



RÚBEN SÉRGIO TASNICENCO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE MICROCANAIS PRODUZIDOS POR *FRICTION STIR CHANNELING*

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

CARACTERIZAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE MICROCANAIS PRODUZIDOS POR *FRICTION STIR* *CHANNELING*

RÚBEN SÉRGIO TASNICENCO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: Miguel Araújo Machado
Professor Auxiliar Convidado, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Catarina Isabel Silva Vidal
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade NOVA de Lisboa

Doutor Miguel Araújo Machado,
Professor Auxiliar Convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022

Caracterização não destrutiva de microcanais produzidos por *Friction Stir Channeling*

Copyright © Rúben Sérgio Tasnicenco, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com diversos apoios importantes que tornaram todo o processo um pouco mais fácil e permitiram que eu continuasse o meu caminho até ao fim.

Gostava de começar por prestar um agradecimento especial ao Professor Doutor Miguel Araújo Machado, pela excelente orientação, disponibilidade, conhecimento e esclarecimento de dúvidas que me permitiram a realização desta dissertação.

À Professora Doutora Catarina Isabel Silva Vidal por todo o conhecimento fornecido sobre o *Friction Stir Channeling*.

Agradeço ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos pelo seu conhecimento e pela ajuda na componente experimental das diferentes técnicas de END.

Ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães por toda a ajuda que me deram durante a realização da parte experimental da presente dissertação.

Ao Professor Wagner Sabor pelo conhecimento transmitido no manuseamento de cada ferramenta e equipamento do laboratório de processos mecânicos de materiais.

Ao aluno de Doutoramento Pedro Ferreira por toda a ajuda no manuseamento dos diferentes equipamentos presentes no laboratório de ensaios não destrutivos.

Um obrigado a todos os meus colegas universitários que tornaram esta experiência muito mais enriquecedora e por todas memórias que me proporcionaram.

Deixo um enorme obrigado aos meus amigos que me acompanharam ao longo da dissertação e futuros Engenheiros, Daniel Damásio e Gonçalo Mota, por estarem presentes desde o primeiro dia, pelo suporte e por todas as lembranças que levarei para a vida.

Um grande obrigado aos meus amigos, Daniel Caldeira, Gonçalo Silva, Rubén Gonçalves, João Coelho, Marco Ferreira, Gonçalo Scatola, André Bento, Ângelo Gomes, Jorge Fernandes, Patrícia Rodrigues e Teresa Oliveira por todo o apoio e motivação ao longo deste percurso académico.

O mais sincero e profundo obrigado à Mónica por teres sido o meu pilar ao longo desta dissertação. Obrigado por todo o amor, confiança e paciência. Serei sempre grato pela tua presença nesta minha fase de vida.

E por fim, devo o maior obrigado à minha família. Ao meu irmão, Sergiu, por ser o meu guarda-costas e por nunca me deixar cair. E, finalmente, aos meus pais, Serghei e Violeta, por todo o sacrifício que fizeram para que eu pudesse estar no sítio onde estou hoje.

RESUMO

O *Friction Stir Channeling* (FSC) é uma tecnologia recente e inovadora de processamento no estado sólido que permite a abertura de canais internos contínuos em componentes monolíticos, podendo ser utilizado na indústria dos moldes e dos permutadores de calor.

O foco desta dissertação consiste na caracterização não destrutiva de canais de reduzidas dimensões. Pretende-se, com diferentes técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) identificar a presença dos microcanais, a sua regularidade ao longo da secção, e também a sua localização, dimensão e trajetória.

As cinco técnicas de END utilizadas são a radiologia digital, as correntes induzidas, os ultra-sons, a termografia e os líquidos penetrantes. Estas técnicas foram aplicadas a provetes com microcanais lineares e curvilíneos. Os provetes foram produzidos através de pinos com diâmetros de 2, 1 e 0.5 mm, com comprimentos de 2.25, 1.05 e 0.53 mm, respetivamente.

A radiologia digital e os ultra-sons mostraram-se eficazes na caracterização dos canais de todas as dimensões referidas. As correntes induzidas não permitiram afirmar a presença exclusiva dos canais em nenhuma dimensão. A termografia indicou a presença do canal curvilíneo de 1.5 mm com injeção de fluído. Os líquidos penetrantes permitiram afirmar a não abertura do canal à superfície.

Palavras-chave: Abertura de canais por fricção linear, Canais, Microcanais, Ensaios Não Destrutivos (END), Caracterização

ABSTRACT

Friction Stir Channeling (FSC) is a recent and innovative solid state processing technology that allows the opening of continuous internal channels in monolithic components and can be used in the mold and heat exchanger industries.

The focus of this dissertation is on the nondestructive characterization of small channels. It is intended, with different Non Destructive Testing (NDT) techniques, to identify the presence of microchannels, their regularity along the section, and also their location, size and trajectory.

The five NDT techniques used are digital radiology, eddy currents, ultrasound, thermography and liquid penetrant. These techniques were applied to specimens with linear and curvilinear microchannels. The specimens were produced using pins with diameters of 2, 1 and 0.5 mm, with lengths of 2.25, 1.05 and 0.53 mm, respectively.

Digital radiology and ultrasound were effective in detecting canals of all dimensions. Eddy currents were not able to confirm the exclusive presence of canals in any dimension. Thermography indicated the presence of a 1.5 mm curvilinear canal with fluid injection. The penetrating liquids allowed us to confirm the non-opening of the channel at the surface.

Keywords: Friction Stir Channeling (FSC), Channel, Microchannel, Non-Destructive Testing (NDT), Characterization

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE TABELAS	XIX
ABREVIATURAS.....	XXI
SÍMBOLOS.....	XXIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estado de Arte e Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da Dissertação	2
2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE.....	5
2.1 Friction Stir Channeling.....	5
2.2 Ensaaios Não Destrutivos	8
2.2.1 Radiografia	11
2.2.2 Correntes Induzidas.....	12
2.2.3 Ultra-sons.....	15
2.2.4 Termografia	18
2.2.5 Líquidos Penetrantes.....	20
3. PRODUÇÃO DE PROVETES	23
3.1 Material dos provetes.....	23

