alumínio,” Rio Verde – Goiás, 2015.
- [70] Martins, A. L. T., “Estudo comparativo de propriedades mecânicas e textura de lamindos da liga de alumínio 3104-H19,” São Paulo, 2014.
- [71] Maia, A. M. P., “Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101,” Porto, 2012.
- [72] Gonçalves, R. A., “Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6xxx,” Uberlândia - MG, 2012.
- [73] Vicentini, R., “Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas em alumínio,” Campos Dos Goytacazes, 2013.
- [74] Duarte, R. M. M., “Desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores em ligas de alumínio,” Porto, 2014.
- [75] Mota, B., “Ensaio mecânicos e a sua importância,” 2016.
- [76] Zolin, I., “Ensaio Mecânicos e Análise de Falhas,” Santa Maria, 2011.
- [77] Rosa, F., “SlideShare - Propriedades mecânicas dos materiais,” 2014. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/felipecrossa9/aula-6-propriedades-mecnicas>. [Acedido em 4 Junho 2018].
- [78] Pinto, D. F. F., “Caracterização Experimental do Comportamento da Liga AlSi9Cu3 em Condições de Maquinagem,” Porto, 2017.
- [79] Canale, L., “SlidePlayer - Ensaio dos Materiais,” 2016. [Online]. Available: <https://slideplayer.com.br/slide/10423299/>. [Acedido em 5 Junho 2018].
- [80] Pereira, J. A. V., “Estudo e Aplicação de Ensaio Não Destrutivos- Líquidos penetrantes, Ultra sons, Radiografia digital -Técnica tangencial medição de espessuras,” Porto, 2013.

- [81] Faria, J. P. G., “Aplicação de Ensaios Não Destrutivos por Correntes Induzidas à Caracterização de Propriedades Eléctricas de Materiais Processados no Estado Sólido,” Lisboa, 2010.
- [82] Trombini, M., “Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados,” Campinas, 2015.
- [83] Andreucci, R., “Ensaio por ultrassom,” 2014.
- [84] Rezende E. J. d. O., Cruz, J. G. S. e Melo, J. C. d., “Ensaio não Destrutivo por Ultrassom,” em *XV INIC / XI EPG - UNIVAP 2011* , Paraíba, 2011.
- [85] Tonial, I. R., “Susceptibilidade de diferentes ensaios não destrutivos para indicação de trincas de fadiga,” Rio de Janeiro, 2017.
- [86] Cunha, P. , “SlideShare - Ensaios não destrutivos: Ultrassom,” 2012. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/alexleal3720/aula-9-ensaio-de-ultrasom>. [Acedido em 7 Junh0 2018].
- [87] Cerqueira, A. d. S., “Avaliação da técnica de ultrassom Phased Arra na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento,” Porto Alegre, 2009.
- [88] Leão, R. J., “Simulação da Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais em Materiais Estruturais Aeroespaciais,” Campinas, 2012.
- [89] Bras, R., “Ondas Ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não-destrutivos,” *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, vol. 4, n.º 1, pp. 16-33, 2017.
- [90] Baroni, D. B., “Desenvolvimento de técnica ultra-sônica para medida de porosidade em pastilhas de UO<sub>2</sub>,” Rio de Janeiro , 2008.
- [91] Alcácer, V., “Desenvolvimento de um sistema automatizado de ultrassons utilizando técnicas de Phased Array para inspeção de soldaduras topo a topo em módulos de caldeira HRSG,” Sétubal, 2016.
- [92] Stein, R. M., “Estudo da Técnica de Ensaio Não-Destrutivo Ultrassom Phased Array,” Vitória, 2017.
- [93] Ferreira, R. F., “Avaliação da técnica de inspeção por ultrassom Phased Array em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304L,” Rio de Janeiro, 2013.

- [94] Freitas, M. I. P. d., “Desenvolvimento de um sistema de ultrassons por Phased Array para inspeção de juntas soldadas de baixa espessura em material austenítico,” Lisboa, 2016.
- [95] Silva, B. P. d., “Avaliação de falhas em revestimentos anticorrosivos pelo método de ensaio não-destrutivo por ultrassom,” Rio de Janeiro, 2011.
- [96] Santos, D. D., “Avaliação da Técnica de Ultrassom Phased Array na Inspeção de Soldas Circunferenciais de Inconel® 625 Em Tubulações De Aço API 5L X70 Revestidas,” Rio de Janeiro, 2017.
- [97] Ramos, M. B., “Desenvolvimento de um sistema para análise de integridade estrutural de equipamentos estáticos baseado em CAD VPS Micro cracks e ultrassom,” Natal, 2009.
- [98] Almeida, P. D. d., “Inspeção por ultrassom de juntas adesivas de tubulações em material compósito,” Rio de Janeiro, 2011
- [99] Silva, B. C. d. A., “Estudo das Incertezas na Medição de Espessura por Ultrassom em Peças Aeronáuticas,” Rio de Janeiro, 2012.
- [100] Luz, A. *et al.*, *Concepção Desenvolvimento e Produção de Sondas de Ultra-Sons*, pp. 1-8.
- [101] Costa, A. C. d., “Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico,” Minas Gerais, 2011.
- [102] NDT, O., “NDT Instruments,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/contact-transducers/>. [Acedido em 7 Maio 2018].
- [103] NDT, O., “An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>. [Acedido em 7 Maio 2018].
- [104] NDT, O., “Ultrasonic Couplants,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/applications/ultrasonic-couplant/>. [Acedido em 7 Maio 2018].
- [105] Nelligan, T. D. Kass, “OLYMPUS NDT - Intro to Ultrasonic Phased Array,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonics/intro-to-pa/>. [Acedido em 7 Maio 2018].

- [106] O. NDT, “Phased Array Tutorial,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/phased-array/>. [Acedido em 7 Maio 2018].
- [107] O. NDT, *Phased Array Probes and Wedges*.
- [108] J. P. B. d. Amorim, “Sistema de Inspeção de ultra-sons por Phased Array para Materiais Compósitos Aplicados à Indústria Aeronáutica,” Lisboa, 2014.
- [109] O. NDT, “SlideShare - Introduction to Phased Array Using the OmniScan MX2 Part 4,” 2013. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/OlympusIMS/introduction-to-phased-array-using-the-omniscan-mx2-part-four-31093389>. [Acedido em 2 Setembro 2018].
- [110] O. NDT, “Phased Arrau Ultrasound as a Replacement for Radiography,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/phased-array-ultrasound-as-a-replacement-for-radiography/>. [Acedido em 7 Maio 2018].

# ANEXOS

## • Anexo 1

Na secção do anexo 1 é apresentado um tutorial da máquina OmniScan MX2 com os procedimentos utilizados, bem como a explicação de algumas funções e ferramentas que este possui.

### Tutorial da máquina OmniScan MX2 versão 4.4

#### Visão geral da máquina

O *software* da máquina possui recursos adequados de inspeção por ultrassom para inúmeras aplicações de ensaios não destrutivos e utiliza os modos de operação de ultrassom convencional (UT) e de *Phased Array*.

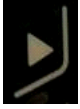










O painel frontal do OmniScan MX2 contém todos os principais controlos e indicadores para uma operação simples e prática do *software*. Este painel é dividido em diferentes áreas, com distintas funções. A Figura 1 mostra os controlos do painel frontal da máquina.



Figura 115 - Teclas do painel frontal do OmniScan MX2.

A Tabela 90 apresenta a função correspondente a cada tecla.

**Tabela 90** - – Funções das teclas de controlo do OmniScan MX2.

	Usado para reiniciar a inspeção de aquisição de dados
	Usado para alternar entre os modos de inspeção e análise
	Usado para ativar ou desativar a exibição do grupo multigrupo.
	Usado para definir os parâmetros dos cursores exibidos.
	Usado para aumentar/diminuir o <i>zoom</i> . Pressionar duas vezes para restaurar o <i>zoom</i> .
	Usado para reajustar o envelope do sinal e os alarmes (quando ligados).
	Usado para salvar um relatório, dados ou imagem, dependendo da configuração do menu.
	No modo de inspeção quando um grupo PA é selecionado, é usado para selecionar a lei focal atual. No modo de análise é usado para selecionar o ângulo que deteta o defeito.
	Usado para ajustar o ganho do sinal.
	Usado para definir a posição inicial da tela A-scan.
	Usado para definir a variação da tela de A-scan.

## Baterias

O OmniScan MX2 possui duas baterias, que podem ser usadas em simultâneo, ou uma de cada vez. As baterias são feitas de íões de lítio o que levam a um carregamento mais rápido, duram mais tempo, têm maior densidade energética, maior autonomia e ocupam menos espaço. O tempo de autonomia da máquina com as duas baterias é no mínimo de 6 horas.

- **Indicadores da carga de bateria**

Existem dois indicadores de carga de bateria. Os indicadores mostram a quantidade de carga restante na bateria, através de um barro dentro do indicador e o tempo estimado para o restante da operação, indicado no formato hh:mm. A Figura 116 mostra o exemplo desses dois indicadores.



**Figura 116** - Exemplo do *status* da carga de bateria do OmniScan.

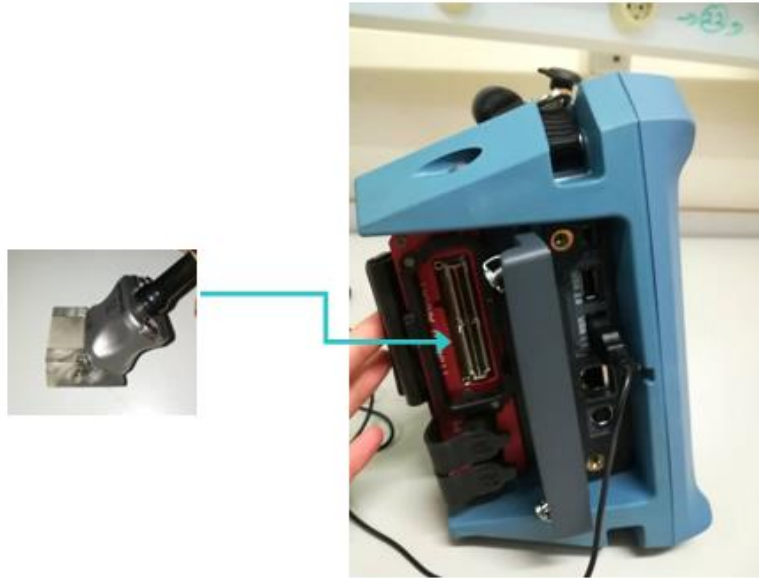
A Tabela 91 mostra as variações dos indicadores de carga da bateria.

**Tabela 91** - Variações dos indicadores de carga da bateria.

Indicador	Contorno	Preenchimento	Significado
	Pontilhado	N/A	Não existe nenhuma bateria no compartimento.
	Azul	Azul	A bateria está a funcionar corretamente.
	Azul	Laranja	A bateria está muito quente para ser usada.
	Amarelo intermitente	Azul	A bateria está a carregar.
	Laranja	Azul	A bateria está muito quente para ser carregada ou a temperatura interna está muito alta para o carregamento (acima de 45°)
	Vermelho intermitente	Azul claro	A carga da bateria está muito baixa (menor que 10%). É emitido um sinal sonoro caso não haja outra bateria disponível.
	N/A	Amarelo	O aparelho está a ser alimentado externamente através do adaptador de energia de corrente contínua.

## Sondas UT ou PA

O *software* OmniScan MX2 utiliza dois modos de operação: *Phased Array* (PA) e ultrassom convencional (UT). Dependendo da configuração do aparelho, pode-se usar sondas UT ou PA. A Figura 117 mostra a conexão da sonda PA no OmniScan MX2.



**Figura 117** - Conexão da sonda PA no OmniScan MX2.

## Teclado do *Software*

O teclado virtual serve para inserir os valores numéricos de um determinado parâmetro.

Para inserir um valor no teclado é preciso:

1. Tocar duas vezes no parâmetro a ser modificado, para aceder ao teclado virtual.
2. Tocar no botão # para exibir o teclado numérico.
3. Inserir o valor e pressionar a tecla Aceitar OU girar o botão rotativo para aumentar ou diminuir o valor OU As teclas para cima e para baixo.
4. Para apagar um carater tocar no botão Excluir do teclado.

A Figura 118 exhibe o teclado virtual do *software*.

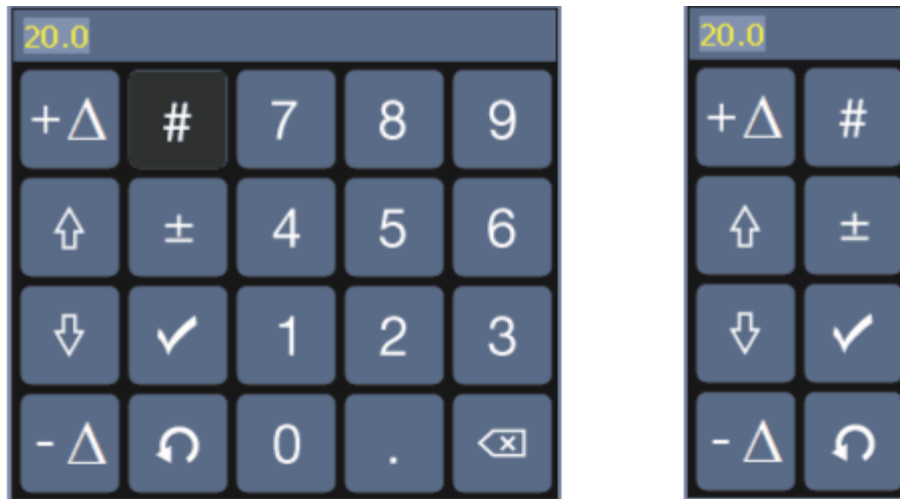


Figura 118 – Teclado virtual com teclado numérico, à esquerda, e sem à direita.

## Zoom

Para usar o *zoom* deve-se selecionar uma área que não contenha quaisquer elementos (portas ou cursores).

1. Para alterar o *zoom* de uma área, mover os dedos diagonalmente, clicar e arrastar formando um retângulo ao redor da seção que se deseja ampliar e soltar a tela.
2. Para alterar o *zoom* no eixo vertical, mover os dedos verticalmente.
3. Para alterar o *zoom* no eixo horizontal, mover os dedos horizontalmente.
4. Para retornar à visualização de dados sem *zoom*, tocar duas vezes na régua/escala do eixo x e y ou pressionar a tecla *Zoom*.

## Réguas/Escalas

As réguas/escalas aparecem lateralmente na horizontal e vertical da visualização e estão associadas ao eixo que representam. A Figura 119 apresenta um exemplo de visualização que caracteriza várias escalas.

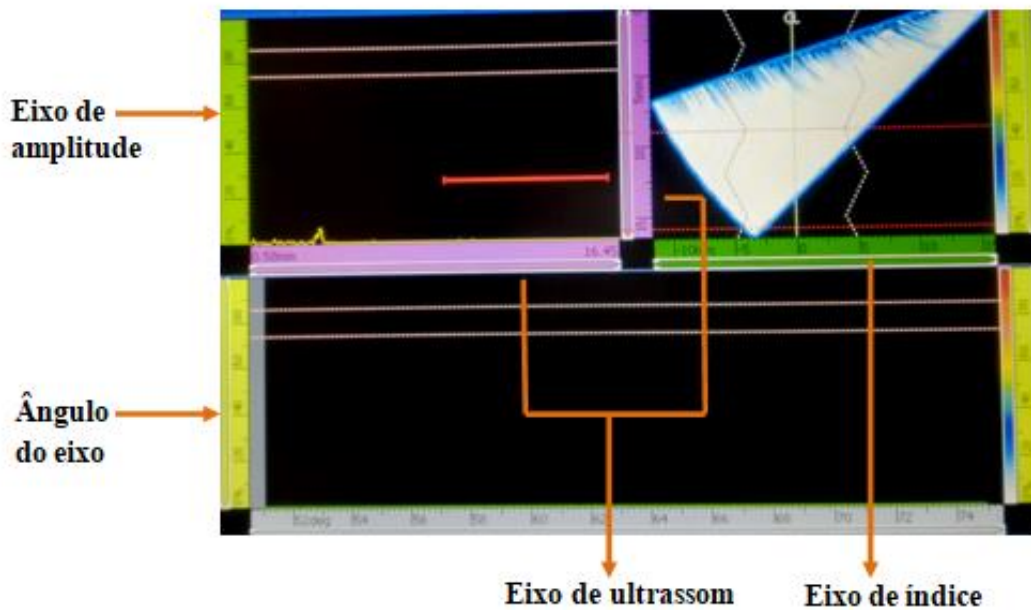


Figura 119 - Exemplo de várias visualizações com várias réguas/escalas.

## Cores de contorno

As cores são utilizadas para descrever as funções e os campos de leitura para facilitar o rastreamento dos elementos com os parâmetros aplicáveis ou para indicar a origem da informação.

- *Cores referentes aos campos de leitura*

Os campos de leitura podem ser descritos numa das várias cores existentes. A cor indica o elemento da interface correspondente ao valor exibido no campo, tal como se pode ver na Figura 120. Três leituras são delineadas em vermelho e uma em roxo.

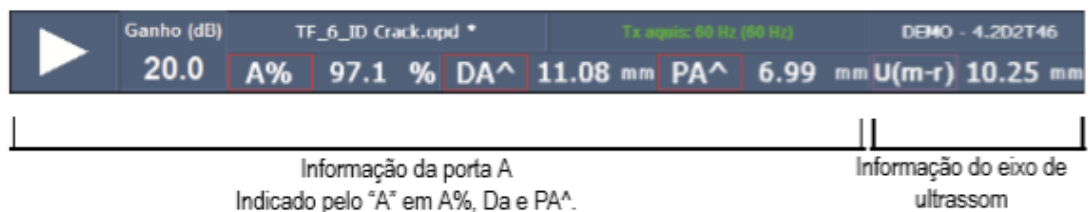


Figura 120 - Identificação dos campos de leitura com diferentes cores.

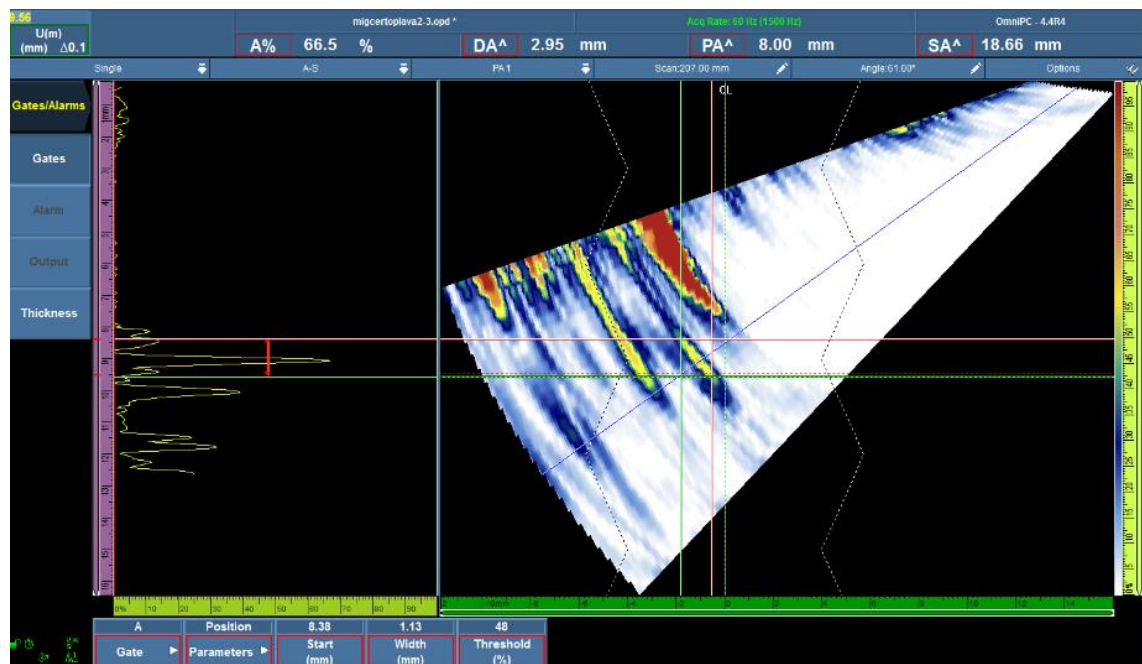
- **Portas**

O parâmetro “Gate” é usado para especificar qual porta se deseja configurar. Existem três portas codificadas por cores.

- Vermelho: O parâmetro é aplicado á porta A.
- Verde: O parâmetro é aplicado à porta B.
- Amarelo: O parâmetro é aplicado à porta I.

A Gate A e B são usadas para propósitos gerais e a Gate I é usada para sincronizar a posição por exemplo de um pico de sinal correspondente a um defeito, como aconteceu neste trabalho.

Na Figura 121 é possível visualizar a indicação da cor vermelha em contorno dos parâmetros relacionados com a porta A.



**Figura 121** – Contorno vermelho referente aos parâmetros aplicados à porta A.

### Cores do cursor

Os cursores são linhas de referência que podem ser movidas em relação aos eixos.

- Vermelho: Informação do cursor de referência;
- Verde: informação do cursor de medição;
- Azul: informação do cursor de dados.

A Figura 122 mostra os diferentes tipos de cursores usados.