3.2	Equipamento e ferramentas utilizadas.....	24
3.3	Parâmetros definidos	25
3.4	Provetes produzidos	26
4.	DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO LABORATORIAL	29
4.1	Equipamento para ensaios de Radiologia Digital.....	29
4.2	Equipamento para ensaios de Correntes Induzidas.....	30
4.3	Equipamento para ensaios de Ultra-sons	31
4.4	Equipamento para ensaios de Termografia.....	33
4.5	Equipamento para ensaios de Líquidos penetrantes	34
5.	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	35
5.1	Resultados da Radiologia digital	35
5.2	Resultados das Correntes induzidas	39
5.3	Resultados dos Ultra-sons.....	48
5.4	Resultados da Termografia	55
5.5	Resultados dos Líquidos penetrantes.....	56
5.6	Comparação dos diferentes resultados	57
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59
6.1	Conclusões.....	59
6.2	Desenvolvimentos futuros	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	ANEXOS.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Defeito detetado na SFL, <i>wormhole</i> [5]	5
Figura 2.2 - Representação esquemática do FSC de acordo com o primeiro conceito, adaptado de [3].	6
Figura 2.3 - Secção transversal de um canal obtido por FSC de acordo com o primeiro conceito, mostrando as diferentes zonas processadas: (A e B) Zona processada; (C) Material não processado; (D) Canal; (E) Material depositado à superfície do componente processado, adaptado de [1]	6
Figura 2.4 - Exemplo da localização e dimensão de um canal	10
Figura 2.5 - Princípio de operação da técnica de correntes induzidas, adaptado de [22].	13
Figura 2.6 - Plano de impedância de correntes induzidas [23]	13
Figura 2.7 - Desvios provocados pelos defeitos nas correntes induzidas [19]	14
Figura 2.8 - Representação qualitativa da intensidade e localização das correntes induzidas produzidas por uma bobina (vista de corte) [19]	14
Figura 2.9 - Esquema das variantes passiva e ativa, adaptado de [28]	19
Figura 2.10 - Ilustração das etapas referidas [30]	21
Figura 3.1 - CNC Super Mini Mill 2 da Haas	24
Figura 3.2 - Características observadas após a realização dos ensaios	25
Figura 3.3 - Tipos de ensaios realizados	27
Figura 3.4 - Aspeto do provete	27
Figura 3.5 - Diferentes profundidades dos canais	28
Figura 3.6 - Localização da entrada da serpentina	28
Figura 4.1 - Aparato experimental do ensaio de Radiografia	30
Figura 4.2 - Suporte produzido para a realização dos ensaios (CI)	31
Figura 4.3 - Aparato experimental do ensaio de Correntes Induzidas	31
Figura 4.4 - Suportes produzidos para a realização dos ensaios (US)	32
Figura 4.5 - Aparato experimental do ensaio de Ultra-sons	32
Figura 4.6 - Condições necessárias para a realização do ensaio	33
Figura 4.7 - Aparato experimental do ensaio de Termografia	34

Figura 4.8 - Aparato experimental do ensaio de Líquidos Penetrantes.....	34
Figura 5.1 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 2$ mm).....	36
Figura 5.2 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 2$ mm).....	36
Figura 5.3 - Provetes com má formação do canal ($\varnothing = 2$ mm).....	36
Figura 5.4 - Serpentina com o pino de $\varnothing = 2$ mm.....	37
Figura 5.5 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 1$ mm).....	37
Figura 5.6 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 1$ mm).....	37
Figura 5.7 - Serpentina com o pino de $\varnothing = 1$ mm.....	38
Figura 5.8 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 0.5$ mm).....	38
Figura 5.9 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 0.5$ mm).....	38
Figura 5.10 - Serpentina com pino de $\varnothing = 0.5$ mm.....	39
Figura 5.11 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 2$ mm).....	41
Figura 5.12 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 2$ mm).....	42
Figura 5.13 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 2$ mm).....	42
Figura 5.14 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 2$ mm a 20 kHz.....	43
Figura 5.15 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 1$ mm).....	43
Figura 5.16 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 1$ mm).....	44
Figura 5.17 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 1$ mm).....	45
Figura 5.18 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 1$ mm a 20 kHz.....	45
Figura 5.19 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm).....	46
Figura 5.20 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 0.5$ mm).....	47
Figura 5.21 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 0.5$ mm).....	47
Figura 5.22 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm a 20 kHz.....	48
Figura 5.23 - Secção transversal do canal.....	49
Figura 5.24 - <i>Display</i> do equipamento de US.....	50
Figura 5.25 - Dados para o cálculo da velocidade do som.....	50
Figura 5.26 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm ($\varnothing = 2$ mm).....	52
Figura 5.27 - C-Scan das serpentinhas de $\varnothing = 2$ mm.....	53
Figura 5.28 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm ($\varnothing = 1$ mm).....	53
Figura 5.29 - C-Scan das serpentinhas de $\varnothing = 1$ mm.....	53
Figura 5.30 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm ($\varnothing = 0.5$ mm).....	54
Figura 5.31 - C-Scan das serpentinhas de $\varnothing = 0.5$ mm.....	54
Figura 5.32 - Ensaio com a serpentina de $\varnothing = 2$ mm.....	55
Figura 5.33 - Presença do líquido e revelador aplicado.....	56
Figura 5.34 - Ensaio com a serpentina de $\varnothing = 0.5$ mm.....	57
Figura A.1 - Parâmetros do pino de $\varnothing = 1$ mm.....	65

Figura A.2 - Parâmetros do pino de $\varnothing = 0.5$ mm	65
Figura A.3 - Canais lineares	66
Figura A.4 - Serpentinhas	66
Figura A.5 - Interface do software Labview	67
Figura A.6 - Desenho técnico do suporte de CI	68
Figura A.7 - Desenho técnico do suporte para o cabo de US	69
Figura A.8 - Desenho técnico do suporte para US.....	70
Figura A.9 - Interface do software SmartView	71
Figura A.10 - Gráfico obtido para a profundidade de penetração (CI)	71
Figura A.11 - Ensaio de CI a 1 kHz ($\varnothing = 2$ mm).....	72
Figura A.12 - Ensaio de CI a 5 kHz ($\varnothing = 2$ mm).....	72
Figura A.13 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 2$ mm).....	73
Figura A.14 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing = 2$ mm)	73
Figura A.15 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 2$ mm).....	74
Figura A.16 - Ensaio de CI a 5 kHz ($\varnothing = 1$ mm).....	74
Figura A.17 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 1$ mm).....	75
Figura A.18 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing = 1$ mm).....	75
Figura A.19 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 1$ mm).....	76
Figura A.20 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm).....	76
Figura A.21 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm).....	77
Figura A.22 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm).....	77
Figura A.23 - Gráfico das frequências obtidas (US).....	78
Figura A.24 - Dados para cálculo da distância à parede inferior	78
Figura A.25 - Dados para cálculo da distância à parede superior.....	79
Figura A.26 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 2$ mm.....	79
Figura A.27 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 1$ mm.....	80
Figura A.28 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 0.5$ mm.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Possível classificação dos END com base no seu princípio físico, adaptado de [19]	9
Tabela 3.1 - Composição química da liga AW1050 [31]	23
Tabela 3.2 - Propriedades físicas da liga AW1050 [31]	23
Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados para o pino de $\varnothing = 2$ mm	26
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados para as serpentinas	26
Tabela 5.1 - Valores utilizados para o cálculo das frequências (CI)	39
Tabela 5.2 - Valores obtidos para a profundidade (CI)	40
Tabela 5.3 - Frequências utilizadas nos diferentes ensaios de CI	40
Tabela 5.4 - Valores utilizados para o cálculo das frequências (US)	48
Tabela 5.5 - Valores obtidos para as frequências a serem utilizadas para cada um dos pinos	49
Tabela 5.6 - Aplicação das diferentes técnicas às características definidas	57