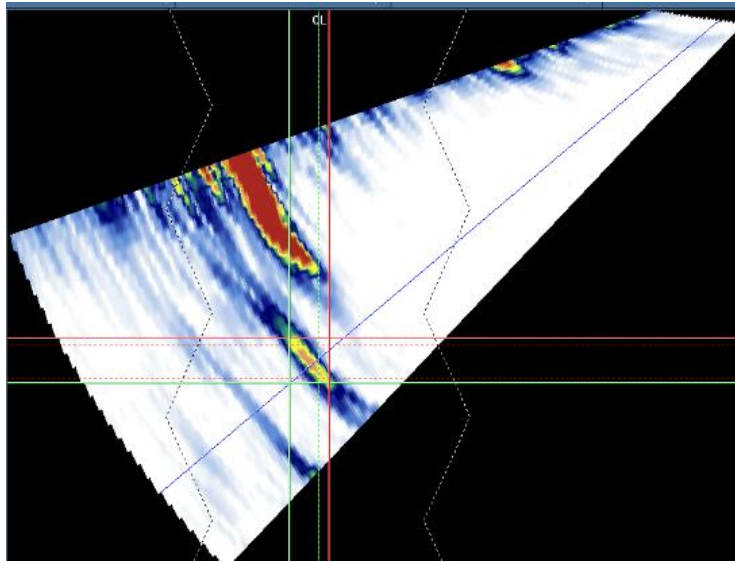


Figura 122 - Indicação das cores do cursor.

- ***Cores referentes às unidades de ultrassom***

As seguintes informações são aplicáveis ao eixo de ultrassom:

- Rosa claro: Tempo ( $\mu\text{s}$ );
- Rosa: Trajetória do som (mm)
- Roxo: Profundidade real (mm)

A Figura 123 exibe a cor roxa em volta dos parâmetros, que estes dizem respeito ao eixo do ultrassom.

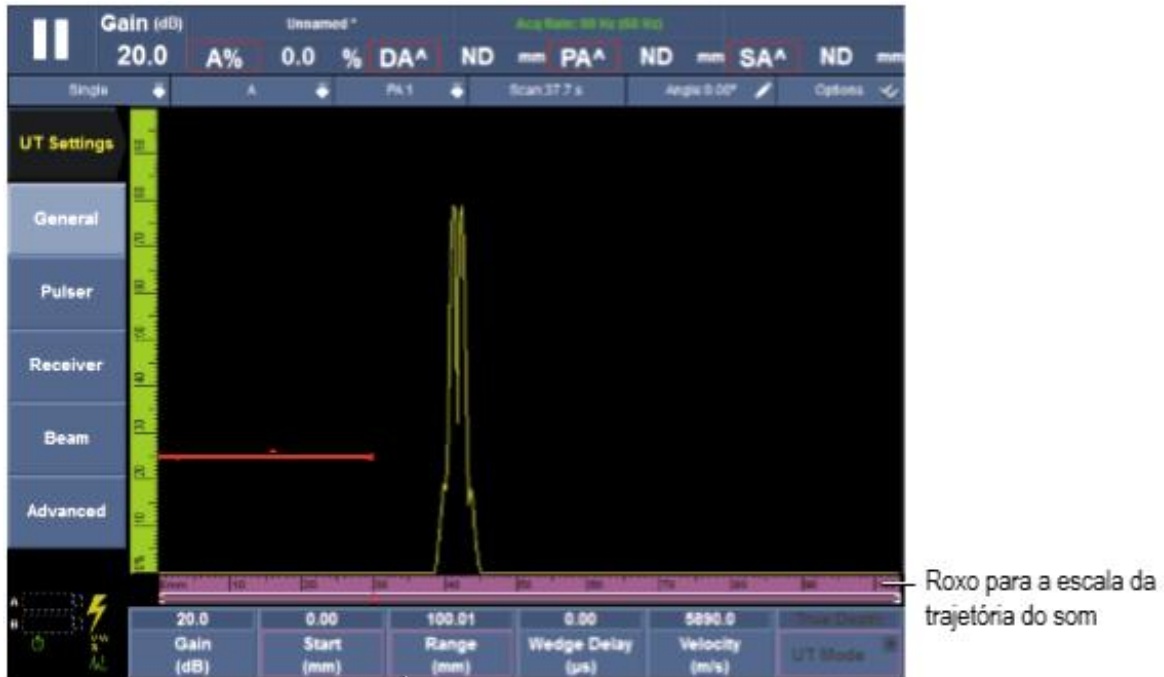


Figura 123 - Cor roxa para o eixo de ultrassom e modo botão.

## Procedimento de configuração para a aplicação em causa

O OmniScan MX2 possui um conjunto de menus que permitem configurar vários parâmetros de um modo rápido e simples que são necessários para efetuar uma inspeção.

Na hierarquia do menu, quando se seleciona um botão a focalização está nesse menu particular. Os botões do submenu aparecem na vertical á esquerda da tela e os botões de parâmetro aparecem na parte inferior da tela, como se vê na Figura 124.

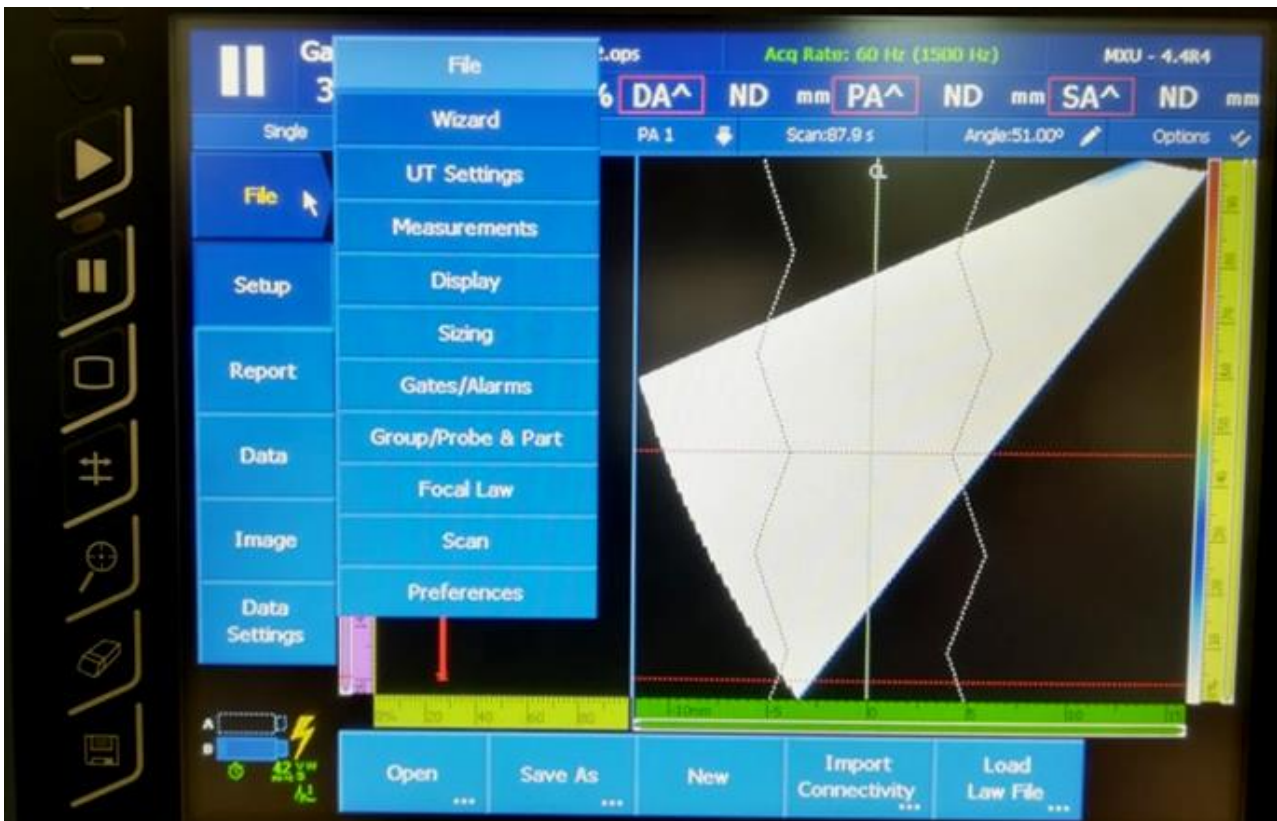


Figura 124 – Hierarquia do menu e sintaxe de identificação.

### Menus utilizados para definir a configuração

Para uma melhor compreensão das funções de cada menu segue abaixo uma descrição para cada um deles.

- **File:** Permite aceder ou guardar um determinado ficheiro. Para abrir basta seleccionar *Open* e para guardar selecciona-se *Save As*. Depois de seleccionar *Save As* selecciona-se o menu *Data Settings* e aparece um separador denominado *File name*, usado para criar o nome do arquivo. É também possível especificar o tipo de dados que serão salvos no dispositivo. Pode-se guardar em formato de relatório, *Report*, de dados, *Data*, ou imagem, *Image*.
- **Wizard:** Este menu é usado para criar uma configuração de aplicação completa, isto é, inserir os valores dos parâmetros e as especificações para uma determinada inspeção.

- **UT Settings:** Este menu possui os parâmetros modificados regularmente durante a inspeção, como o ganho e os parâmetros do pulsador/recetor.
- **Measurements:** Possui os parâmetros relacionados a várias ferramentas de medição.
- **Display:** Este menu exhibe os parâmetros relativos às visualizações de dados e às suas informações na tela do aparelho.
- **Sizing:** Contém as especificações para selecionar e configurar uma função de dimensionamento. Esta função fornece um método para exibir o tamanho real de um refletor independentemente da localização da peça.
- **Gates/alarms:** Envolve os parâmetros para configurar portas, alarmes e sinais de saída. As portas são representadas por linhas de cor vermelha, verde ou amarela nas visualizações A-Scan e C-scan. O alarme é a reação do aparelho á ocorrência de uma condição específica relacionada a uma porta ou a leitura de espessura. As saídas de *hardware* correspondem a um indicador do painel frontal, a um sinal de alarme e a um conector I/O do OmniScan.
- **Group/Prob& Part:** Contém os recursos para a definição da peça inspecionada, e é usado para definir um ou mais grupos e para ajustar com precisão os parâmetros relacionados com a configuração dos pulsadores, recetores, sondas e calços.
- **Focal law:** Usado para ajustar os parâmetros relacionados às leis focais relacionadas á programação da sonda, tais como o tipo de rastreamento.
- **Scan:** Menu usado para configuração a sequência da inspeção de rastreamento (codificadores, tipo de inspeção, armazenamento de dados e a área de inspeção na peça).

## Criação da configuração da aplicação

Para realizar uma configuração completa inerentes à aplicação em causa, devem-se usar os assistentes disponíveis nos botões do submenu, pela seguinte ordem:

- “*Parte & Weld*”;

- “Setup”;
- “Calibration”.

Na Figura 125 são apresentados os submenus para a configuração da aplicação em causa.

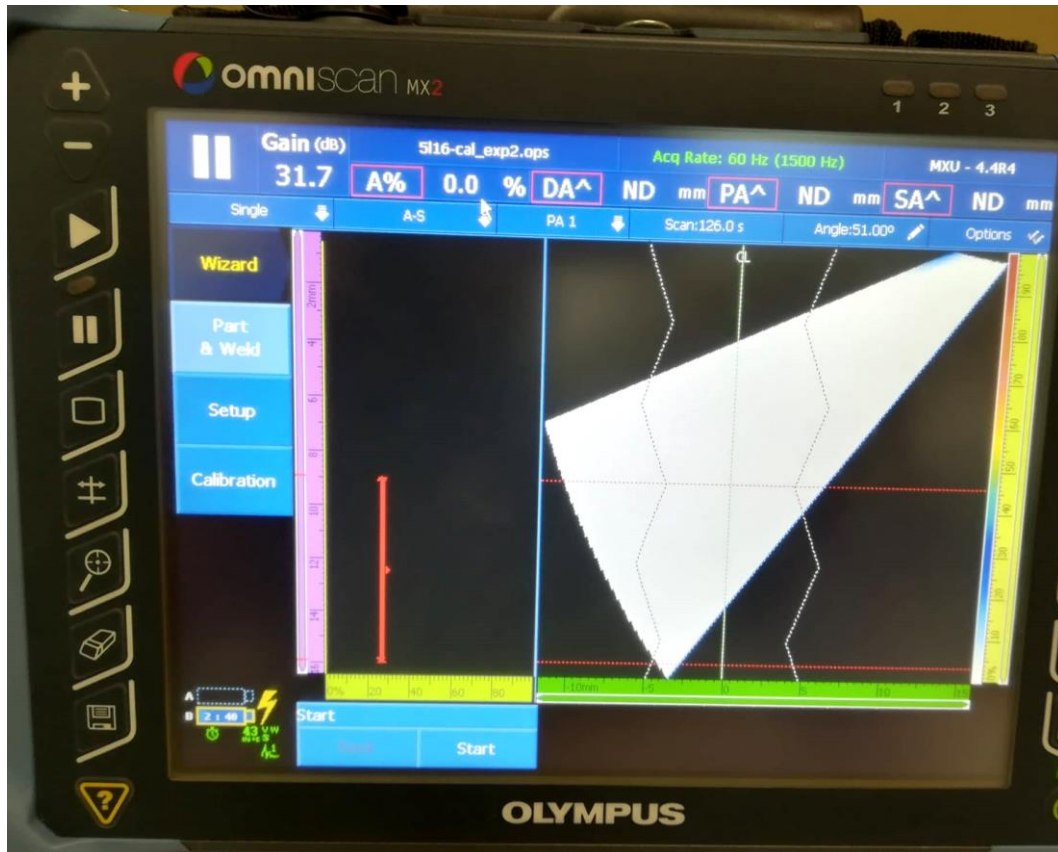


Figura 125 - Aspeto dos submenus para configuração da aplicação.

No submenu “Parte & Weld” tal como o próprio nome indica, são estipulados os parâmetros relacionados com o tipo de amostra em estudo e com a solda.

A Figura 126 mostra as especificações possíveis dos parâmetros pertencentes á dimensão, material e geometria da amostra.

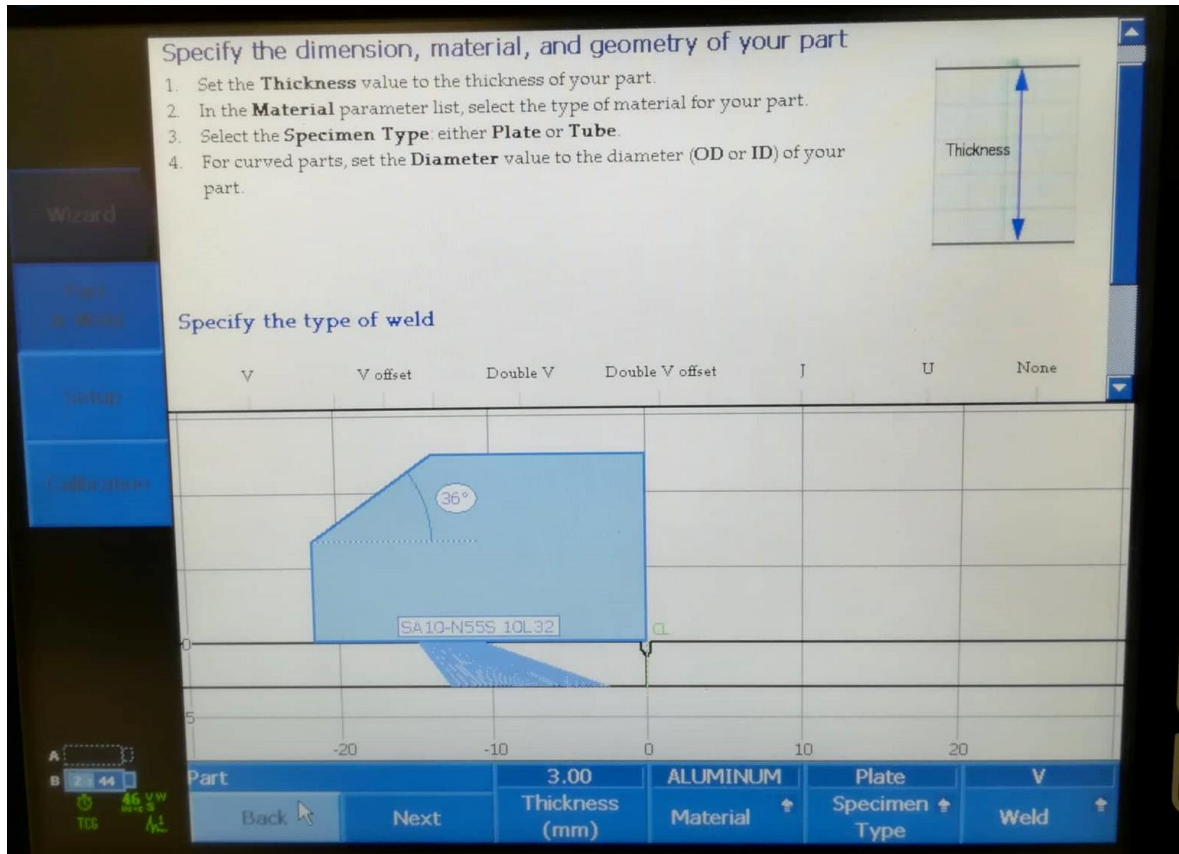


Figura 126 – Especificação da dimensão, material e geometria da amostra.

### *Especificação da dimensão, material e geometria da amostra*

- Primeiro deve-se inserir a espessura do material a analisar, no separador “*Thickness*” que foi, neste caso, 3 mm.
- No tipo de material a especificar, “*Material*” tem-se uma lista de materiais possíveis com as respetivas velocidades de propagação do som. Estipulou-se o alumínio para este estudo.
- No separador “*Specimen Type*” é especificado o tipo de amostra, que pode ser uma chapa ou um tubo. Neste caso usou-se uma chapa (*Plate*).
- No separador “*Weld*” são exibidos os tipos de soldadura que se pode escolher, tal como V, “*Voffset*”, “*Double V*”, “*Double V offset*”, J e U. Definiu-se o tipo V.

## Especificação da solda

As configurações que se seguem são relativas ao posicionamento da solda.

Para posicionar a solda em relação à linha central definida, têm-se as opções em linha reta direita/esquerda, ou seja, um dos lados da solda ficaria direito e não em V. Para esta aplicação escolheu-se o tipo de solda em V simétrico (“Symmetric”) em ambos os lados, Figura 127.

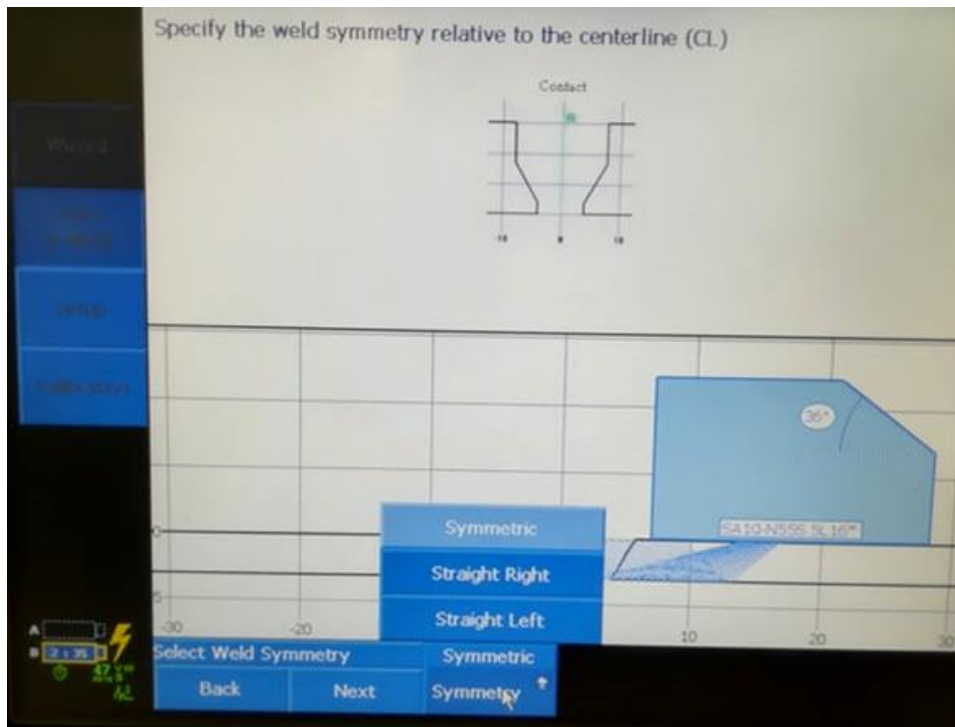


Figura 127 - Seleção da simetria da solda.

Na secção seguinte especifica-se a altura e o tamanho da largura da *LAND* (*land for cross penetration*), que se trata da parte de fusão que não é chanfrada numa operação de soldadura, Figura 128.

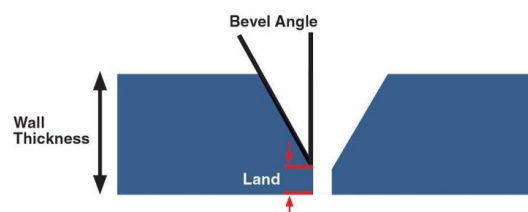


Figura 128 – Identificação da LAND.

Neste caso estipulou-se que o valor da altura (“Heigth”) seria 0, colocando a solda toda sem chanfro. Quanto á largura da *LAND* (“Offset”) definiu-se 4 mm. A Figura 129 mostra a LAND obtida.