ABREVIATURAS

CNC	Centro de maquinagem
CI	Correntes Induzidas
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT NOVA	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa
FSC	<i>Friction Stir Channeling</i>
HFSC	<i>Hybrid Friction Stir Channeling</i>
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IV	Inspeção Visual
LP	Líquidos Penetrantes
MFSC	<i>Modified Friction Stir Channeling</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
PM	Partículas Magnéticas
RX	Raios-X
SFL	Soldadura por Fricção Linear
SSFCS	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i>
US	Ultra-sons

SÍMBOLOS

ω	Velocidade de rotação da ferramenta [rev/min]
v	Velocidade de avanço da ferramenta [mm·min ⁻¹]
h	Espessura do material de base [mm]
D_h	Diâmetro hidráulico [mm]
R	Coeficiente de reflexão do som
T	Coeficiente de transmissão do som
α	Ângulo de ataque da ferramenta [°]
P	Profundidade de penetração do pino [mm]
V_L	Velocidade de propagação de ondas longitudinais [m·s ⁻¹]
E	Modulo de Young [Pa]
ρ	Densidade do material [kg·m ⁻³]
μ	Permeabilidade magnética [H·m ⁻¹]
ν	Coeficiente de Poisson
V_T	Velocidade de propagação de ondas transversais [m·s ⁻¹]
V_S	Velocidade de propagação de ondas superficiais [m·s ⁻¹]
Z_1	Impedância acústica do meio 1 [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]
Z_2	Impedância acústica do meio 2 [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]
α_1	Ângulo de incidência/reflexão [°]
α_2	Ângulo de refração [°]
V_1	Velocidade do som no meio 1 [m·s ⁻¹]
V_2	Velocidade do som no meio 2 [m·s ⁻¹]

H_P	Campo magnético primário
H_S	Campo magnético secundário
I_x	Densidade de corrente [$A \cdot m^{-2}$]
I_0	Densidade de corrente à superfície [$A \cdot m^{-2}$]
x	Profundidade [m]
f	Frequência [s^{-1}]
σ	Condutividade elétrica [%IACS]
$\delta_{(f\mu\sigma)}$	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
C	Velocidade do som no material [$m \cdot s^{-1}$]
$l_{defeito}$	Dimensão do defeito [mm]
Δx	Distância percorrida [m]
Δt	Tempo correspondente à distância percorrida [s]
N	Campo próximo [m]
$\emptyset$	Diâmetro [mm]

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado uma introdução à tecnologia *Friction Stir Channeling* e no que consiste os Ensaio Não Destrutivos. Também serão enunciados os objetivos da dissertação bem como a metodologia utilizada e a respetiva estrutura.

1.1 Estado de Arte e Motivação

Os avanços científicos atingidos nas diferentes áreas permitem uma otimização das tecnologias existentes na área da produção, e por vezes, a criação e o desenvolvimento de novas tecnologias, como por exemplo o *Friction Stir Channeling*. Esta tecnologia surgiu com base no aproveitamento de um defeito interno que ocorre durante a Soldadura por fricção linear [1]. Em 2005, Rajiv Mishra patenteou uma nova tecnologia de processamento no estado sólido, que poderia ser utilizada para a produção de permutadores de calor, denominada de *Friction Stir Channeling* [2]. Durante o processo, se os parâmetros como a força vertical exercida, a velocidade de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço da ferramenta não forem os adequados podem surgir defeitos como imperfeições na superfície do material processado e a presença de vazios [3], [4].

A motivação para este trabalho deriva da necessidade de caracterizar microcanais produzidos por FSC bem como verificar a existência de outros possíveis defeitos. Para tal, é necessário identificar quais as técnicas de Ensaio Não Destrutivos que melhor se adequam na identificação dos defeitos de forma a auxiliar o desenvolvimento da tecnologia e proporcionar a implementação do FSC na indústria, tornando-a uma tecnologia recorrente e viável.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem em vista a contribuição para o desenvolvimento da tecnologia FSC no que toca à caracterização dos microcanais que são produzidos. Pretende-se através desta caracterização, determinar a localização dos canais, avaliar a sua regularidade ao longo da secção e verificar se existem variações de área significativas ao longo do seu comprimento. Para realizar esta caracterização, serão consideradas as técnicas de radiologia digital, correntes induzidas, ultra-sons, termografia e líquidos penetrantes. Outro objetivo passa por realizar

uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente das diferentes técnicas de END aplicadas e determinar para cada uma das técnicas a janela de parâmetros que melhor se adequa ao material onde os canais foram produzidos e a sua respetiva caracterização.

1.3 Metodologia

Para proceder à inspeção dos diferentes canais, foi necessário produzir provetes que tivessem canais lineares e curvilíneos. Foram utilizados pinos com diâmetros de 2, 1 e 0.5 mm. Com o pino de $\varnothing = 2$ mm obteve-se canais a 2.25 mm de profundidade, e para os pinos de $\varnothing = 1$ e $\varnothing = 0.5$ mm obteve-se os valores de 1.05 e 0.53 mm, respetivamente. Os parâmetros foram sendo alterados à medida que se realizava os ensaios por forma a obter canais que fossem os mais regulares possíveis contendo uma geometria bem definida.