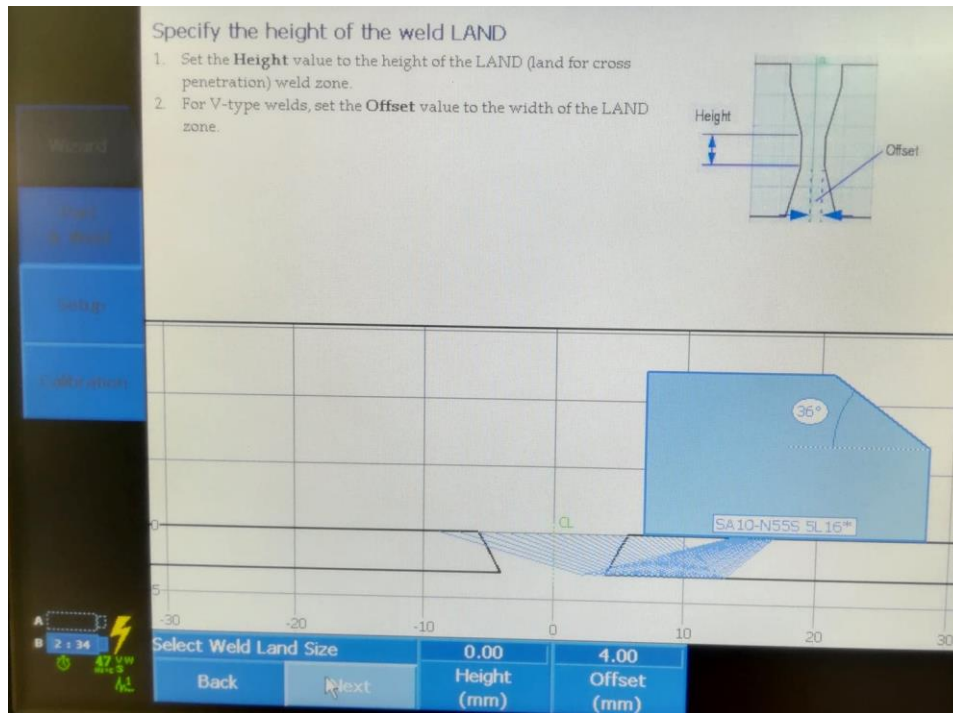


Figura 129 - Seleção do tamanho da LAND.

Depois de especificar o tamanho da LAND passou-se à especificação da altura e do ângulo da raiz da solda. A altura definida foi de 1 mm e o ângulo de raiz foi de 30°, como mostra a Figura 130.

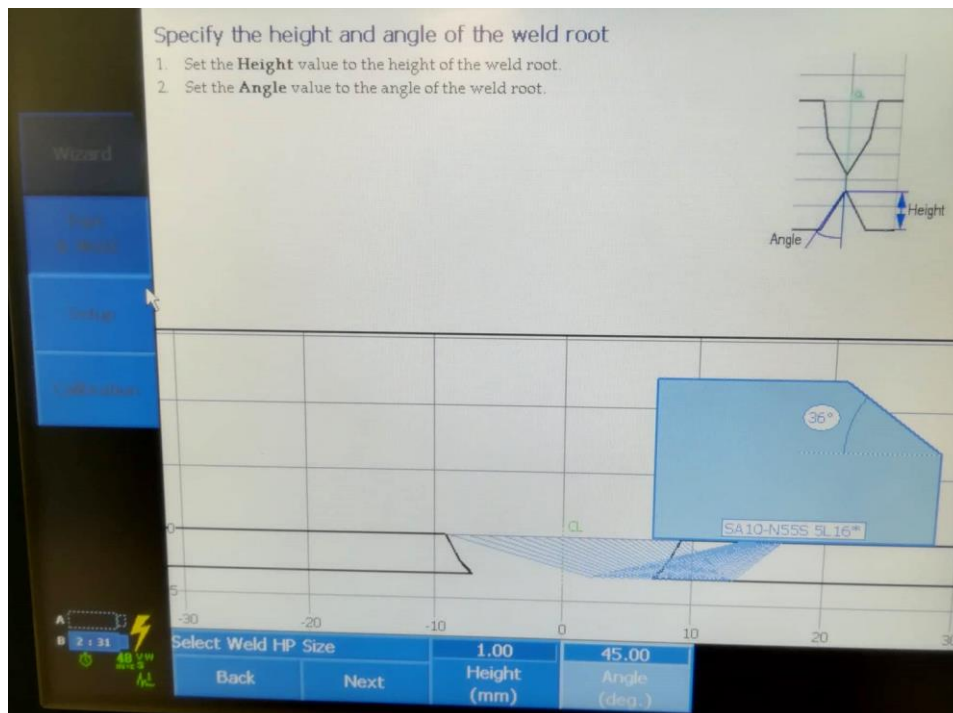


Figura 130 - Definição da altura e ângulo da raiz da solda.

Depois de estabelecer a altura e ângulo da raiz da solda passou-se à especificação das dimensões da zona de preenchimento da solda. Estipulou-se 2 mm de altura e 30° de ângulo, Figura 131.

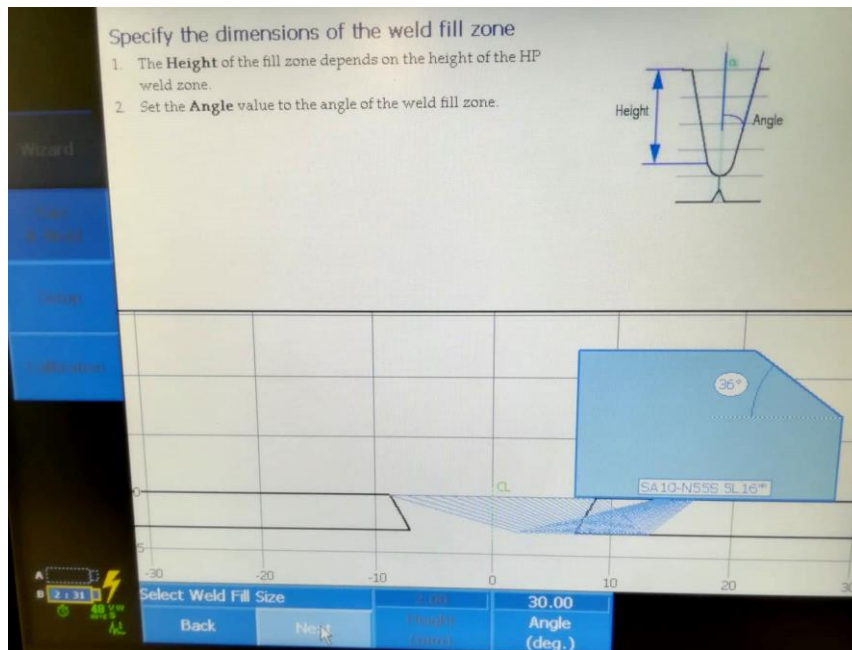


Figura 131 - Especificação da altura e ângulo da zona de preenchimento da solda.

Depois de todas as configurações relacionadas com o submenu “Part & Weld”, seleciona-se a opção “Finish”, Figura 132.

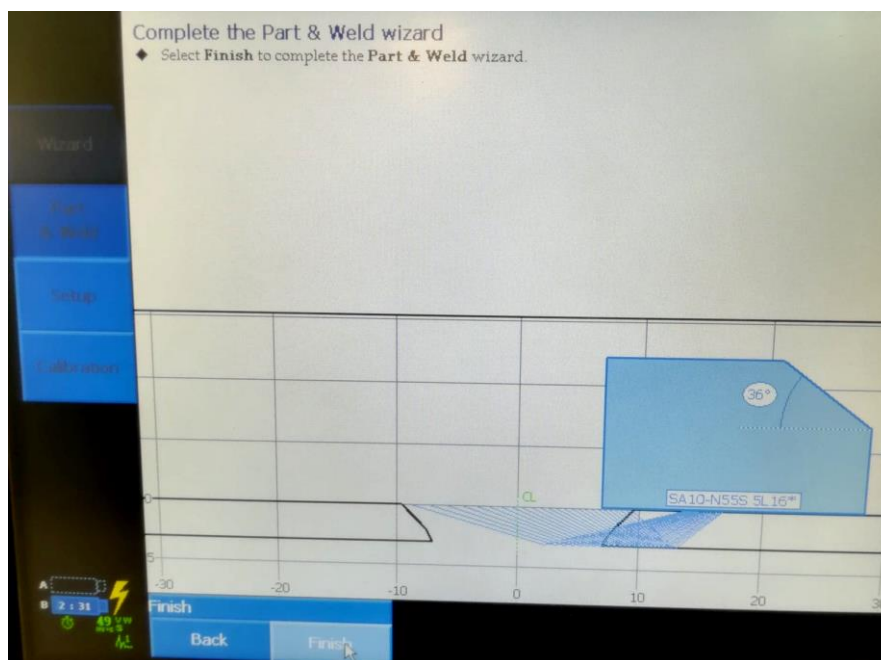


Figura 132 - Etapa do submenu Part & Weld finalizada.

O passo seguinte é ir para o submenu “Setup”, como se pode ver na Figura 133.

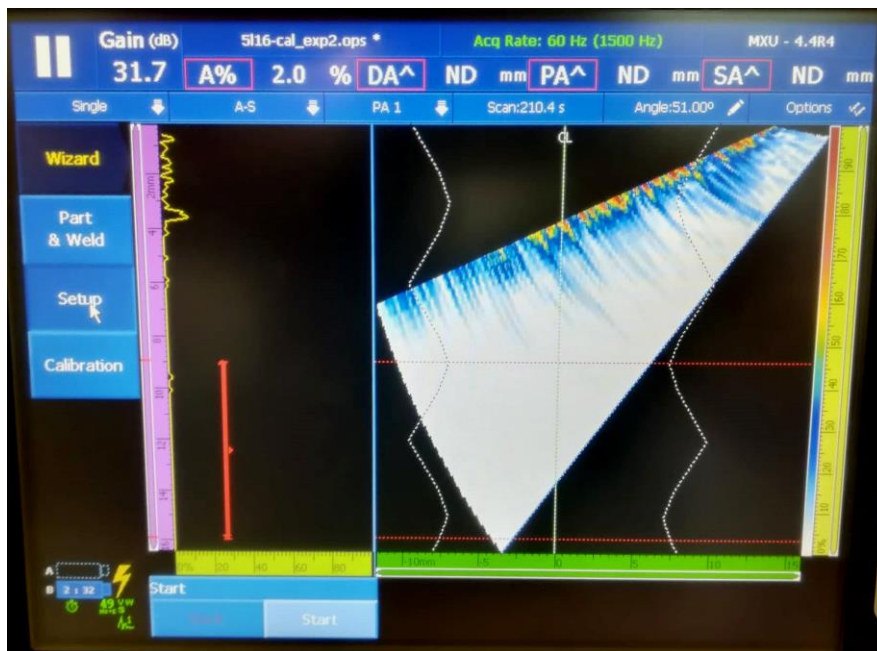


Figura 133 - Seleção do submenu "Setup".

Os parâmetros que se seguem são direcionados para o tipo de técnica em causa, ou seja, o modo *phased array*, a seleção da sonda e calço e todas as configurações das leis focais. A Figura 134 exhibe os primeiros parâmetros deste submenu.

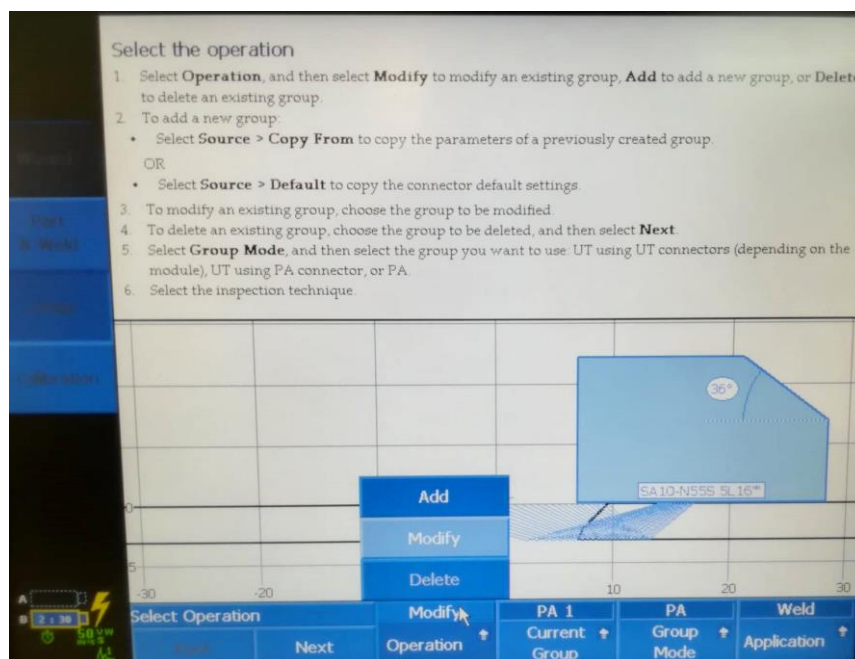


Figura 134 - Primeiros parâmetros a serem definidos no menu "Setup".

- No parâmetro “*Operation*” tem-se a opção de modificar um grupo existente, adicionar ou remover um grupo. Selecionou-se a opção “*Modify*”.
- No parâmetro “*Current Group*” somente existe a opção PA 1(*Phased Array 1*) o que significa que só existe um grupo desse tipo.
- Na definição do parâmetro “*Group Mode*” temos a opção de usar o modo *Phased Array*, ultrassom convencional que usa um conector UT (“*Ultrasound Conventional (using a UT connector)*”) e ultrassom convencional que usa um conector *Phased Array* (“*Ultrasound Conventional (using a PA connector)*”). Selecionou-se a opção *Phased Array*.
- Quanto ao parâmetro “*Application*” existem várias opções, entre elas: “*Weld*”, “*Corrosion*”, “*Composite*”, “*Stacked A-Scans*” e “*Other*”. Como o estudo em questão é direcionado para a qualidade de juntas soldadas escolheu-se a opção “*Weld*”.

O seguinte passo é estipular a sonda e o calço com que se vai inspecionar o material.

A Figura 135 mostra os parâmetros inerentes a esta especificação.

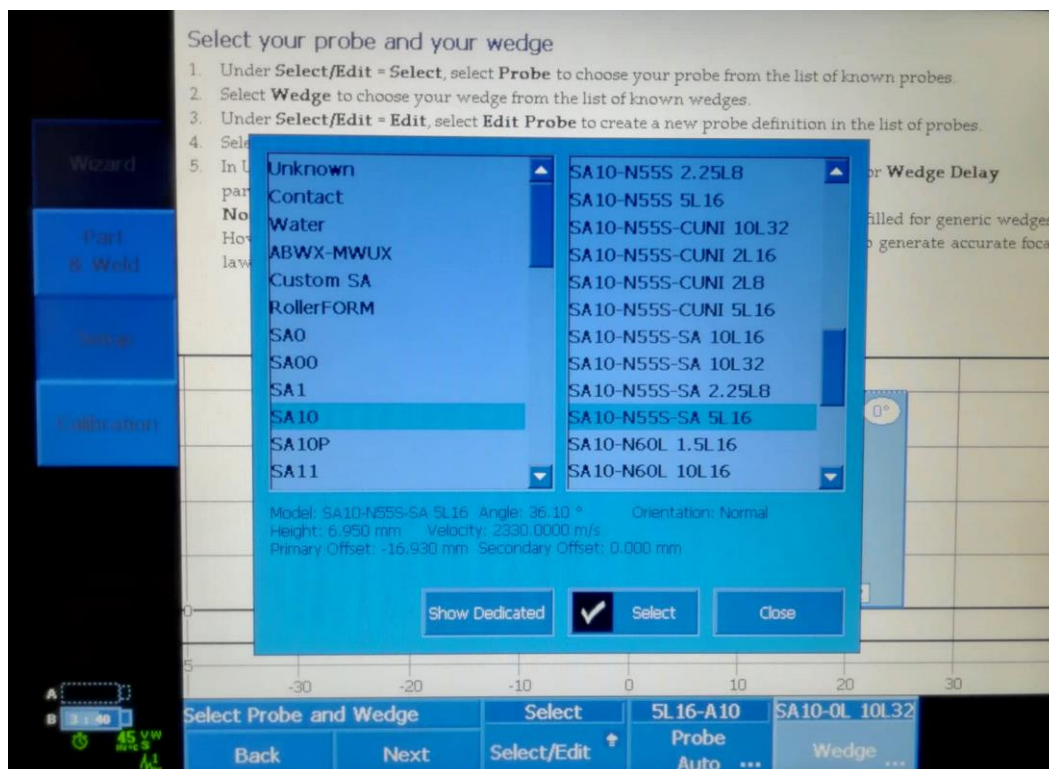
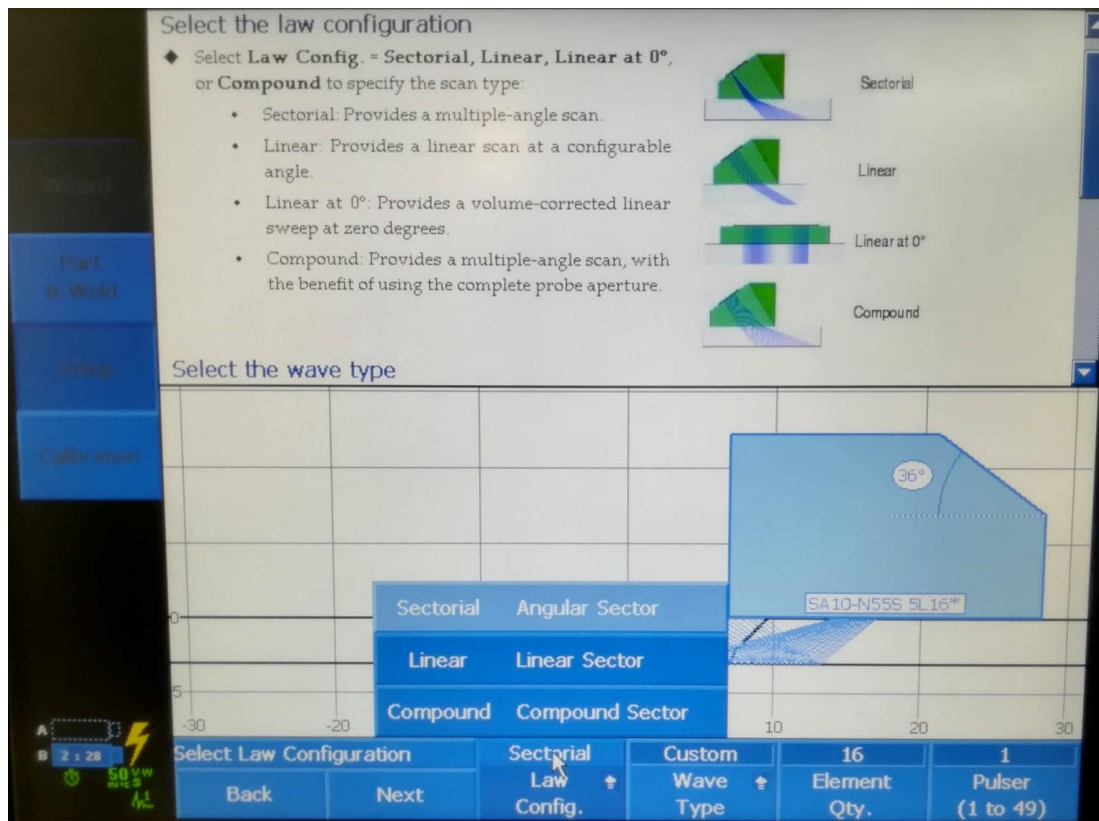


Figura 135 - Seleção da sonda e calço.

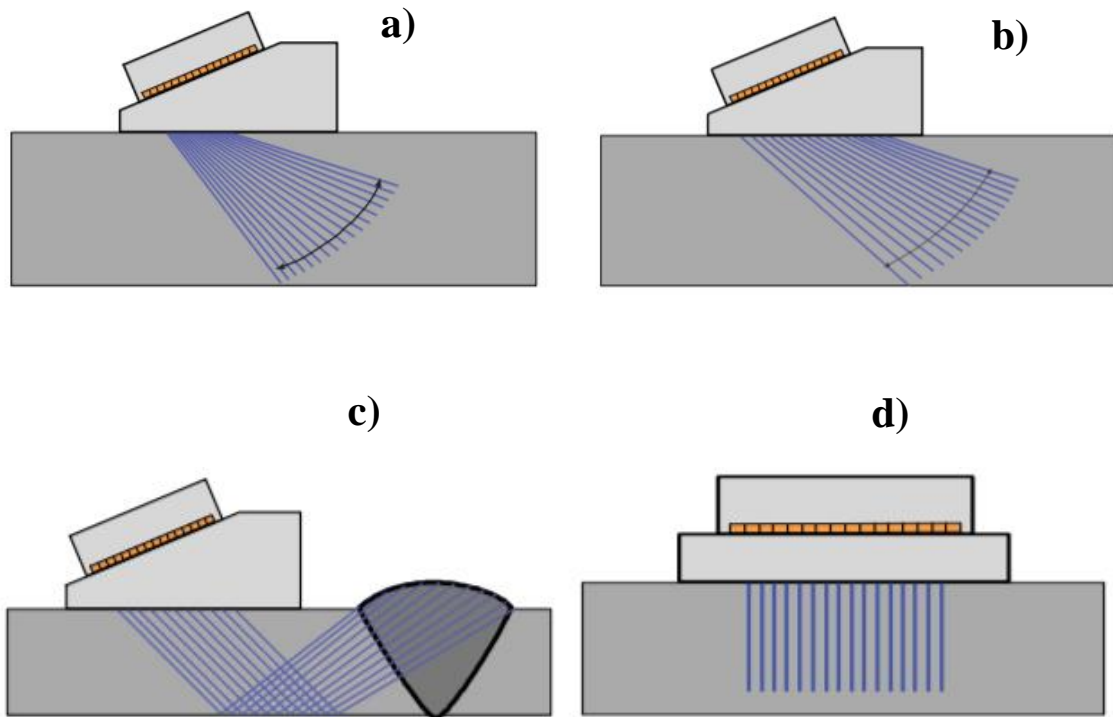
Uma vez inserida a sonda no equipamento OmniScan MX2, esta é detetada automaticamente e reconhecida pelo *software*. No entanto o calço tem de ser seleccionado, pois não é identificado. Desta forma, seleccionou-se o calço SA10-N55S 5L16 que emite ondas transversais.