Por forma a garantir as melhores condições dos ensaios para cada uma das técnicas de END, os provetes produzidos e os equipamentos foram devidamente preparados e também foram produzidos suportes para a inspeção dos provetes.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao estudo, referindo quais são os objetivos bem como as suas motivações.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão do estado da arte do *Friction Stir Channeling*, estando subdividido em sete secções. Inicialmente possui uma introdução, e ao longo do capítulo são incluídos os resultados da pesquisa bibliográfica, abordando a origem do FSC e os seus recentes desenvolvimentos bem como os defeitos que podem surgir, as principais técnicas de END e a sua potencial aplicabilidade ao *microchanneling*, os fundamentos das técnicas de radiografia, das correntes induzidas, dos ultra-sons, da termografia, e dos líquidos penetrantes.

No Capítulo 3 são apresentados os equipamentos, ferramentas e material utilizado na produção dos provetes e quais foram os parâmetros utilizados. Também são apresentados os resultados da produção dos provetes.

No Capítulo 4 são apresentados todos os desenvolvimentos relativos às condições necessárias para a realização dos ensaios para cada uma das técnicas de END. Também são referidos os equipamentos e os *softwares* utilizados para aquisição e tratamento dos dados obtidos.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados teóricos e os resultados obtidos experimentalmente para cada uma das técnicas de END utilizadas. Apresentam-se também uma comparação entre os resultados obtidos.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos futuros.

No final da dissertação apresenta-se um conjunto de anexos com informação adicional aos tópicos que foram abordados ao longo da dissertação.

REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada com o objetivo de caracterizar o estado de arte no domínio do *Friction Stir Channeling* e dos Ensaio Não Destrutivos potencialmente aplicáveis para a caracterização de microcanais produzidos por FSC. Sobre o FSC, são referidos a origem, os fundamentos, os possíveis defeitos e os recentes desenvolvimentos no que toca a variantes, parâmetros e dimensões dos canais. Também são expostos os fundamentos de diferentes técnicas de END bem como as suas possíveis aplicabilidades aos canais produzidos pelo FSC.

2.1 Friction Stir Channeling

O FSC é uma tecnologia de processamento no estado sólido que permite a produção de canais contínuos, fechados e estáveis num componente monolítico, através duma só passagem. Esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida com base no aproveitamento de um defeito que se pode formar durante a Soldadura por Fricção Linear (SFL). Este defeito, que é a criação de vazios (*wormhole*), ocorre quando os parâmetros do processo não são os adequados, sendo que neste caso, a pressão do shoulder nos materiais processados não é suficiente [1]. O defeito é apresentado na Figura 2.1.

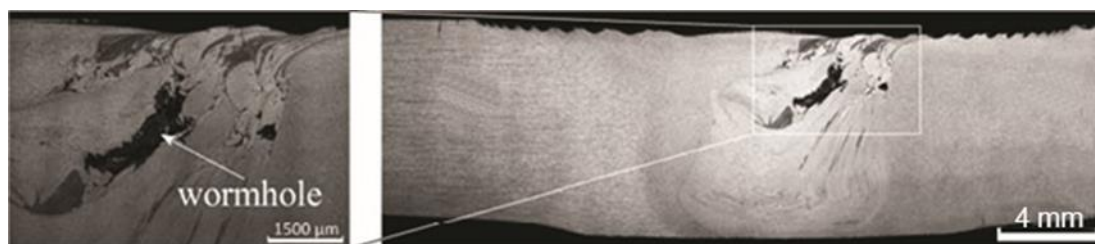


Figura 2.1 - Defeito detetado na SFL, *wormhole* [5]

Foi com base na análise deste defeito que esta tecnologia foi proposta e patenteada por Ravij Mishra, em 2005, como um método para a produção de permutadores de calor [2]. O FSC possui uma ferramenta não consumível constituída por um pino e um shoulder, onde é colocada em rotação e percorre uma trajetória linear ou curvilínea predefinida, formando o canal [3].

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema do FSC de acordo com o primeiro conceito.

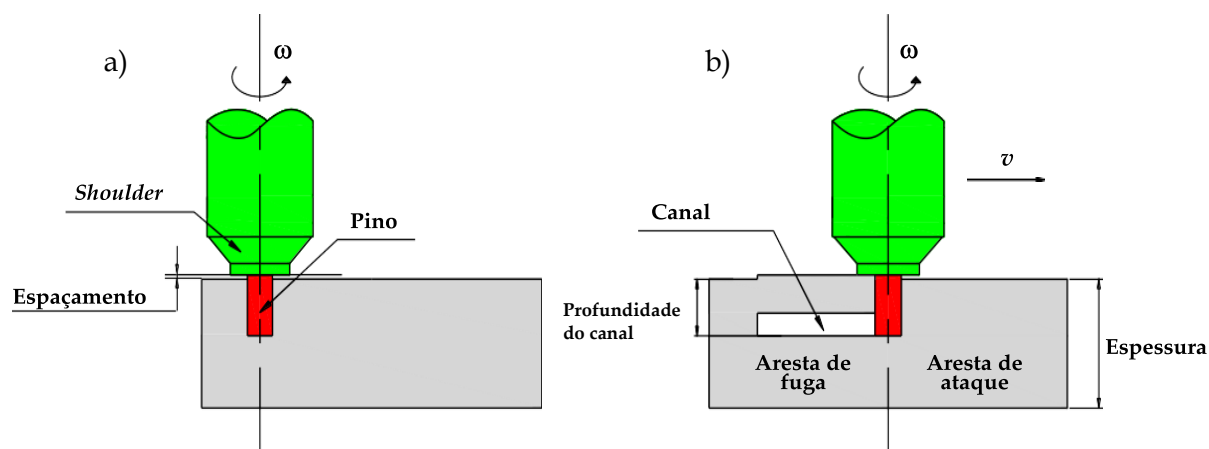


Figura 2.2 - Representação esquemática do FSC de acordo com o primeiro conceito, adaptado de [3].

a) Representação do espaçamento, b) Formação do canal e deposição à superfície

O FSC tem como base os mesmos fundamentos físicos que a SFL, sendo estes a deformação plástica, o estado viscoplástico e o atrito [3]. No FSC, para a formação do canal, é necessário que seja criado um fluxo ascendente de material num estado viscoplástico para que este seja removido da base do pino e suba em direção ao shoulder, sendo depositado no espaçamento entre o shoulder e o material a processar. A remoção deste material é possível com a utilização de uma ferramenta não consumível roscada em conjunto com um movimento de rotação do pino [1]. Na Figura 2.3 é apresentada a secção transversal de um canal obtido por FSC de acordo com o primeiro conceito.