De seguida especificou-se a configuração das leis focais, Figura.136.



**Figura 136** - Especificação da configuração das leis focais.

- No parâmetro “*Law Configuration*”, têm-se as opções “*Sectorial*” que permite uma varredura com vários ângulos distintos, “*Linear*” que faz uma varredura com somente um ângulo fixo em toda a inspeção e “*Compound*” que consiste numa mistura de feixes lineares e setoriais, que gera uma área de cobertura maior. Este tipo de varredura é mais utilizado em materiais com espessuras maiores. Neste caso, estipulou-se a varredura setorial. A 137 Figura mostra as diferentes configurações das leis focais.



**Figura 137** - Configuração da lei focal. a) Varredura sectorial; b) Varredura composta; c) Varredura linear com ângulo; d) Varredura linear a 0°.

- Na opção “Wave type” pode-se escolher “LW 6300 m/s (longitudinal waves)”, “SW 3100 m/s (Shear Waves)” ou “Custom”. Escolheu-se a opção “Shear Waves” uma vez que o calço emite ondas transversais.
- A quantidade de elementos (“Elements Quantity”) define o número de elementos da abertura ativa. Neste caso é 16, pois o transdutor usado contém 16 cristais piezoelétricos e vão ser todos usados para aumentar a área de inspeção.
- O parâmetro “Pulser” está definido como 1, por isso deixou-se esse parâmetro com esse valor. É usado para selecionar o pulsador do grupo selecionado. A quantidade de pulsadores disponíveis depende da configuração da sonda e do hardware. Normalmente, 1 para inspeção com uma sonda e 1 ou 65 para inspeção com duas sondas. O “Pulser” engloba uma série de fatores tais como o tipo de eco, se é pulso-eco, *pitch and catch* ou transmissão, a frequência usada, a voltagem, taxa de aquisição entre outros.

Os parâmetros expostos na Figura 138 são indicados para a especificação dos elementos do transdutor e dos ângulos de feixe.

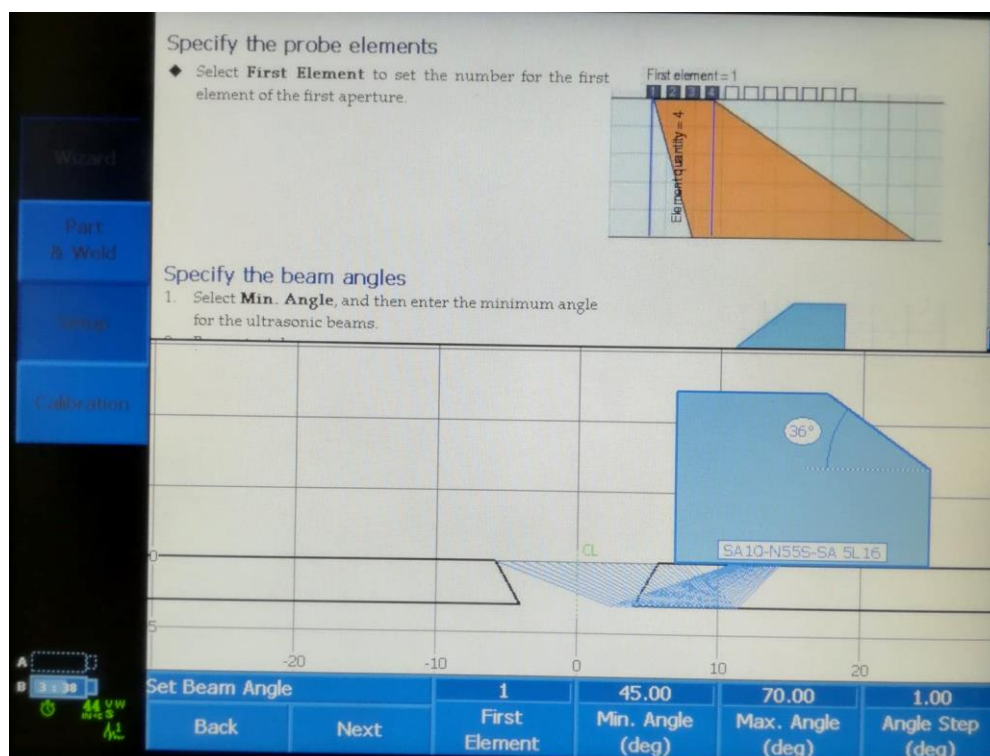


Figura 138 - Especificação dos elementos do transdutor e dos ângulos de feixe.

- O parâmetro “Pulser” define qual dos elementos é ativado para configurar a abertura ativa. Selecionou-se que a abertura ativa começava no elemento número 1.
- O “Min. Angle” e o “Máx. Angle” definem a faixa de ângulos da inspeção. Definiu-se como ângulo mínimo 45° e de 70° o ângulo máximo, com um incremento de ângulo de 1 grau, isto é, a inspeção começa no ângulo 45° depois 46°, 47° e assim sucessivamente até ao ângulo 70°. Para inspeções pequenas como é o caso, o incremento é adequado, mesmo se se definisse 0,5°, mas se fossem inspeções com grandes varreduras o incremento 0,5° ou 1° tornaria o processo mais complexo e confuso pois seriam muitos dados.

A Figura 139 mostra o conjunto de parâmetros para a especificação da profundidade do foco bem como a posição do feixe face ao transdutor/peça e do transdutor em relação à linha central, que corresponde ao centro do cordão de solda.

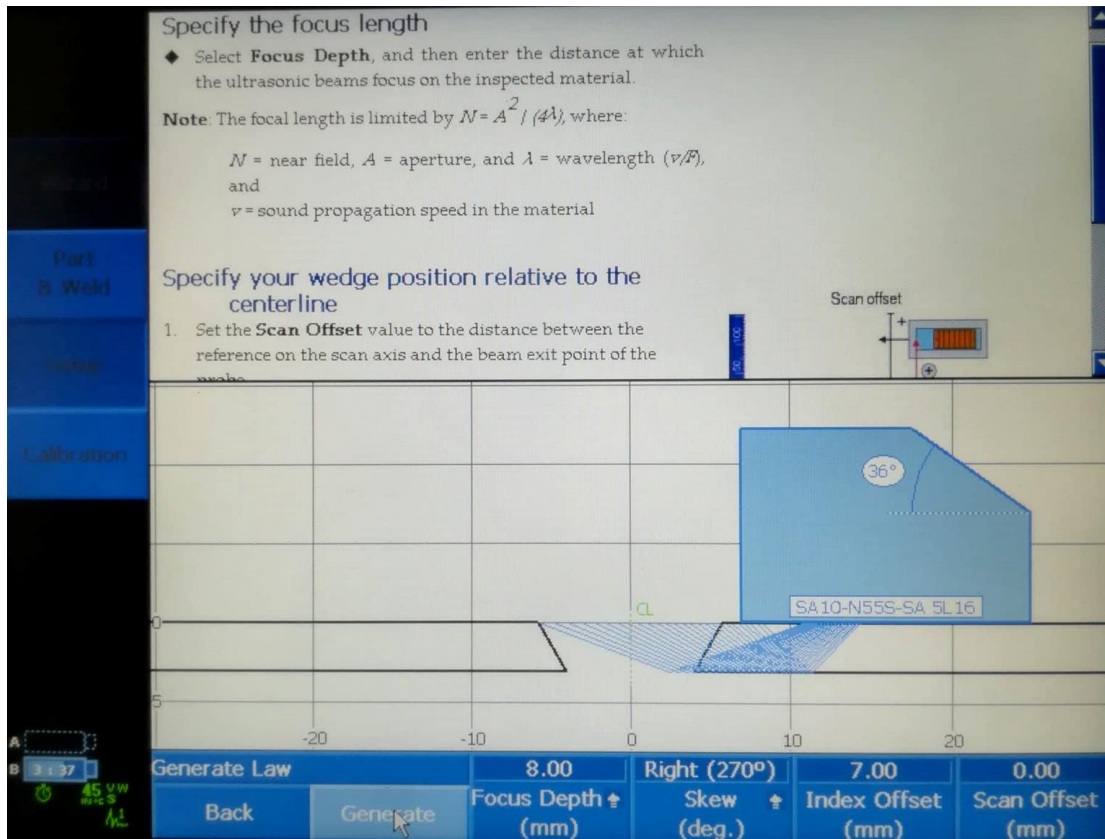
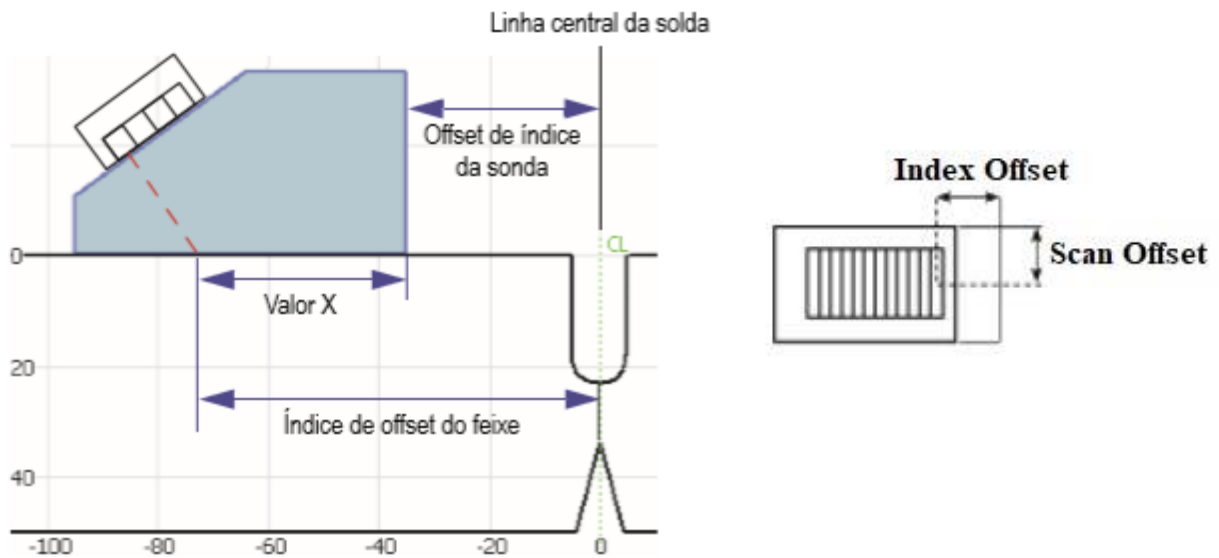


Figura 139 - Especificação da profundidade do foco e da posição do transdutor.

- No parâmetro “*Focus Depth*”, ou seja, a profundidade do foco, colou-se 8 mm, mas poderia ser outro valor qualquer igual ou superior a 3 mm que é a espessura das placas.
- O parâmetro “*Skew*” refere-se se à orientação do feixe de ultrassom relativamente ao rastreamento de índice. O transdutor pode ficar colocado do lado esquerdo (*Left* 90°) ou do direito (“*Right*” 270°), neste caso estipulou-se “*Left* 90°”. As inclinações de 90° e 270° são usadas, normalmente, para definir uma inspeção de dois lados com dois transdutores.
- O parâmetro “*Index Offset*” define onde se vai colocar o transdutor relativamente ao centro do cordão de solda. Estabeleceu-se 7 mm de distância.
- O parâmetro “*Scan Offset*” diz respeito à distância do lado do transdutor ao centro dos elementos. Deixou-se zero nesse valor.

A figura que se segue mostra a representação dos elementos relacionados com o posicionamento do transdutor e do feixe para uma melhor compreensão destes.



**Figura 140** - Parâmetros relacionados com o posicionamento do transdutor e do feixe.

Uma vez definidas todas as especificações para a aplicação em causa, passou-se ao procedimento de calibração do equipamento. Estes procedimentos estão referenciados no trabalho, Capítulo 4.

No fim da calibração criou-se um documento onde ficaram guardadas as calibrações inerentes ao transdutor usado no estudo.

O passo seguinte é abrir o documento onde estão guardadas as calibrações. Para tal basta seleccionar o menu “*File*” seguido do botão “*Open*” escolhendo-se de seguida o nome do ficheiro guardado.

Desta forma, estão reunidas todas as condições para efetuar uma inspeção adequada.

## Anexo 2

Neste anexo encontram-se todas as imagens referentes a cada placa analisada com os respectivos defeitos encontrados.

### Placa 1 com juntas soldadas pelo processo MIG

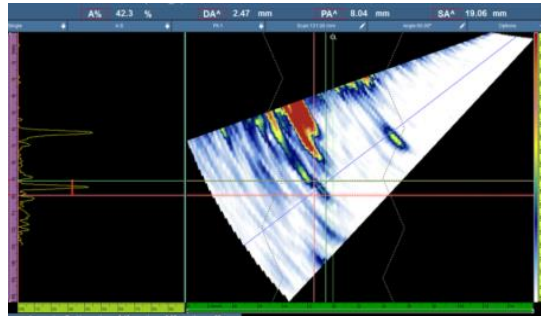


Figura 141 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 3 da região 1.

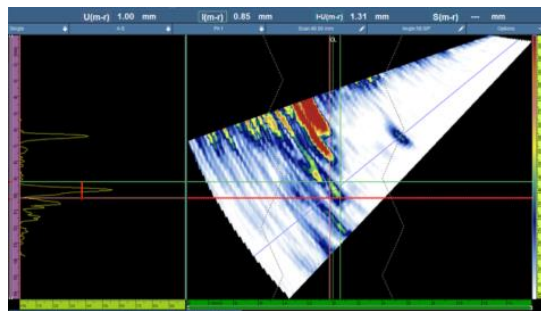


Figura 142 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 3 da região 2.

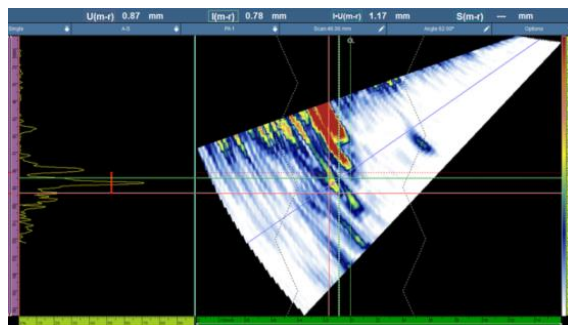


Figura 143 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 4.

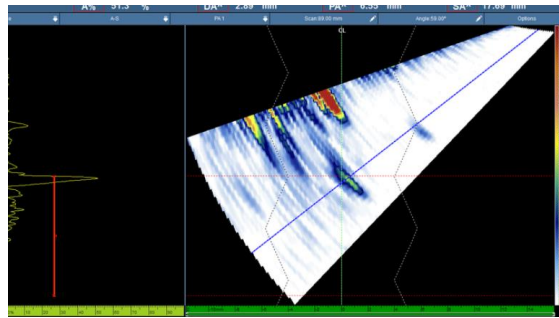


Figura 144 - Desaparecimento do defeito 2 da região 6, identificado na região 7 da placa.

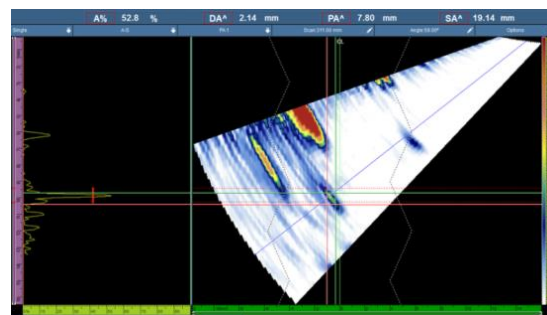


Figura 145 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 8.

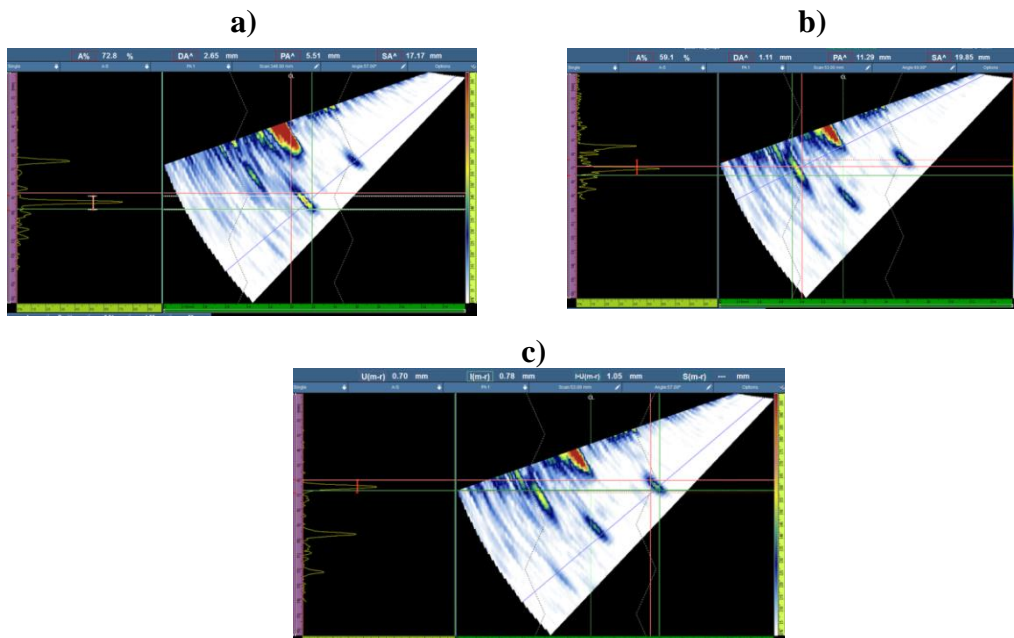
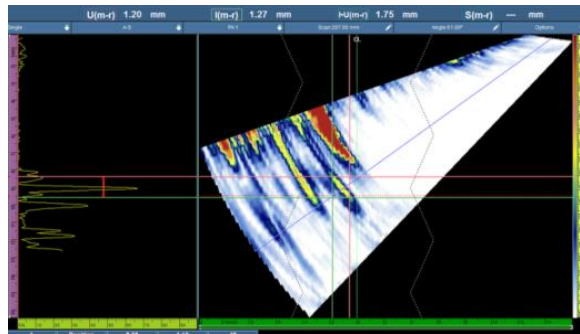
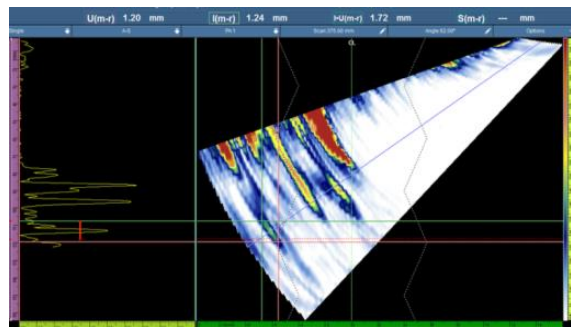


Figura 146 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9; c) Defeito 3 da região 9.

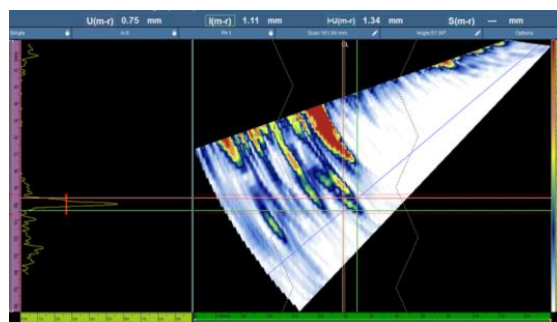
## Placa 2 com juntas soldadas pelo processo MIG



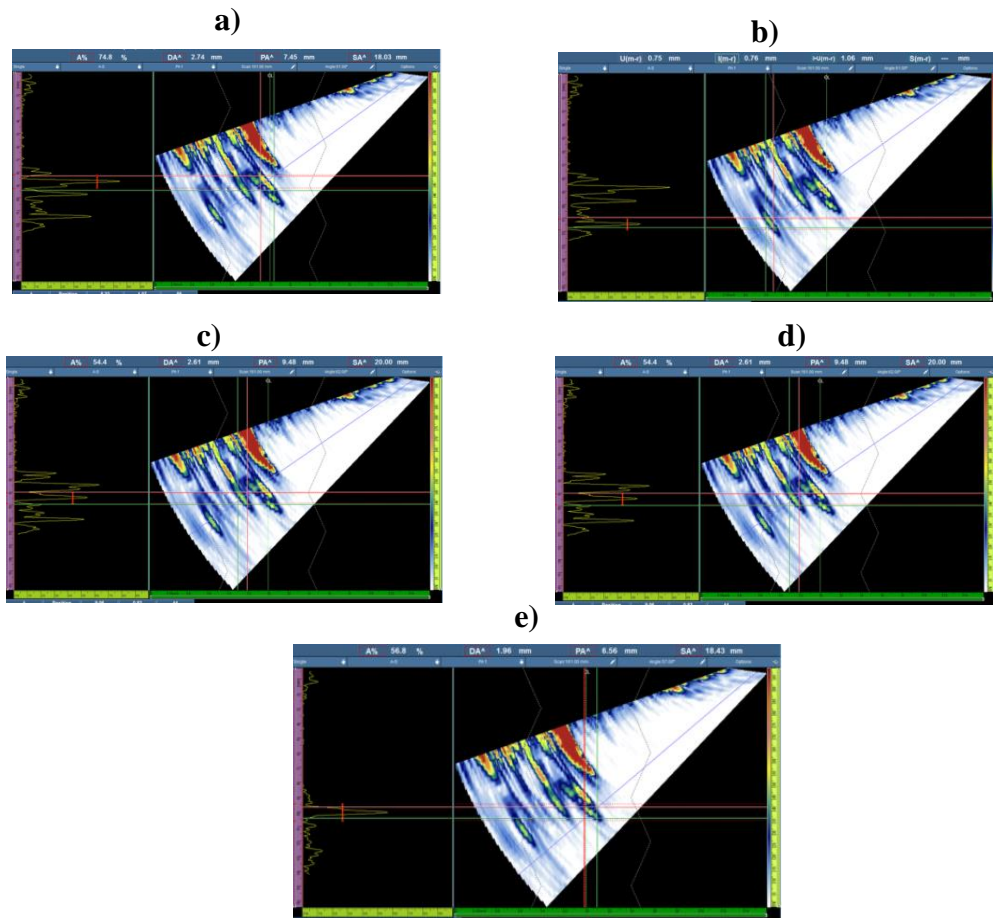
**Figura 147** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 3.



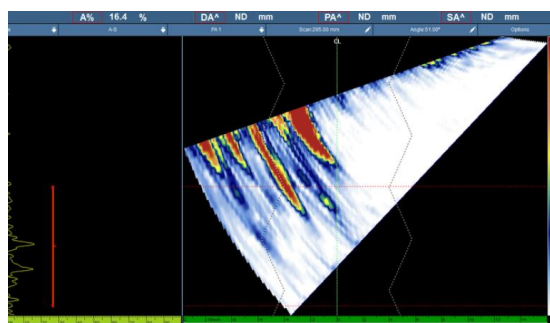
**Figura 148** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 4.



**Figura 149** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. Defeito 1 da região 5.



**Figura 150** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo MIG. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6; c) Defeito 3 da região 6; d) Defeito 4 da região 6; e) Defeito 5 da região 6.



**Figura 151** – Desaparecimento de alguns defeitos da região 6, assinalado na região 7 da Placa 2.

## Placa 1 com juntas soldadas pelo processo TIG

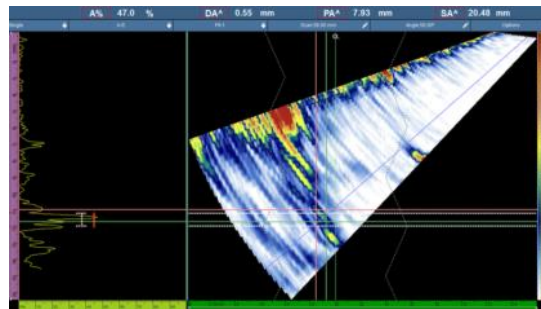


Figura 152 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 2 da região 1.

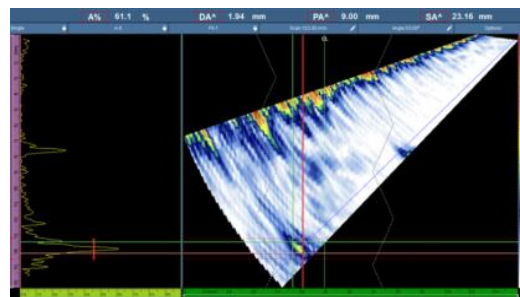


Figura 153 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 3.

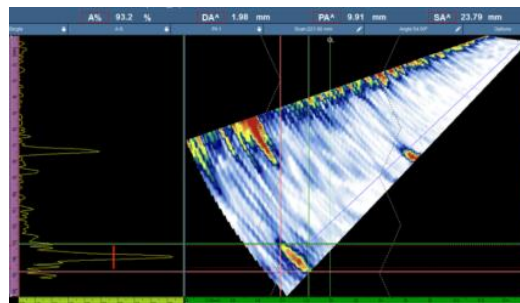


Figura 154 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 5.

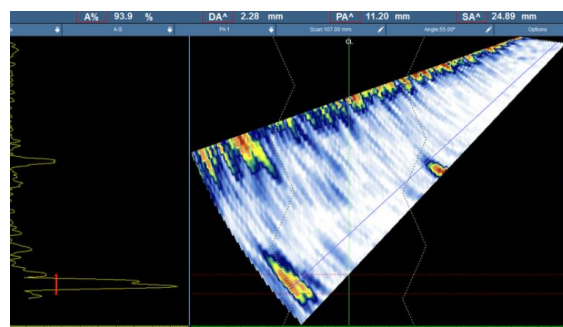
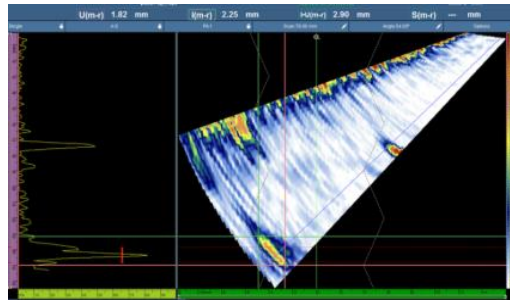
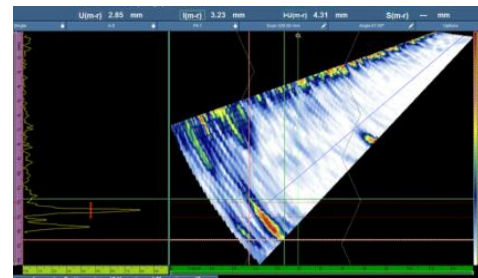
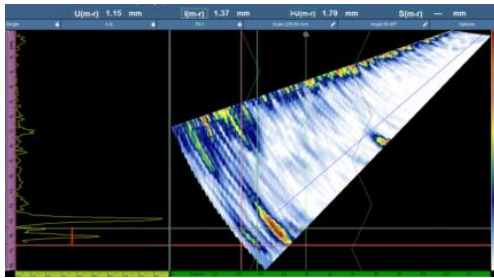


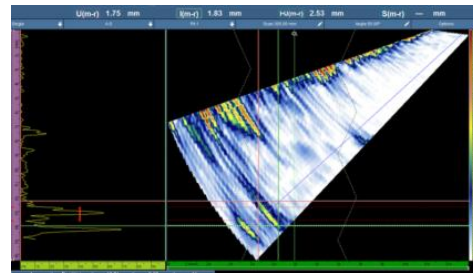
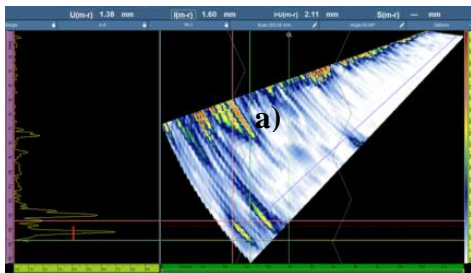
Figura 155 – Defeitos sobrepostos identificados na região 5 da Placa 1.



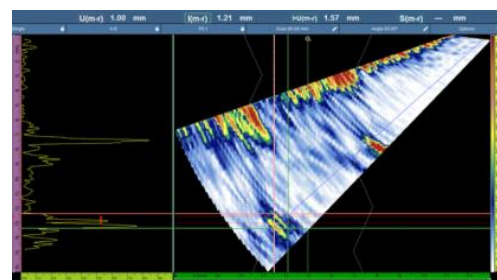
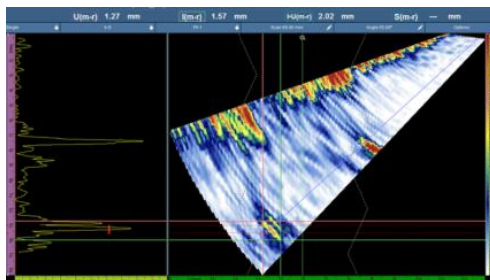
**Figura 156** - a) Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. b) Defeito 1 da região 7.



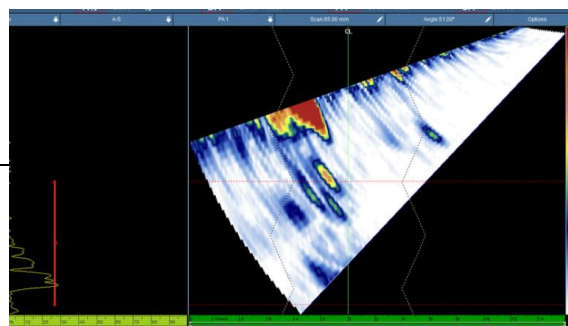
**Figura 157** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 8; b) Defeito 2 da região 8.



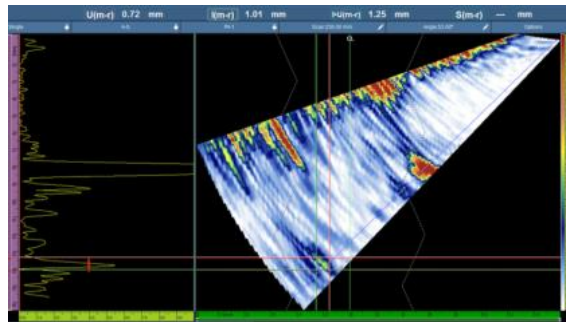
**Figura 158** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9.



**Figura 159** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 10; b) Defeito 2 da região 10.

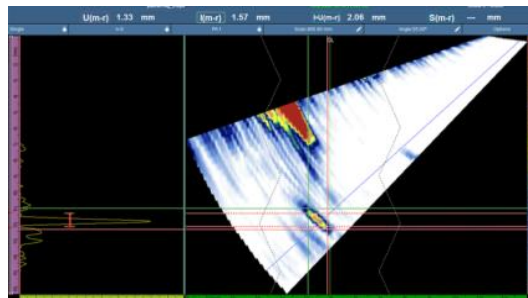


**Figura 160** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 11.



**Figura 161** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 13.

### Placa 3 com junta soldada pelo processo TIG



**Figura 162** - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo TIG. Defeito 1 da região 2.

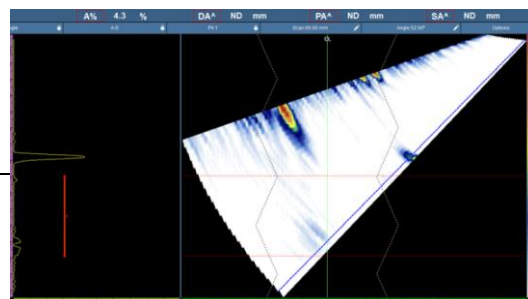


Figura 163 – Desaparecimento do defeito 1 da região 2, registado na região 3 da placa.

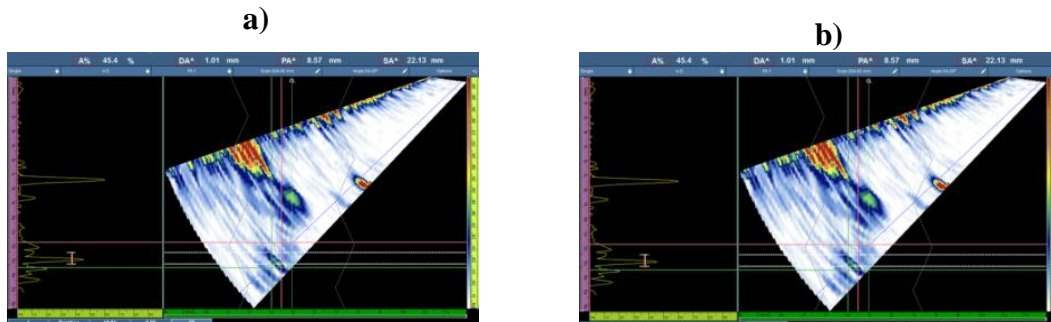


Figura 164 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo TIG. a) Defeito 1 da região 5; b) Defeito 2 da região 5.

### Placa 2 com junta soldada pelo processo *Friction Stir Welding*

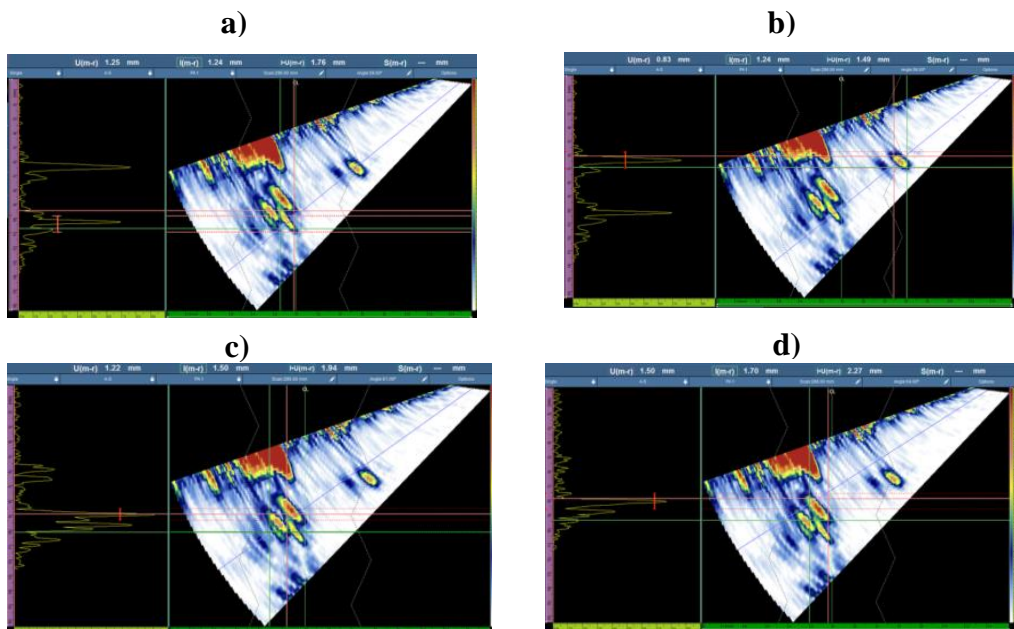


Figura 165 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 2; b) Defeito 2 da região 2; c) Defeito 3 da região 2; d) Defeito 4 da região 2.

Os defeitos da região 2 mantiveram-se na região 3 da placa. No entanto, alguns defeitos da região 2 começam a desaparecer na região 4 da placa 1.

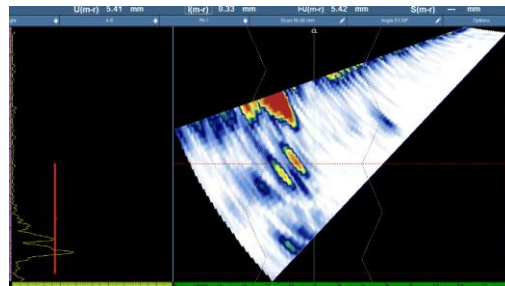


Figura 166 – Defeitos detetados na região 4 da placa 1.

Estes defeitos detetados na região 4 da placa mantiveram-se na região 5 da mesma.

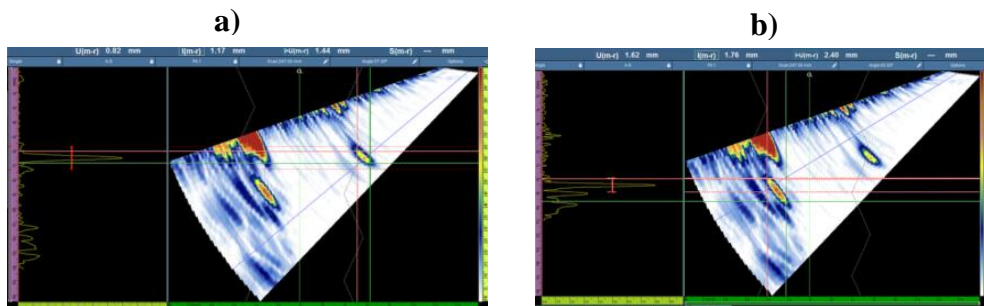


Figura 167 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6.

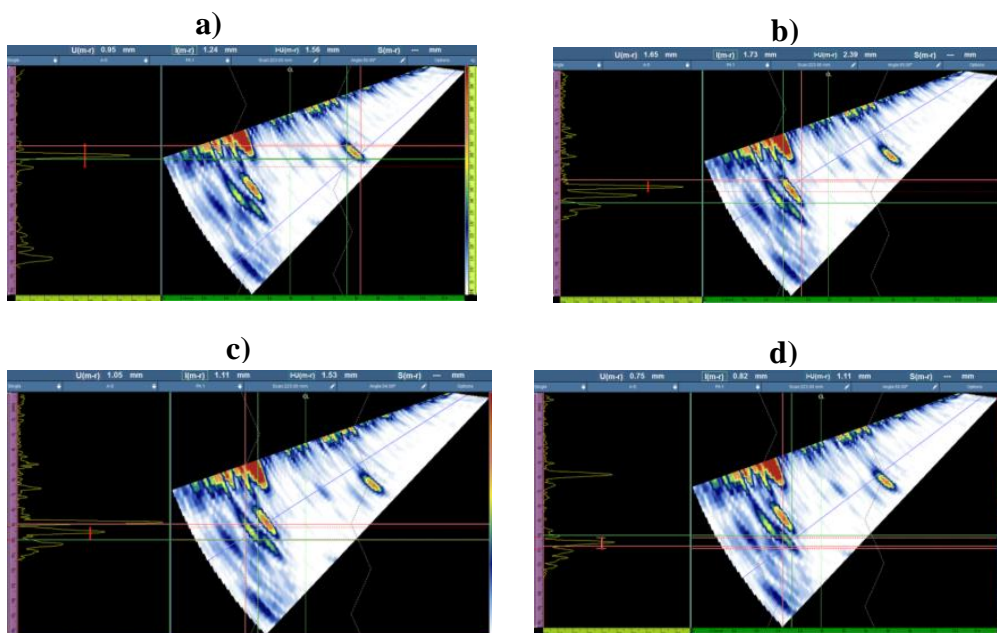
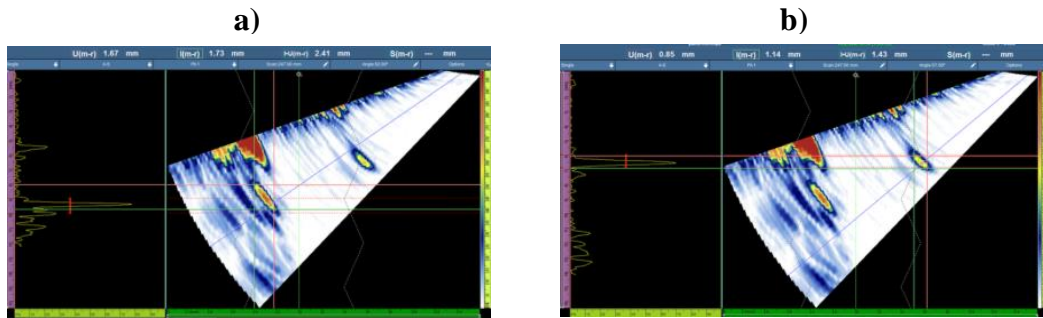
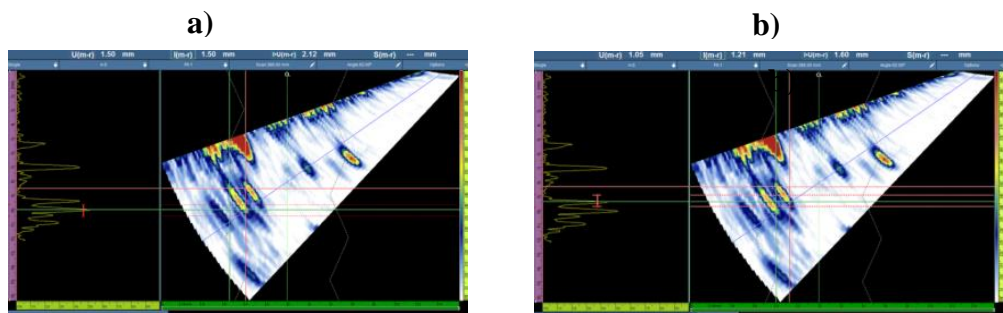


Figura 168 - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7; c) Defeito 3 da região 7; d) Defeito 4 da região 7-