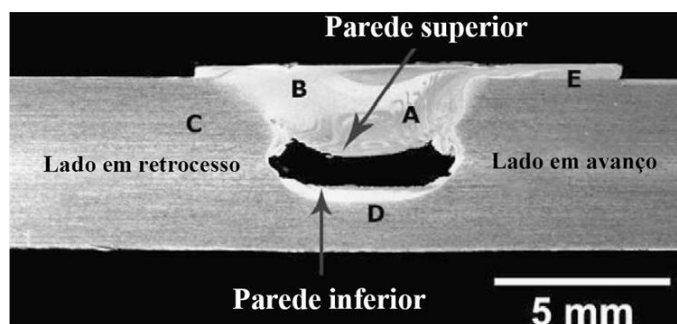


Figura 2.3 - Secção transversal de um canal obtido por FSC de acordo com o primeiro conceito, mostrando as diferentes zonas processadas: (A e B) Zona processada; (C) Material não processado; (D) Canal; (E) Material depositado à superfície do componente processado, adaptado de [1]

No final do percurso da ferramenta é formado um keyhole, resultante da remoção do pino. Como a sua formação não é desejável, uma das soluções passa por adicionar uma chapa de sacrifício fazendo com que a ferramenta termine o seu percurso fora do componente a processar. Outra solução é utilizar o keyhole formado como entrada ou saída de fluídos.

Desde a primeira variante do FSC (*Friction Stir Channeling with shoulder clearance*), apresentada em 2005, foram propostas novas variantes até à data atual, nomeadamente, *Friction Stir Channeling without shoulder clearance* [6], *Modified Friction Stir Channeling* (MFSC) [7], [8], *Hybrid Friction Stir Channeling* (HFSC) [9], e *Stationary Shoulder Friction Stir Channeling* (SSFSC) [10].

Com o desenvolvimento do FSC e o aparecimento de novas variantes foram definidos vários parâmetros que influenciam a formação do canal, sendo estes divididos em principais e secundários [3], [11].

Parâmetros principais:

- Velocidade de rotação da ferramenta, ω [rev/min];
- Velocidade de avanço da ferramenta ou da mesa de trabalho, v [mm·min⁻¹];
- Diâmetro e geometria do *shoulder*;
- Perfil de rosca do pino;
- Controlo de posição ou de força;
- Força vertical da ferramenta.

Parâmetros secundários:

- Material de base;
- Material da ferramenta;
- Sentido de rotação da ferramenta (horário ou anti-horário);
- Ângulo de ataque da ferramenta, α [°];
- Profundidade de penetração do pino, P [mm];
- Trajetória (linear ou não linear);
- Equipamento.

O aparecimento de defeitos pode ocorrer se alguns dos parâmetros referidos anteriormente não forem os adequados. Quando a velocidade de rotação da ferramenta é baixa podem ocorrer vazios na zona de material processado e na interface da zona de material processado e da zona termo-mecanicamente afetada. Também é necessário ter em atenção à intensidade da força vertical quando se utiliza velocidades de rotação mais altas para não provocar vazios nas zonas referidas. Outro exemplo, é a velocidade de avanço da ferramenta, que ao não ser a indicada pode provocar defeitos do tipo vazios. Há medida que esta velocidade aumenta, podem surgir fissuras na superfície do material. Esta tecnologia apresenta ser muito sensível à alteração de parâmetros que podem resultar na formação de defeitos [3].

Microchanneling

Nas últimas décadas, a tendência para a miniaturização da indústria, levou ao desenvolvimento de equipamentos avançados à micro e nanoescala. Atualmente, a utilização de fluídos em aplicações à microescala aumentou significativamente [12]. O aumento da necessidade de dispositivos baseados em microcanais fez com que houvesse a necessidade de desenvolver técnicas híbridas para a fabricação de microcanais de forma mais eficiente. Dependendo da aplicação dos dispositivos, certos materiais são preferíveis onde os microcanais podem ser feitos em polímeros, vidro, silício e substratos metálicos. No âmbito desta dissertação, o interesse recai sobre os substratos metálicos. Os microcanais metálicos são utilizados como dispositivos refrigerantes em diversas aplicações relacionadas com a engenharia mecânica e eletrônica. A necessidade de transferências de calor em taxas mais rápidas e a tendência para a miniaturização deste tipo de dispositivos levaram ao desenvolvimento de uma pesquisa nesta área [13]. Já foram realizados alguns estudos, nomeadamente, as transferências de calor e as características do fluxo de um fluído em microcanais [14] e também, o efeito que o diâmetro do microcanal tem nas quedas de pressões [15].

Os microcanais possuem diversas aplicações, nomeadamente, arrefecimento microeletrónico, permutadores de calor, arrefecimento de pás de turbinas a gás, sistemas de climatização e microsensores [12]. O aumento da necessidade de microcanais a nível industrial leva a que seja necessário ter uma forma de garantir que estes estejam livres de defeitos e consigam operar sem qualquer problema. Portanto, existe uma necessidade de saber que técnicas de END é que permitem caracterizar os microcanais.

2.2 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos consistem na aplicação de um conjunto de metodologias e técnicas de ensaio com o objetivo de analisar materiais, componentes ou equipamentos por forma a identificar possíveis danos estruturais que comprometam a atividade e o desempenho nas suas operações, sem prejudicar posteriormente a utilização dos produtos inspecionados [16].

Atualmente, os END são técnicas muito utilizadas a nível industrial, visto que são económicas em termos de consumo de tempo e permitem controlar o estado dos materiais e equipamentos. As técnicas podem ser aplicadas em componentes semi-acabados ou acabados e quando o tipo de técnica utilizado é o correto, permite obter informações sobre o estado do componente, indicando os tipos de defeito que tem, bem como a sua dimensão e localização [17], [18]. Têm como principais aplicações industriais [19]:

- Inspeção de material base (matéria-prima) antes de ser processado - deteção de defeitos inerentes ao material;
- Inspeção de produtos durante o seu fabrico - controlo de qualidade do processo;
- Inspeção de produtos depois de terminado o seu fabrico - controlo de qualidade do produto final - deteção de defeitos com origem no fabrico;
- Inspeção de componentes em serviço - manutenção de equipamentos - deteção de defeitos como origem no serviço;
- Caracterização de propriedades dos materiais e metrologia - medição de condutividade elétrica, velocidade do som, espessuras de revestimentos e tintas, variações estruturais e caracterização de microestruturas.