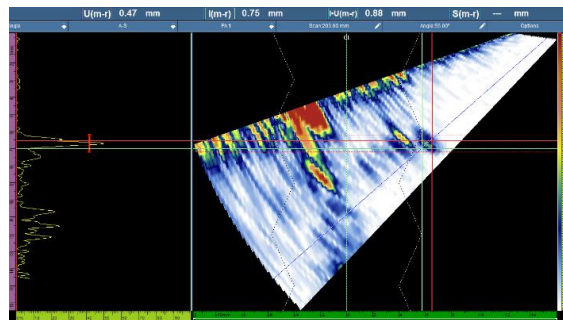


**Figura 169** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 8; b) Defeito 2 da região 8.

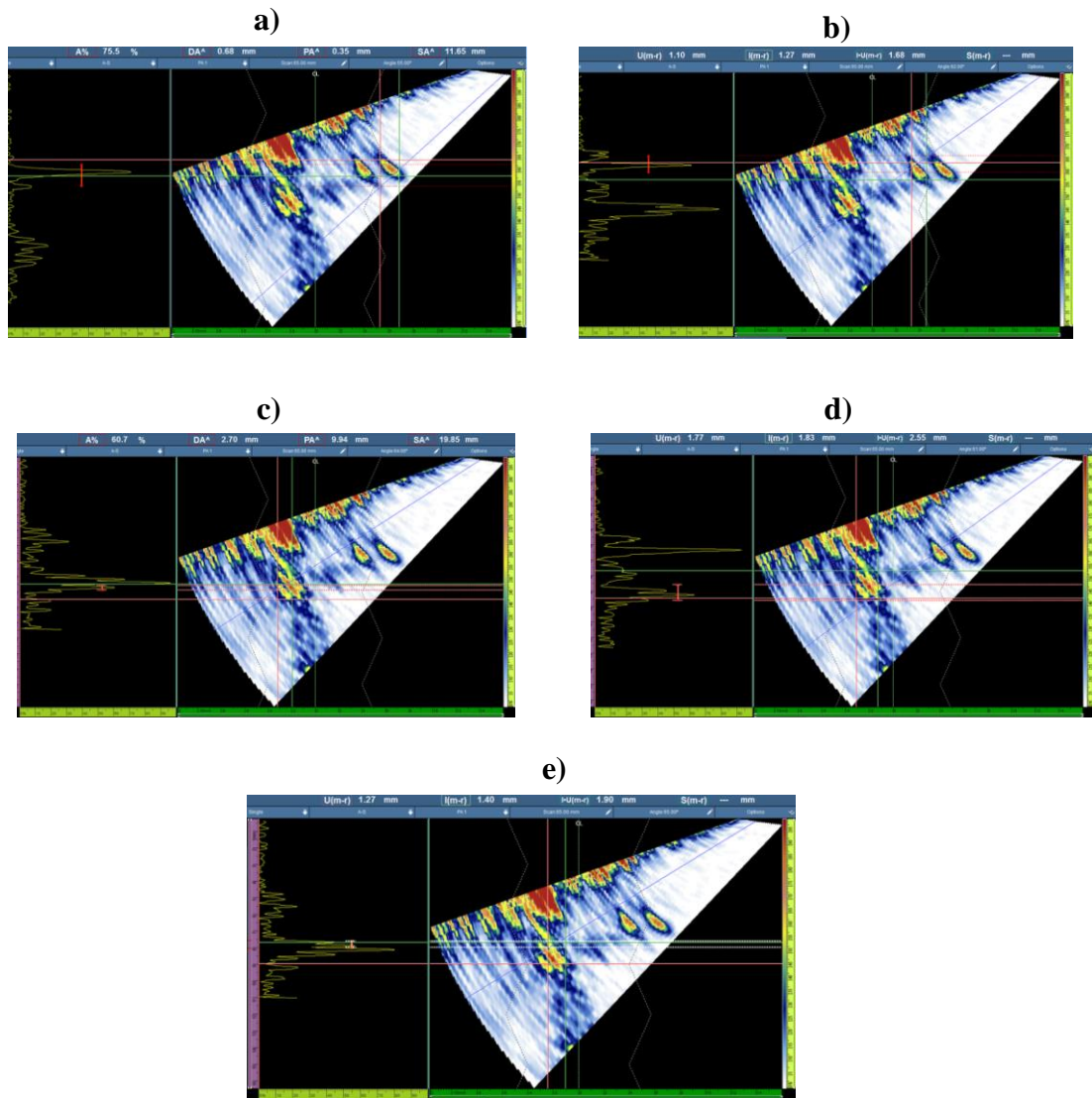


**Figura 170** - Detecção de defeitos da Placa 1 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9.

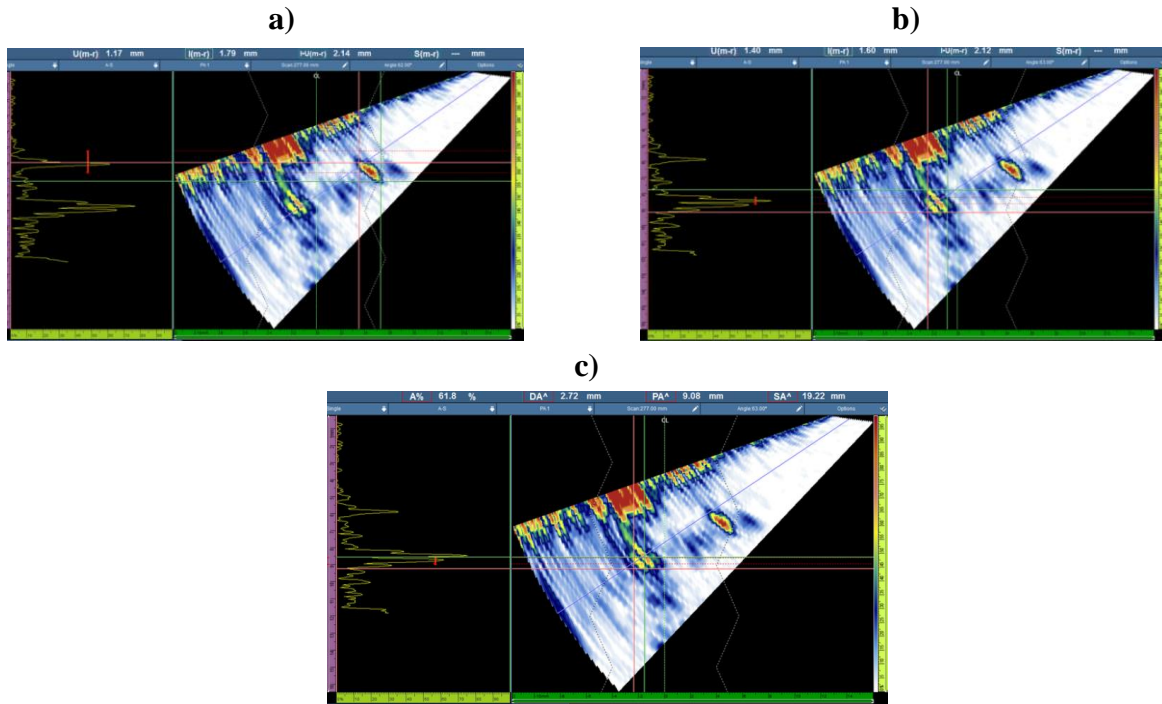
### Placa 3 com junta soldada pelo processo FSW



**Figura 171** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Descontinuidade 1 da região 1.

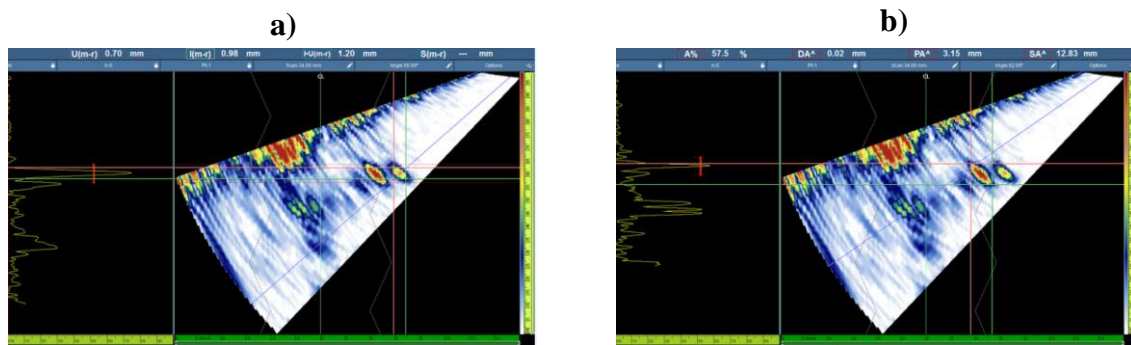


**Figura 172** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 1; b) Defeito 2 da região 2; c) Defeito 3 da região 2; d) Defeito 4 da região 2; e) Defeito 5 da região 2.



**Figura 173** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 3; b) Defeito 2 da região 3; c) Defeito 3 da região 2.

Os defeitos da região 3 mantiveram-se na região 4 da Placa 2.



**Figura 174** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 5; b) Defeito 2 da região 5.

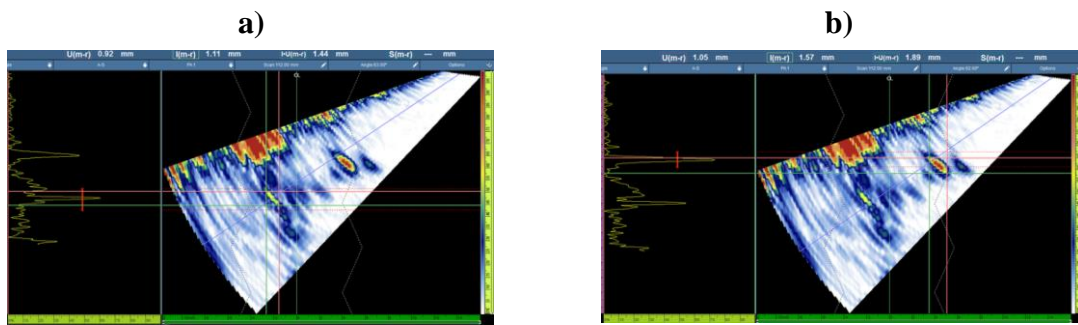


Figura 175 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6.

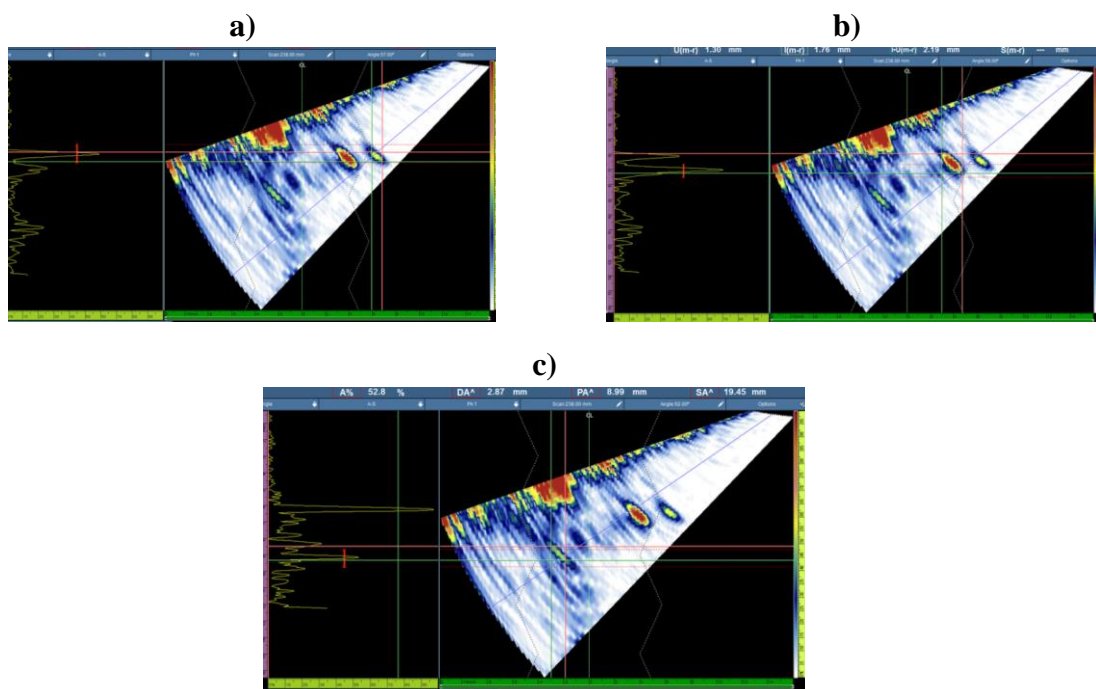


Figura 176 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7; c) Defeito 3 da região 7.

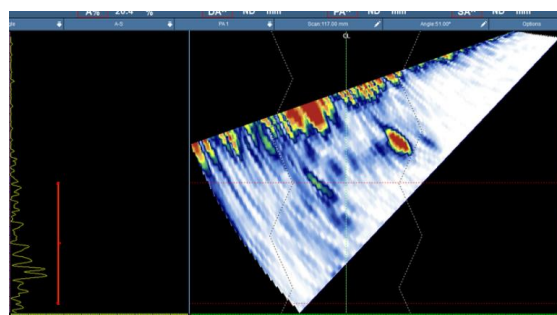


Figura 177 – Desaparecimento do defeito 1 da região 7, assinalado na região 8 da placa.

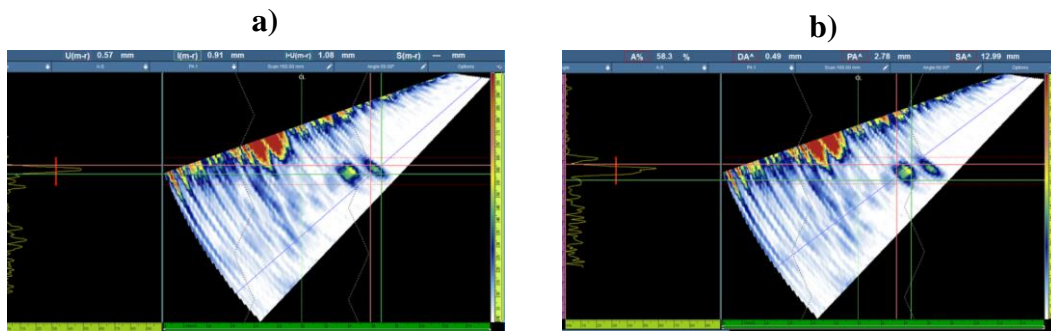


Figura 178 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9.

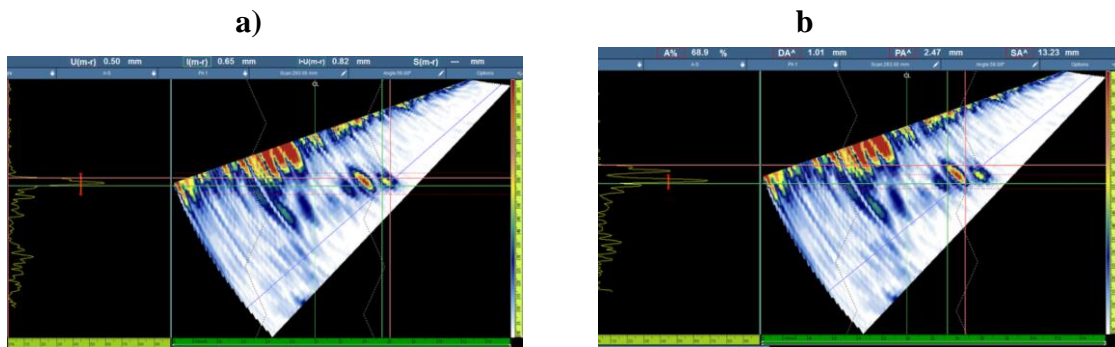


Figura 179 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Descontinuidade 1 da região 10; b) Defeito 2 da região 10.

Os defeitos detetados na região 10, mantiveram-se não região 11, restando alguns defeitos identificados na região 12.

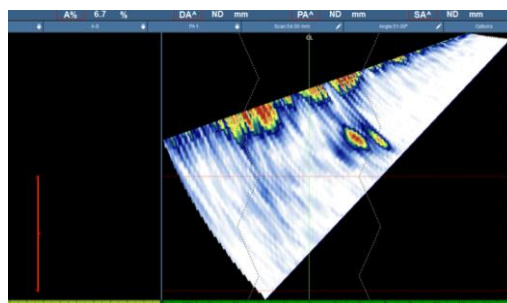
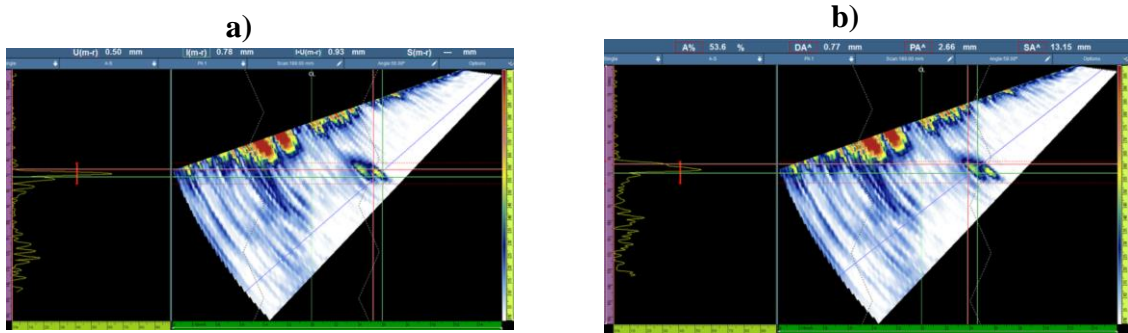
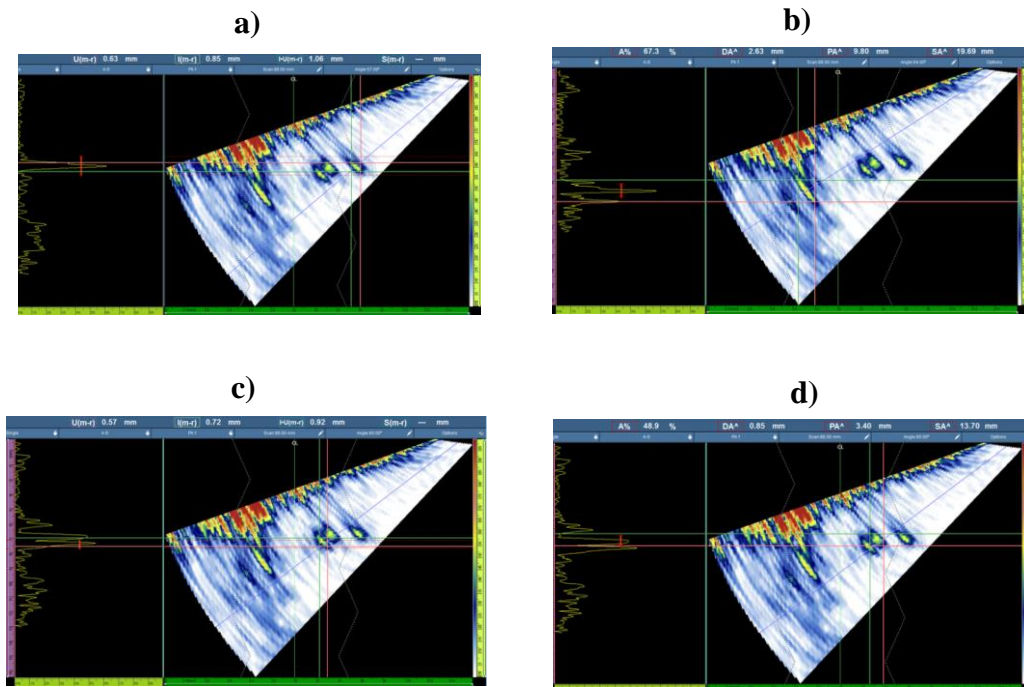


Figura 180 – Defeitos que restaram da região 10 identificados na região 12.



**Figura 181** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Descontinuidade1 da região 14; b) Defeito 2 da região 14.



**Figura 182** - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 15; b) Defeito 2 da região 15; c) Defeito 3 da região 15; d) Defeito 4 da região 15.

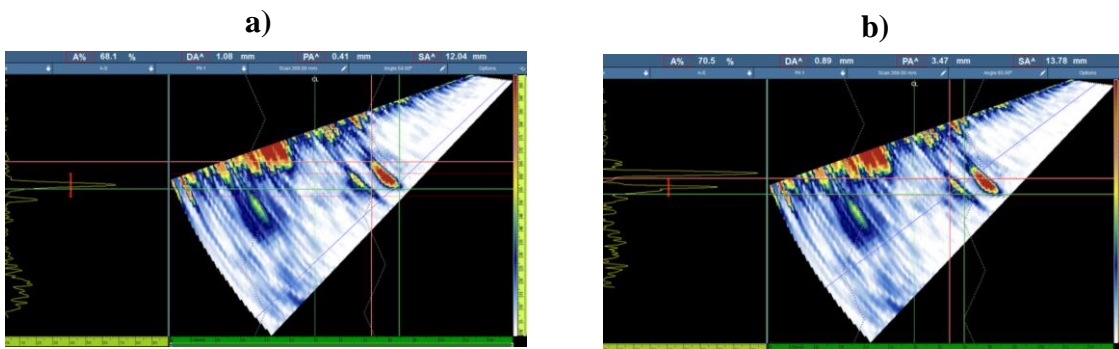


Figura 183 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região16; b) Defeito 2 da região 16.

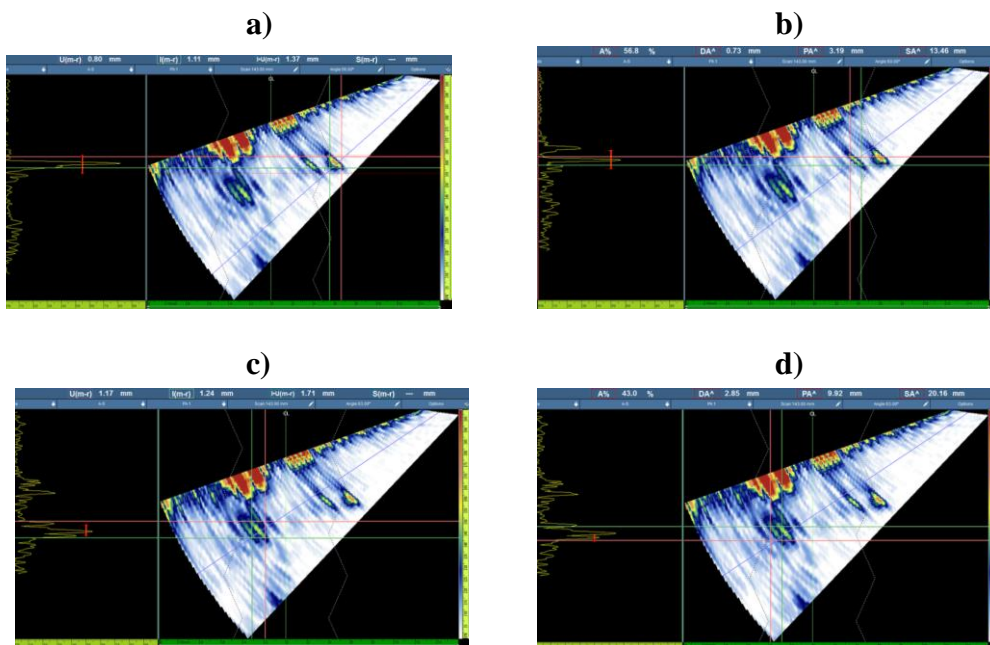


Figura 184 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região17; b) Defeito 2 da região 17; c) Defeito 3 da região 17 d) Defeito 4 da região 17.

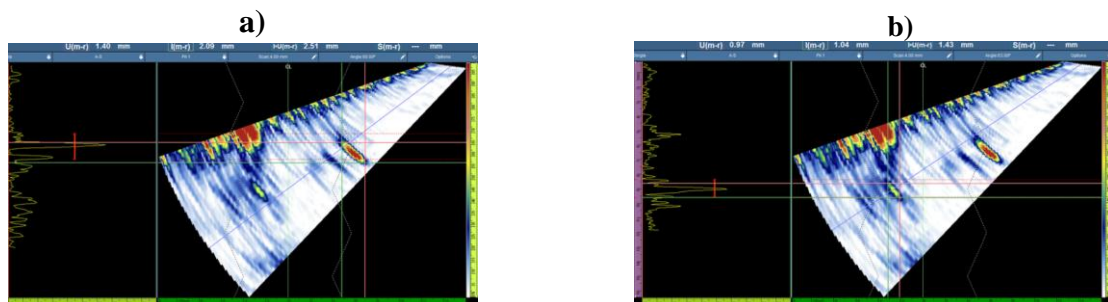


Figura 185 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região18; b) Defeito 2 da região 18.

Os defeitos detetados na região 18 mantiveram-se na região 19, desaparecendo o defeito 1 na região 20.

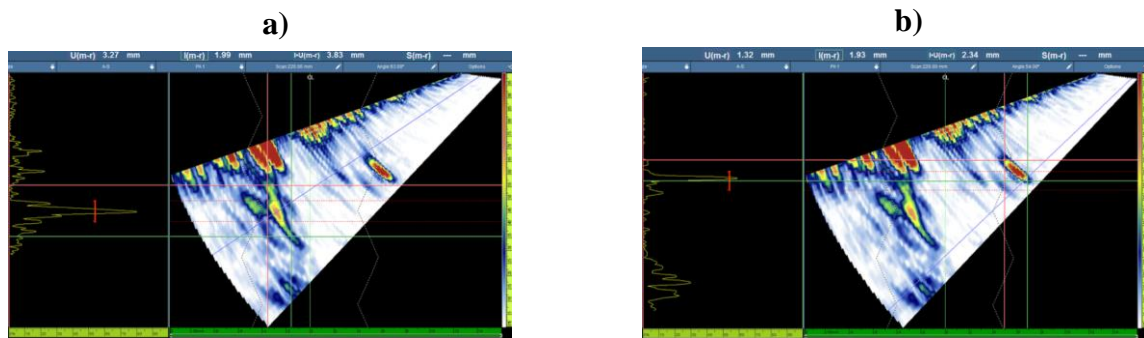


Figura 186 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 21; b) Defeito 2 da região 21.

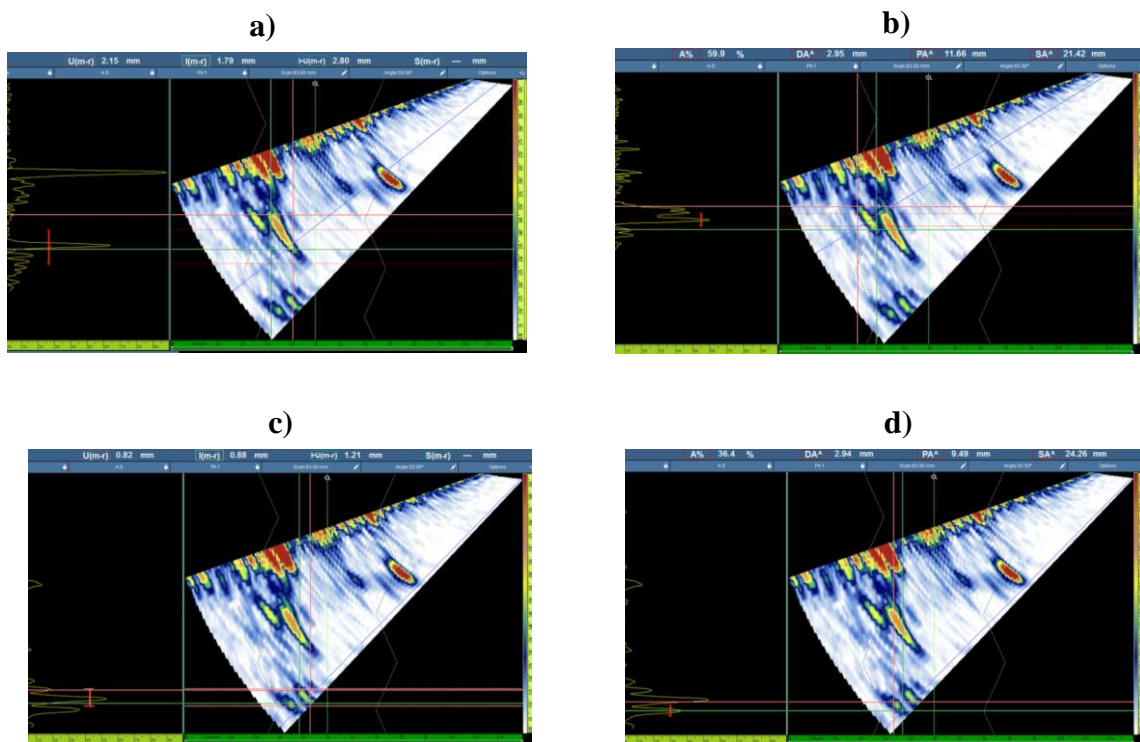


Figura 187 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 26; b) Defeito 2 da região 26; c) Defeito 3 da região 26; d) Defeito 4 da região 26.

Os defeitos da região 26 mantiveram-se na região 27 da placa.

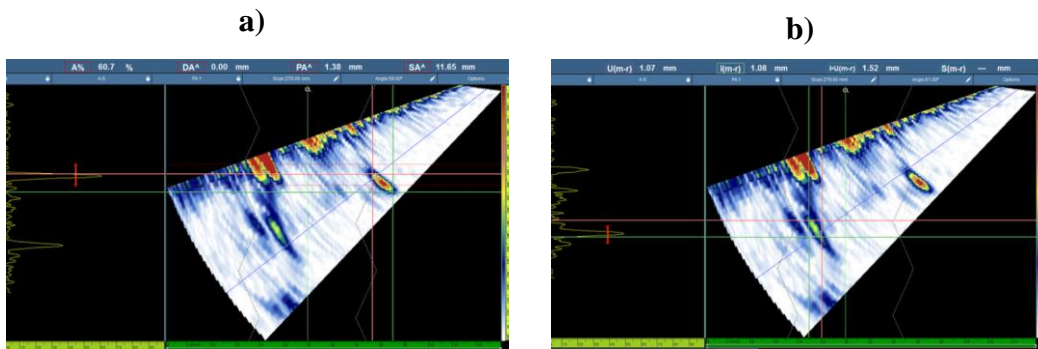


Figura 188 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 28; b) Defeito 2 da região 28.

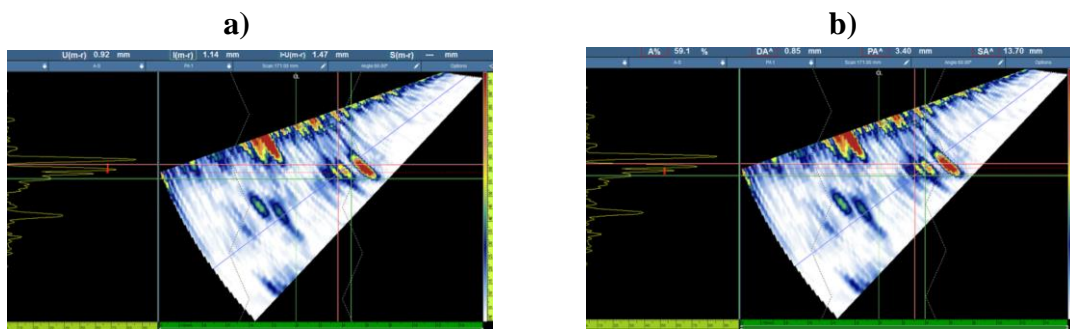


Figura 189 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 29; b) Defeito 2 da região 29.

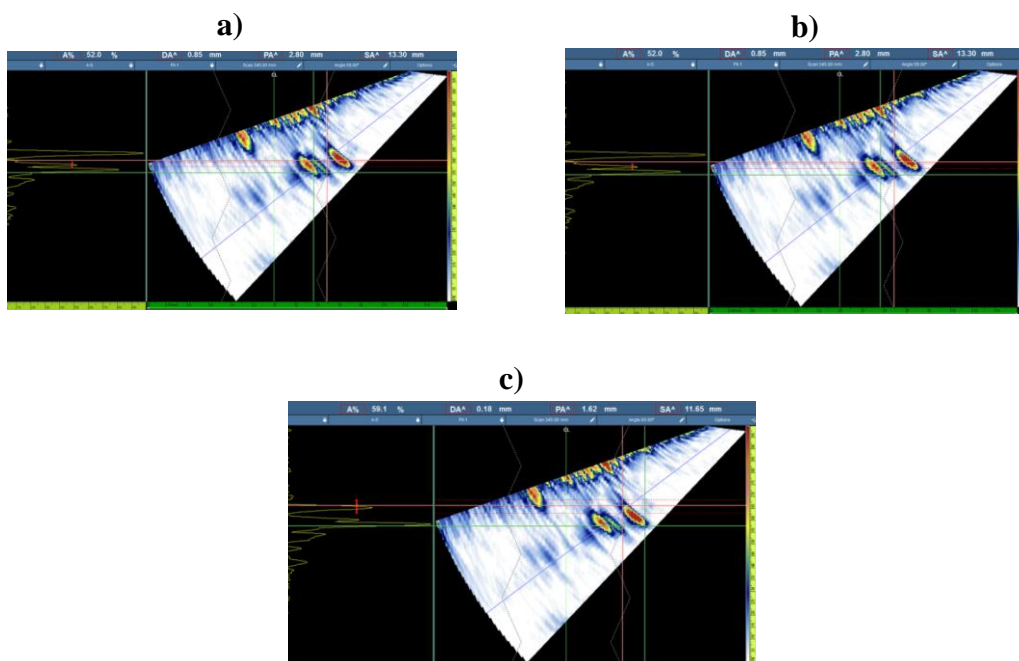


Figura 190 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 30; b) Defeito 2 da região 30 .

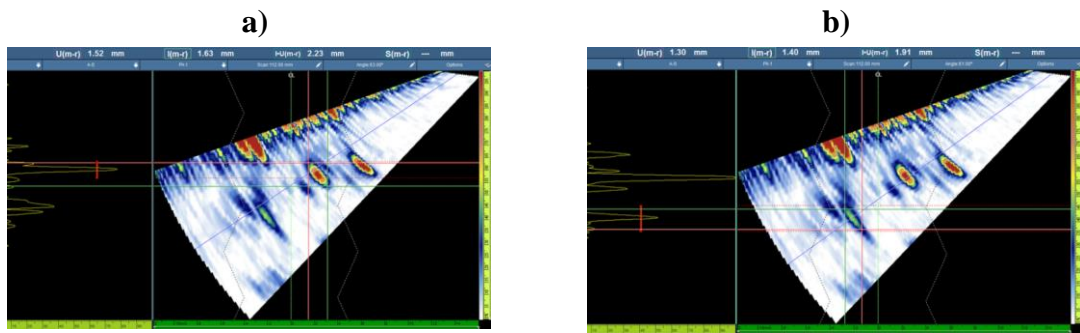


Figura 191 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 31; b) Defeito 2 da região 31.

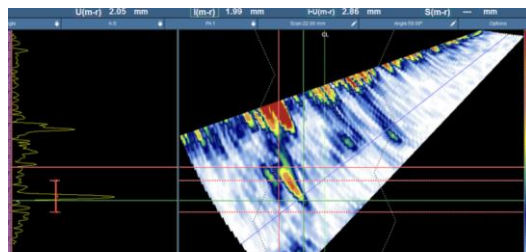


Figura 192 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 31.

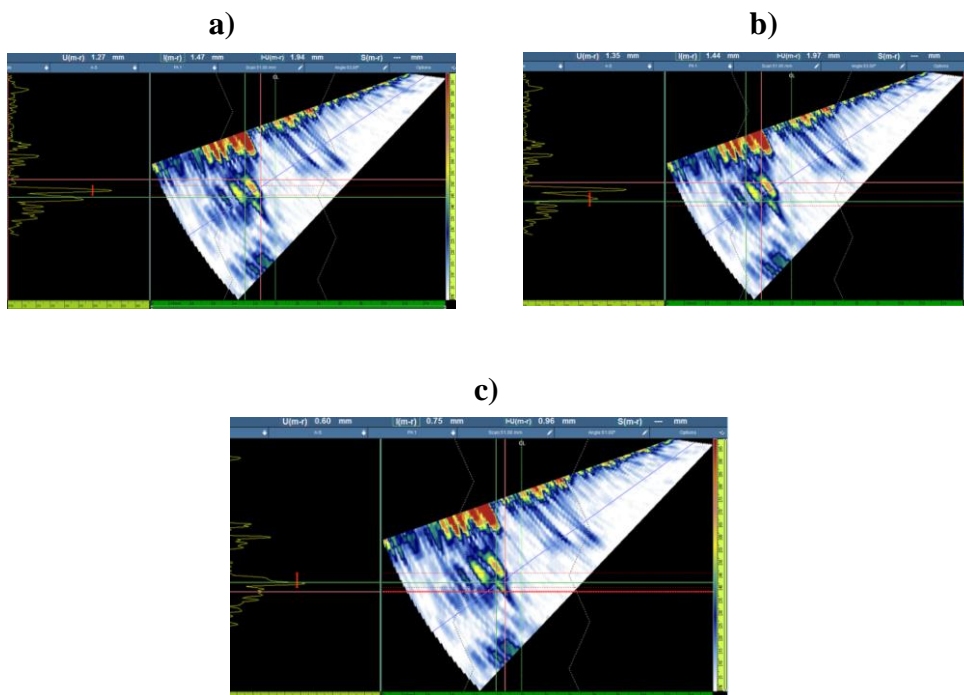


Figura 193 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 33; b) Defeito 2 da região 33; c) Descontinuidade 3 da região 33.

## Placa 3 com junta soldada pelo processo FSW

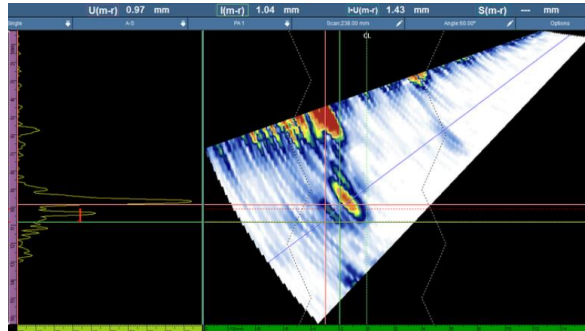


Figura 194 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 1.

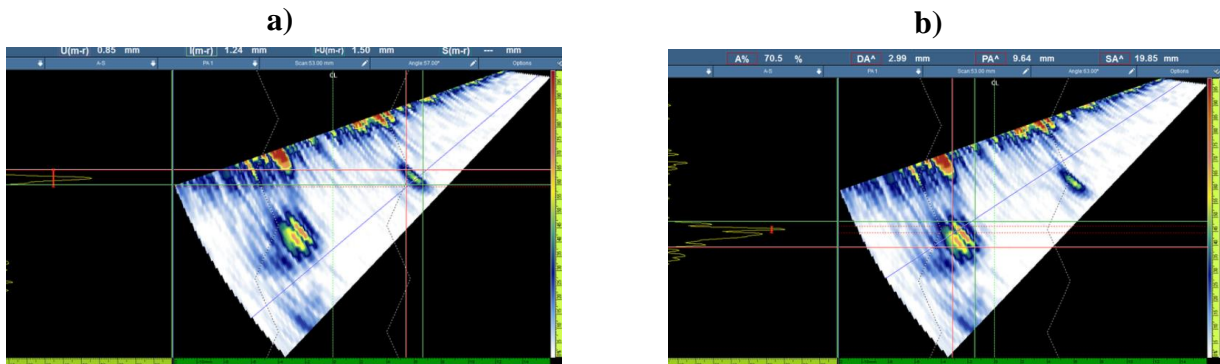


Figura 195 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 2; b) Defeito 2 da região 2.

Os defeitos da região 3 mantiveram-se na região 4 da placa.

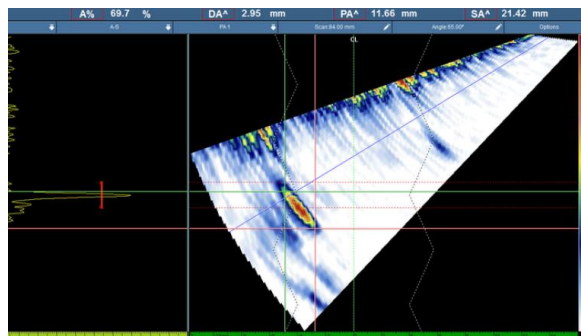


Figura 196 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 5.

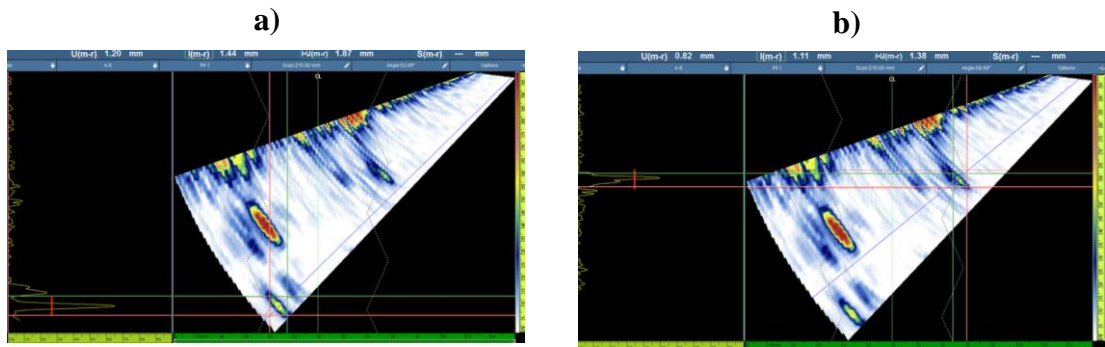


Figura 197 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 6; b) Defeito 2 da região 6.

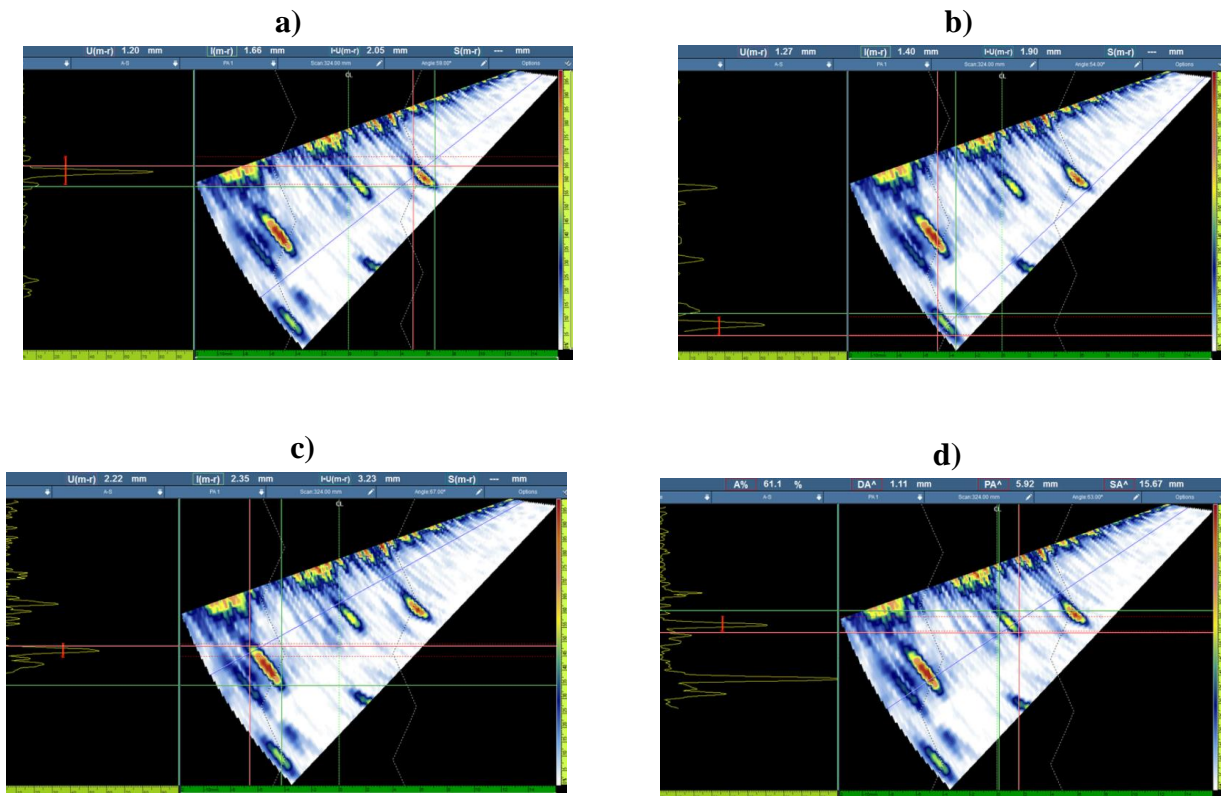


Figura 198 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 7; b) Defeito 2 da região 7; c) Defeito 3 da região 7; d) Defeito 4 da região 7.