Devido às inúmeras técnicas de END, estas podem ser classificadas em função dos princípios físicos associados, nomeadamente, as ondas eletromagnéticas, as ondas acústicas, radiação eletromagnética e por absorção ou capilaridade, como é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Possível classificação dos END com base no seu princípio físico, adaptado de [19]

Princípios físicos	Principais variantes de END
Campo magnético	Partículas Magnéticas
Indução eletromagnética	Correntes Induzidas
Ondas acústicas	Ultra-sons convencionais, Ultra-sons por laser, <i>Termosonics</i> , ToFD, <i>Phased Arrays</i> , EMAT, <i>Guided Waves</i>
Radiação eletromagnética	Raios X, Raios Gama, Microondas, Termografia, Termografia <i>flash</i> por infravermelhos, Interferometria holográfica
Absorção ou Capilaridade	Líquidos Penetrantes

Do ponto de vista de aplicações industriais, as técnicas de END mais relevantes são: Inspeção Visual (IV), Líquidos Penetrantes (LP), Partículas Magnéticas (PM), Ultra-sons (US), Correntes Induzidas (CI), Radiografia e Termografia.

Aplicabilidade no *microchanneling*

Para o FSC ser uma tecnologia recorrente na indústria é necessário caracterizar os canais que são produzidos, ou seja, saber que técnicas de END podem ser aplicadas para obter bons resultados na inspeção dos canais. Antes de mais, é necessário ter em consideração o que se pretende analisar e também quais são os defeitos que se espera encontrar. Desde já, existe a

presença de um grande defeito que é o canal produzido, em que o objetivo será verificar a sua existência e avaliar a sua integridade. Quando os parâmetros utilizados não são os adequados podem surgir outros defeitos, como a presença de vazios e fissuras na superfície do material processado. De notar, que se pretende caracterizar microcanais, onde estes têm uma dimensão reduzida, sendo que se encontram numa região sub-superficial do material devido ao comprimento reduzido do pino, como é representado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Exemplo da localização e dimensão de um canal

De acordo com as técnicas de END mais relevantes a nível industrial referidas anteriormente, pretende-se perceber quais é que são potencialmente aplicáveis na caracterização de microcanais. A IV não demonstra ser aplicável para a caracterização de microcanais, visto que para verificar a regularidade do canal ao longo de toda a secção, este teria que ser seccionado. A utilização de um instrumento auxiliar também não é viável devido às dimensões dos canais. Os LP demonstram ter algum potencial na inspeção, sendo que podem ser utilizados em praticamente todo o tipo de materiais com diferentes tamanhos e geometrias, e permitem detetar defeitos superficiais, no caso da ocorrência de fissuras. No entanto, seria necessário a preparação previa da superfície do material, removendo a sua rugosidade ou a aplicação dos LP seria através dos próprios canais. As PM permitem detetar defeitos superficiais e subsuperficiais, porém só podem ser utilizados em materiais ferromagnéticos o que limita os materiais onde podem ser feitos os microcanais. A realização do ensaio também apresenta pouca aplicabilidade na caracterização dos microcanais. Os US permitem determinar a localização e dimensão de defeitos internos e requer uma geometria sem rugosidades. Esta técnica demonstra ter uma possível aplicabilidade na caracterização de microcanais, visto que pode permitir verificar a presença do canal ao longo da secção e determinar a sua localização, mas tal como nos LP, seria necessário remover a rugosidade da superfície do material. As CI permitem detetar pequenos defeitos superficiais e subsuperficiais em materiais condutores de eletricidade, sendo que não permite dimensionar os defeitos. A sua aplicabilidade aos microcanais parece ser possível para verificar a presença do canal, mas não para dimensioná-lo ao longo da secção. A radiografia permite detetar defeitos internos a diferentes profundidades através da variação da intensidade da radiação. Se a intensidade utilizada for elevada, pode permitir verificar a presença, a integridade e as dimensões do canal, visto que já existe um estudo sobre a investigação do fluxo do material e a sua implicação na formação de um canal por FSC, tendo sido utilizada uma microtomografia computadorizada

de Raios-X [20]. A termografia permite detetar defeitos através de variações na condutividade térmica por forma a criar contrastes na resposta térmica em diferentes zonas da superfície do componente. A diferença de condutividade térmica entre os defeitos (ausência de material) e o material, faz com que seja possível observar uma diferença na temperatura da superfície da amostra. Esta ausência de material pode corresponder ao local onde está presente o canal. Esta técnica apresenta potencial para caracterizar os microcanais.

De seguida serão enunciados os fundamentos, parâmetros, vantagens e limitações das técnicas que se consideraram ser aplicáveis na caracterização de microcanais.

2.2.1 Radiografia

A técnica de radiografia consiste em utilizar radiação eletromagnética de curto comprimento de onda, como os Raios X (RX) ou Raios gama, para penetrar os materiais, sendo o poder de penetração maior para comprimentos de onda mais curtos. Quando um feixe de radiação incide sobre o material, parte dela é absorvida e outra parte é transmitida, sendo que esta última varia com as mudanças de espessura e com os defeitos no material. Uma descontinuidade num material, seja um vazio, uma inclusão ou mudança de geometria, altera a espessura e a densidade, provocando diferenças no grau de absorção da radiação. Consequentemente, também causa diferenças na intensidade de radiação transmitida tornando possível a identificação dos defeitos. Estas diferenças são captadas por um filme, que é sensível à radiação incidente, capaz de produzir uma imagem para verificar a presença de defeitos. Estes defeitos aparecem no filme com uma tonalidade mais escura, visto que nessa zona a radiação foi menos absorvida pela peça [21].

Esta técnica permite detetar defeitos internos como porosidades e vazios, bem como mudanças na composição do material e na espessura. É de notar que os defeitos paralelos à direção da radiação são mais fáceis de detetar. O esquema básico da montagem desta técnica consiste em ter uma fonte de radiação, a peça a ser inspecionada, que não precisa de uma preparação prévia, e um detetor, que normalmente, é uma folha de filme fotográfico [21].

Os parâmetros da técnica de Radiografia são [19]:

- Tensão aplicada na ampola que produz os raios x;
- Corrente;
- Tempo de exposição;
- Material – tipo, espessura e densidade;
- Filme – tipo e seu processamento;
- Distância entre a fonte e o componente;

- Distância entre o componente e o filme;
- Largura da fonte (Pontual ou não);
- Tipo de radioisótopos.