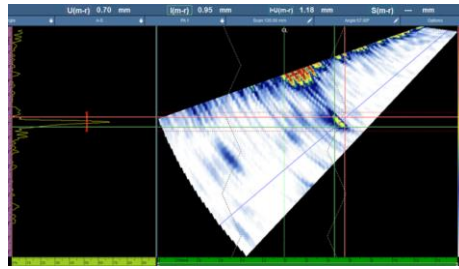


Figura 199 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 8.

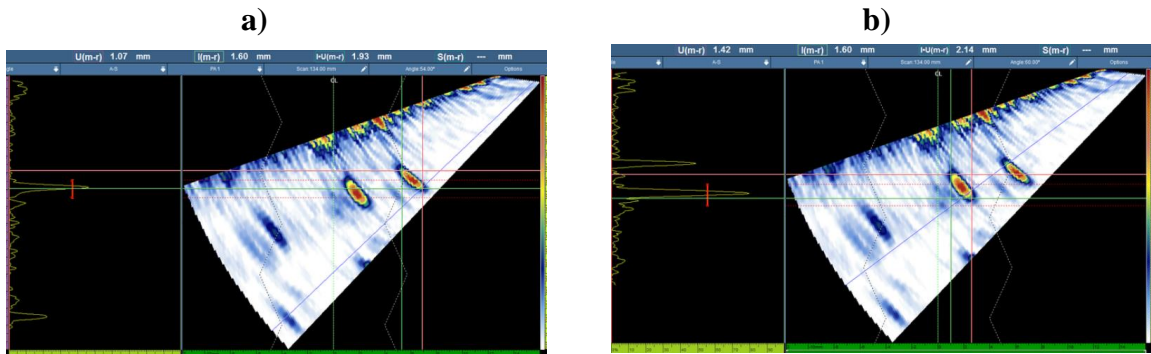


Figura 200 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 9; b) Defeito 2 da região 9.

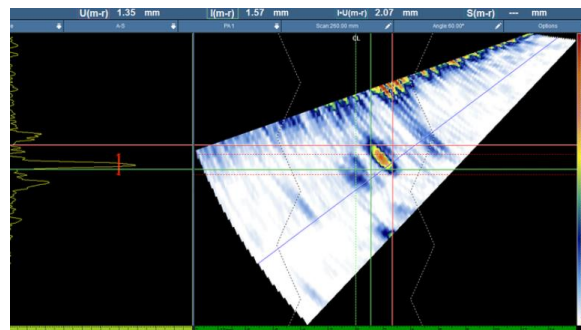


Figura 201 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 10.

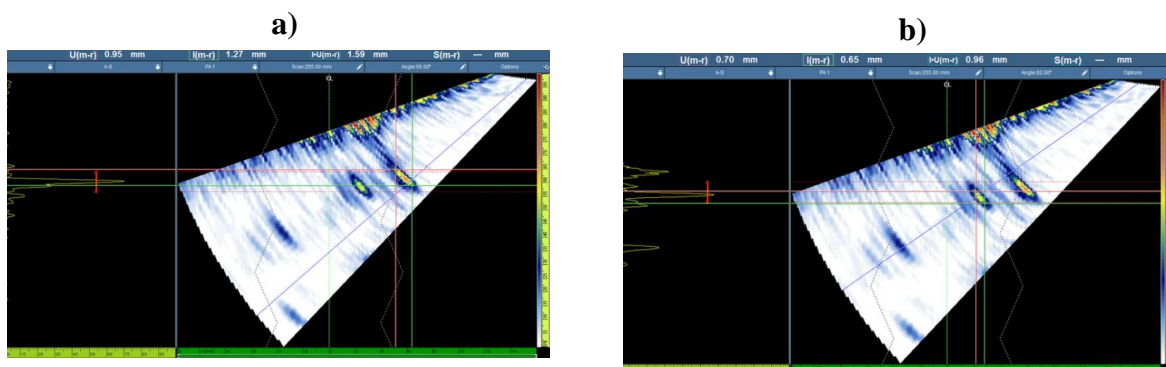


Figura 202 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 11; b) Defeito 2 da região 11.

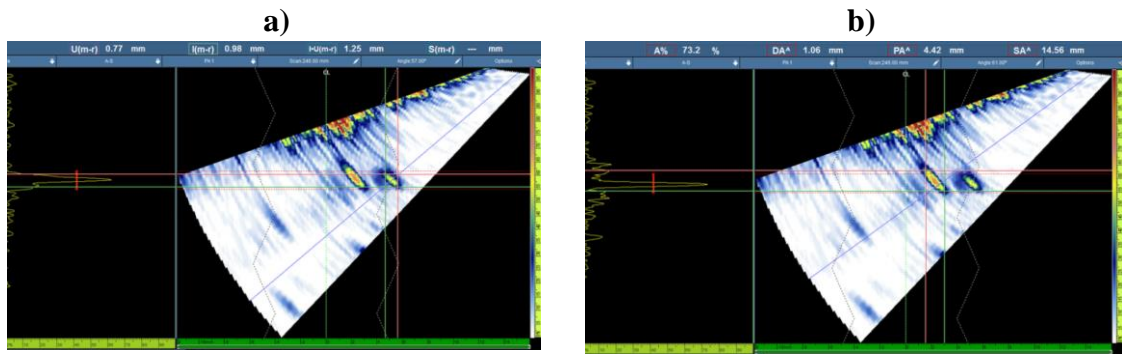


Figura 203 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 12; b) Defeito 2 da região 12.

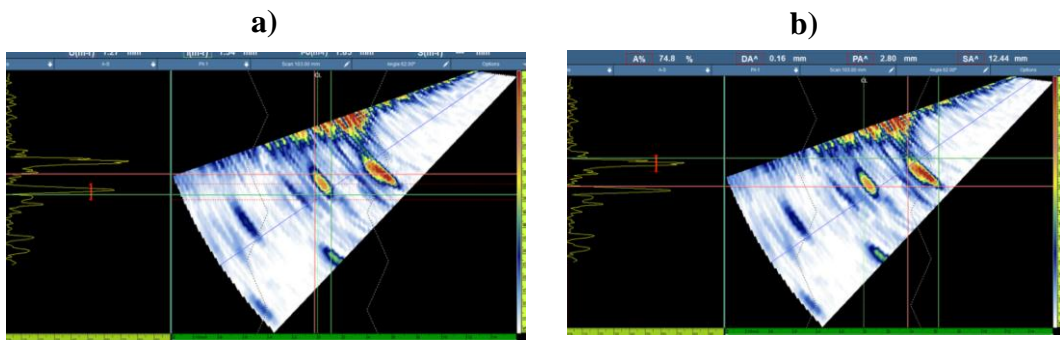


Figura 204 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 13; b) Defeito 2 da região 13.

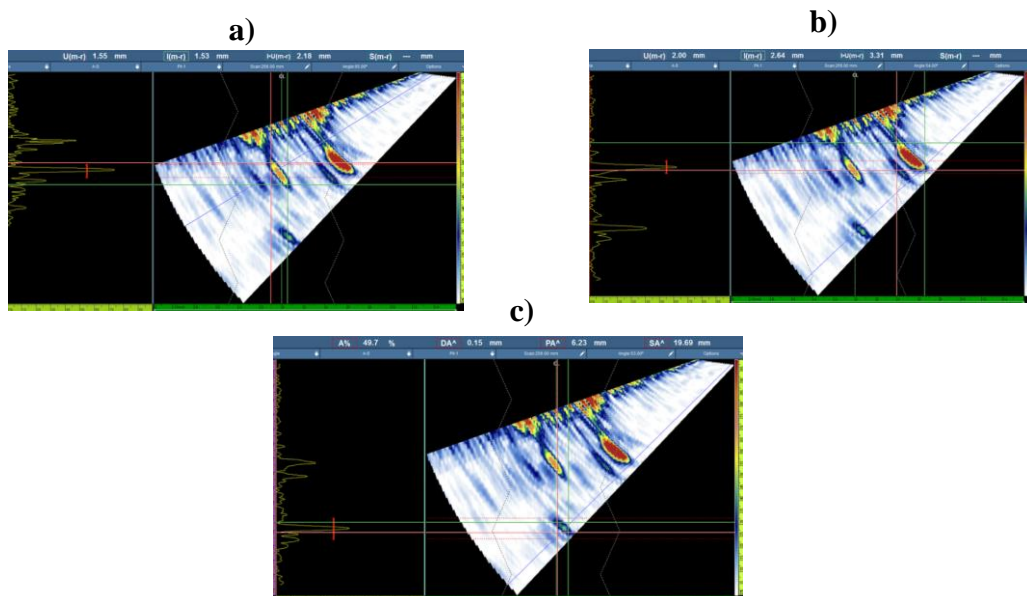


Figura 205 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 14; b) Defeito 2 da região 14; c) Defeito 3 da região 14.

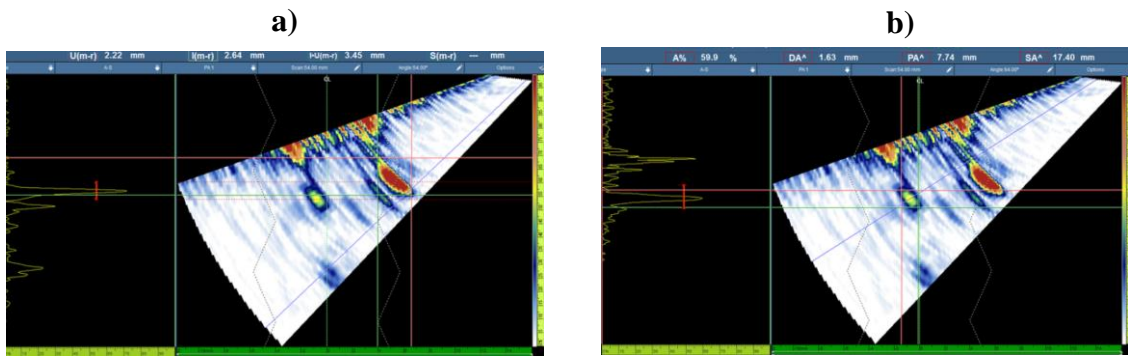


Figura 206 - Detecção de defeitos da Placa 2 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 15; b) Defeito 2 da região 15.

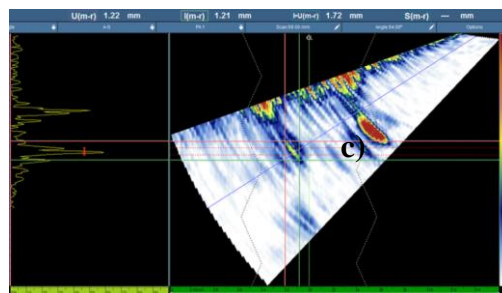


Figura 207 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 16.

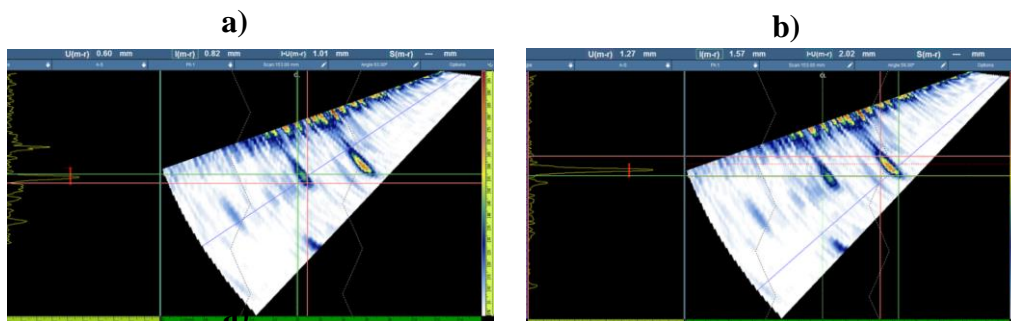


Figura 208 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 17; b) Defeito 2 da região 17.

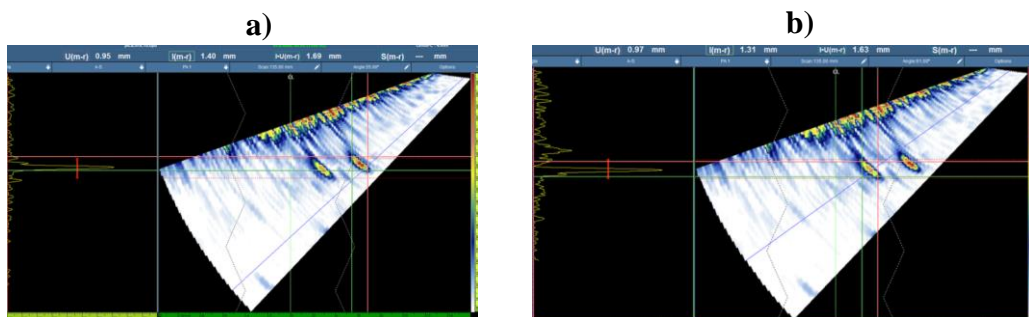


Figura 209 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 18; b) Descontinuidade 2 da região 18.

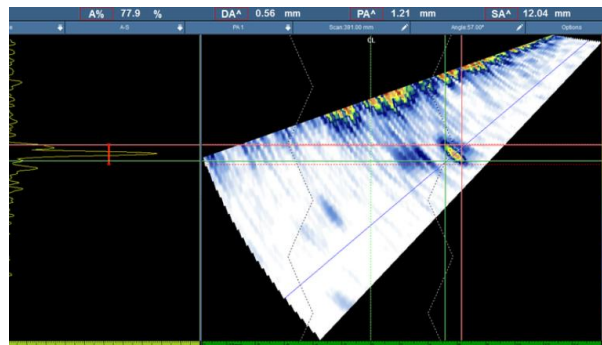


Figura 210 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 19.

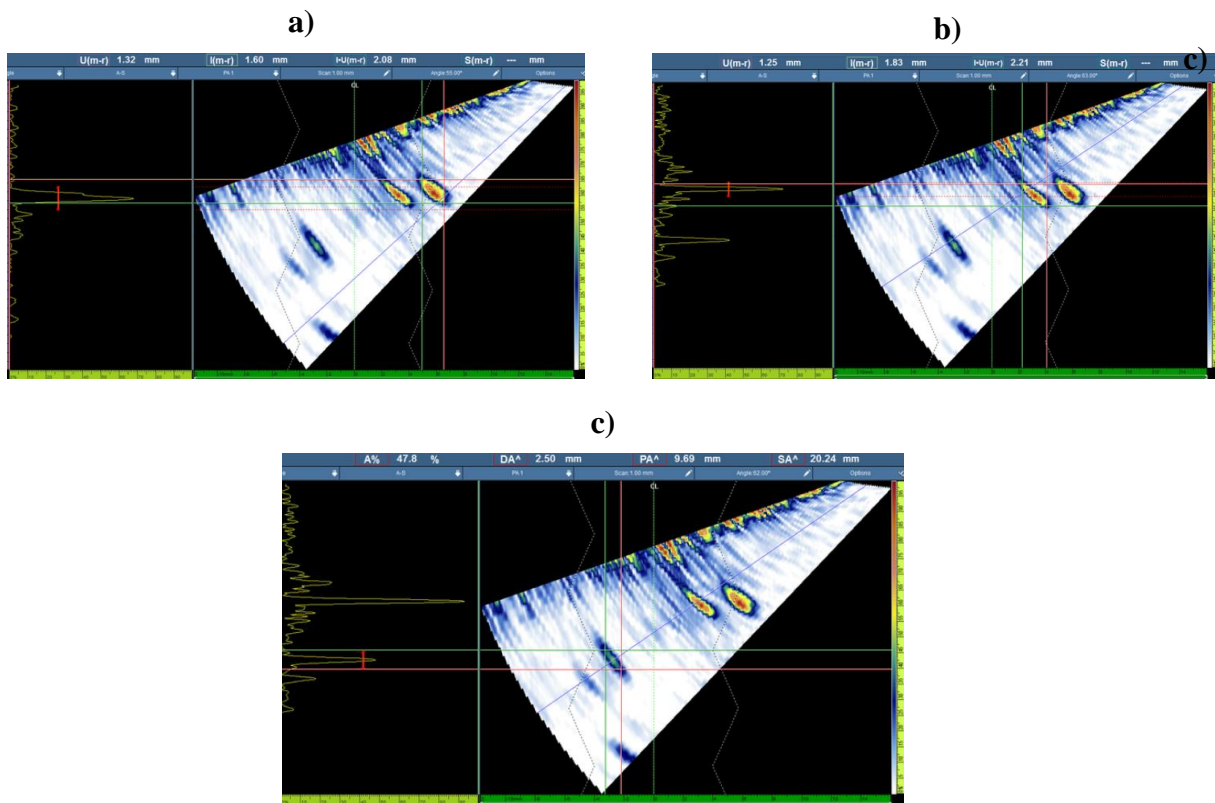


Figura 211 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 20; b) Defeito 2 da região 20; c) Defeito 3 da região 20.

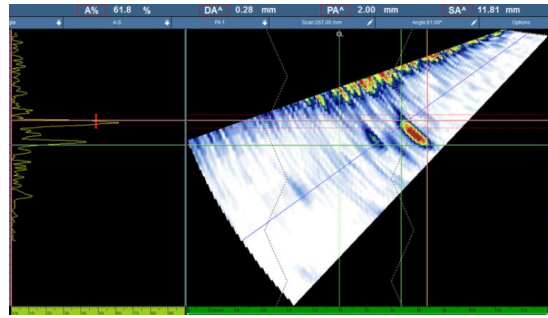


Figura 212 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. Defeito 1 da região 21.

Os defeitos detetados na região na região 21 mantiveram-se na região 22.

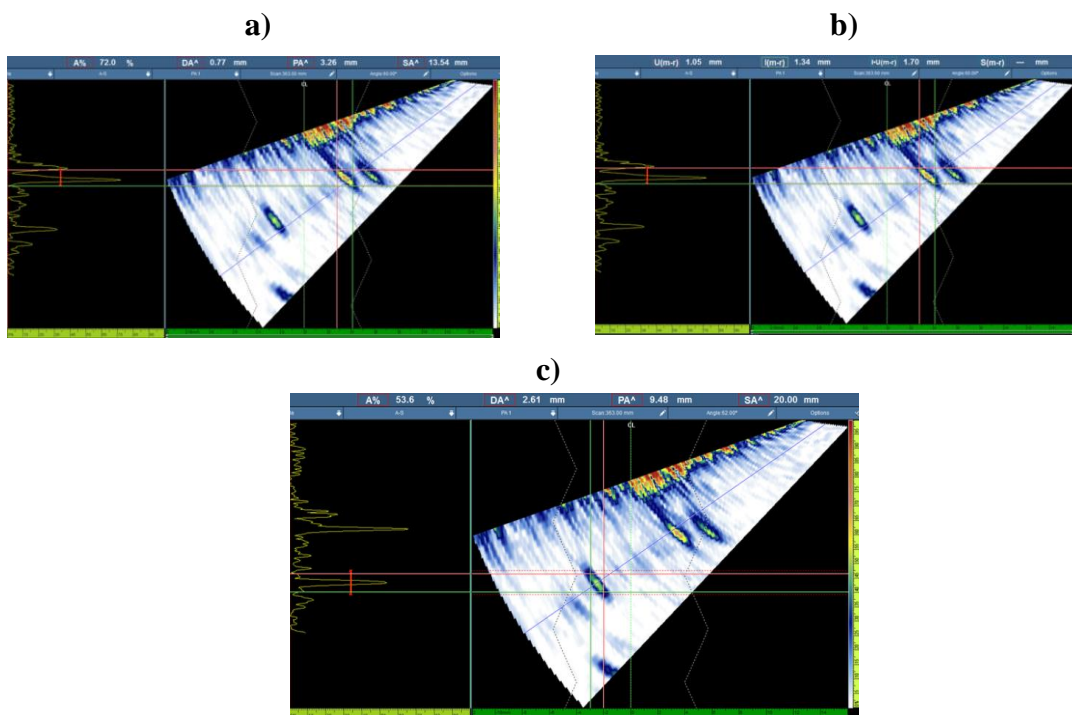


Figura 213 - Detecção de defeitos da Placa 3 pelo processo FSW. a) Defeito 1 da região 23; b) Defeito 2 da região 23; c) Defeito 3 da região 23.