Vantagens

Esta técnica é utilizada extensivamente em peças fundidas, em soldaduras e em peças forjadas quando existe a necessidade de garantir que o componente não possui defeitos internos. Permite inspecionar diferentes tipos de materiais sólidos, tanto ligas ferrosas e não ferrosas, quanto materiais não metálicos e compósitos. Também permite inspecionar a condição e montagem dos componentes, bem como a medição do nível de líquidos em componentes selados. É uma técnica indicada para a verificação de dispositivos semicondutores, para a detecção de fissuras e falhas de soldadura [21].

Limitações

A radiografia possui certas limitações para detetar certos tipos de defeitos. As fissuras só podem ser detetadas se forem paralelas ao feixe da radiação, por outro lado, as fissuras finas em secções com espessura elevada não conseguem ser detetadas, mesmo estando na orientação adequada. As descontinuidades minúsculas como inclusões em material forjado, microporosidades e microfissuras só podem ser detetadas se forem suficientemente grandes. Quando as geometrias são complexas, torna-se difícil posicionar o filme e a fonte de radiação para obter resultados na área pretendida.

É uma técnica cara e demora algum tempo quando se inspeciona secções com espessuras elevadas. A intensidade da fonte de radiação também limita a espessura que se consegue inspecionar [21].

2.2.2 Correntes Induzidas

A técnica de correntes induzidas baseia-se no fenómeno da indução eletromagnética como princípio de funcionamento. Esta técnica consiste em ter uma sonda constituída por uma bobina espiral helicoidal cilíndrica que ao ser percorrida por uma corrente elétrica alternada cria um campo magnético primário H_p . Ao ser colocado uma peça condutora na sua vizinhança, é induzida uma corrente elétrica. Esta corrente cria um campo magnético secundário, H_s , que contraria o campo primário e induz uma corrente na bobina que constitui a sonda [22]. O princípio de operação está representado na Figura 2.5.

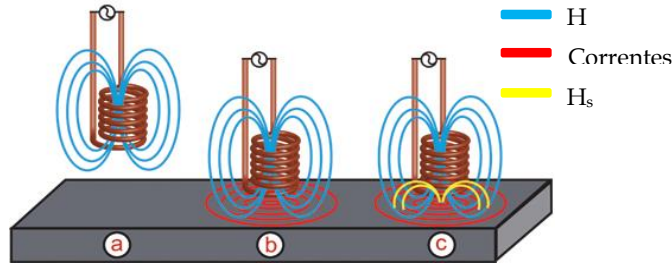


Figura 2.5 - Princípio de operação da técnica de correntes induzidas, adaptado de [22].

a) corrente alternada que flui através da bobina em uma frequência escolhida gera um campo magnético em torno da bobina; b) a bobina é colocada perto de um material condutor, induzindo uma corrente elétrica no material; c) Havendo um defeito no material, as correntes induzidas são perturbadas, diminuindo a oposição ao campo H_p , manifestando-se em termos da variação de impedância da bobina.

O campo magnético secundário perturba o campo magnético primário, causando uma variação da impedância da bobina. A redução do campo magnético primário provoca um aumento da resistência e uma alteração do valor da impedância, de acordo com a trajetória representada na Figura 2.6 [23].

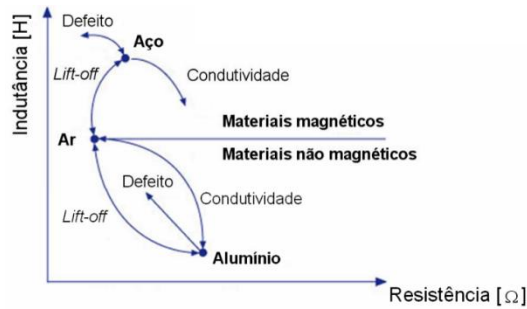


Figura 2.6 - Plano de impedância de correntes induzidas [23]

Quando existe defeitos nas peças, a trajetória das correntes induzidas é perturbada, podendo ser desviada ou limitada, dificultando o seu movimento. Consequentemente, o campo magnético secundário será menos intenso, sendo que essa alteração é detetada através de uma variação da impedância elétrica da bobina. Esta técnica aplica-se a materiais condutores de eletricidade, podendo ser ferromagnéticos ou não, sendo que só permite detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. Isto deve-se ao facto das correntes induzidas concentrarem-se à superfície do material (efeito de pele), reduzindo exponencialmente a sua densidade com o aumento da profundidade de acordo com a Eq. 2.1, em que I_x [$A \cdot m^{-2}$] é a densidade de corrente à profundidade x [m], I_0 [$A \cdot m^{-2}$] é a densidade de corrente à superfície, f [s^{-1}] é a frequência de excitação, μ [$H \cdot m^{-1}$] é a permeabilidade magnética e σ [$S \cdot m^{-1}$] é a condutividade elétrica [24].

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.1)$$

Os defeitos perpendiculares à superfície são mais fáceis de detetar do que os que estão paralelos à superfície, como representado na Figura 2.7 [19].

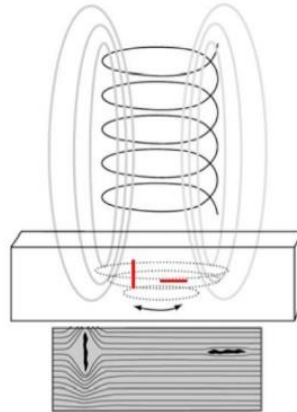


Figura 2.7 - Desvios provocados pelos defeitos nas correntes induzidas [19]

A profundidade máxima de penetração das correntes induzidas, δ [m], foi definida como a profundidade para o qual o valor da densidade de corrente (I_x) é aproximadamente igual a e^{-1} (37%) da densidade de corrente à superfície do material (I_0). Substituindo estes valores na Eq. 2.1, resulta a seguinte relação [19]:

$$\delta_{(f\mu\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.2)$$

Esta técnica apresenta algumas especificidades, nomeadamente:

- **Efeito de pele:** de acordo com a Figura 2.8, é possível observar que as correntes induzidas têm uma penetração limitada no material, permitindo apenas detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. Para este tipo de defeitos, o efeito de pele é uma vantagem porque possibilita a sua deteção com maior sensibilidade. Para detetar defeitos mais profundos é necessário utilizar frequências mais baixas, o que permite aumentar a profundidade de penetração [19], [25];



Figura 2.8 - Representação qualitativa da intensidade e localização das correntes induzidas produzidas por uma bobina (vista de corte) [19]

- **Efeito de Lift-off:** a técnica de correntes induzidas permite realizar o ensaio sem contacto físico entre a sonda e a peça, utilizando um *lift-off*, representado na

Figura 2.8. No entanto, esta alteração de posição da sonda origina uma variação significativa na amplitude do sinal que se sobrepõe às variações de sinal provenientes de defeitos. Quando isto acontece, as alterações causadas pelo defeito são absorvidas pelo ruído do *lift-off*, dificultando a detecção do defeito [17];

- **Permeabilidade magnética:** consiste na capacidade de originar um campo magnético num material sendo que quanto maior for a permeabilidade magnética, maior é a facilidade de induzir um campo magnético. Nos materiais ferrosos, a permeabilidade magnética relativa é superior a um e nos não ferrosos é aproximadamente igual a um, o que leva a que a curva de variação de impedância com os defeitos assuma trajetórias diferentes, como observado na Figura 2.6 [19];
- **Efeito de bordo:** quando a sonda se aproxima das extremidades da peça a inspecionar, ocorre uma distorção das correntes induzidas, semelhante à observada quando existe um defeito. Esta característica pode dificultar a detecção de defeitos nas extremidades do material a inspecionar [17];
- **Condutividade elétrica:** o material deve ser obrigatoriamente condutor de eletricidade.

2.2.3 Ultra-sons

A técnica de ultra-sons consiste na utilização de ondas sonoras de alta frequência, normalmente entre 1 a 15 MHz, geradas por um transdutor piezoelétrico. Estas ondas são transmitidas para o material da peça a inspecionar e ao incidir numa superfície de separação de dois meios com propriedades acústicas diferentes, como por exemplo um defeito, são refletidas. Posteriormente, a sonda recebe essas reflexões, permitindo detetar e localizar os defeitos através do tempo de percurso, da velocidade de propagação do som e do ângulo de emissão. É uma técnica aplicável a materiais metálicos e não metálicos, e que permite detetar defeitos superficiais e internos [26].

Existem quatro modos principais de propagação de ondas baseados na forma como as partículas oscilam [26]:

- Ondas longitudinais;
- Ondas transversais;
- Ondas superficiais ou de *Rayleigh*;
- Ondas de placa ou de *Lamb*.

Nas ondas longitudinais, as oscilações ocorrem numa direção paralela à propagação da onda, havendo regiões onde as partículas são comprimidas e regiões onde as partículas são tracionadas, resultante deste movimento. Estas ondas propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. A velocidade de propagação neste modo é dada pela Eq. 2.3 onde V_L [m·s⁻¹] é a velocidade de propagação de ondas longitudinais, E [Pa] é o módulo de *young*, ρ [kg·m⁻³] é a densidade do material e ν é o coeficiente de *poisson* [26].

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.3)$$

Nas ondas transversais, as partículas oscilam numa direção perpendicular à propagação da onda, sendo que os planos que contem as partículas sofrem um deslocamento lateral, não havendo zonas com diferentes densidades. Estas ondas só se propagam nos sólidos. A velocidade de propagação neste modo é dada pela Eq. 2.4 onde V_T [m·s⁻¹] é a velocidade de propagação de ondas transversais [26].

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.4)$$

As ondas superficiais são uma variante das ondas longitudinais e transversais, sendo que se propagam ao longo das interfaces sólido-gás. As partículas movem-se segundo trajetórias elípticas no sentido contrário aos dos ponteiros do relógio, com o eixo maior da elipse perpendicular à superfície do sólido. A largura da trajetória diminui à medida que a profundidade no sólido aumenta. Só permite detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. A velocidade de propagação neste modo é dada pela Eq. 2.5 onde V_S [m·s⁻¹] é a velocidade de propagação de ondas superficiais [19], [26].

$$V_S = 0.9V_T \quad (2.5)$$

As ondas de placa propagam-se em peças com espessuras finas, da ordem de alguns comprimentos de onda. Apresentam um elevado número de modos de vibração complexos que se propagam por toda a espessura do material, sendo os mais comuns, o simétrico e o anti-simétrico. A velocidade de propagação deste modo é mais complexa que dos anteriores, visto que não depende só do material que a onda atravessa, mas também da frequência, do ângulo de incidência e da espessura [19].

Relativamente ao comportamento das ondas ultra-sonoras, estas podem sofrer diferentes fenómenos consoante a forma que incidem sobre a superfície de separação de dois meios. Quando as ondas incidem sobre a superfície com ângulos retos (incidência normal),

parte da energia é refletida e outra parte é transmitida para o outro meio, sendo que a quantidade de energia ultra-sonora que é refletida ou transmitida depende das diferenças entre as impedâncias acústicas dos dois meios. Esta quantidade de energia pode ser obtida através das Eq. 2.6, 2.7 e 2.8 onde R é o coeficiente de reflexão, T é o coeficiente de transmissão, Z_2 e Z_1 são as impedâncias acústicas dos meios 2 e 1, respetivamente [26].

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.6)$$

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.7)$$

$$T = 1 - R \quad (2.8)$$

Quando um feixe sonoro incide sobre uma superfície de separação entre dois meios com impedâncias acústicas diferentes, com um ângulo diferente da normal (90°), parte da onda é refletida e parte é refratada, e além disso a onda também sofre um desdobramento, onde a onda refletida adquire novos ângulos e intensidades. Estes ângulos dependem da velocidade relativa nos respetivos meios.

A lei de Snell permite determinar a direção das ondas refletidas e refratadas, sendo expressa pela Eq. 2.9 onde α_1 [$^\circ$] é o ângulo de incidência/reflexão, α_2 [$^\circ$] é o ângulo de refração, V_1, V_2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] são as velocidades do som nos meios 1 e 2, respetivamente [26].

$$\frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.9)$$

Para a deteção de defeitos é necessário que o comprimento de onda do ultra-som seja inferior à dimensão do defeito, para que ocorra a reflexão do som no defeito. Na situação em que o defeito é menor que o comprimento de onda, haverá o fenómeno da difração, não sendo possível detetar o defeito através de eco refletido. Para identificar defeitos mais pequenos é necessário diminuir o comprimento de onda, ou seja, aumentar a frequência [19].

A técnica de ultra-sons possui diversas variantes que são bem-sucedidas na deteção e caracterização de defeitos, nomeadamente, *Creeping*, *Time of Flight Diffraction* (ToFD), *Phased Array*, *EletroMagnetic Acoustic Transducer* (EMAT), *Guided Waves*, e através de laser.

Vantagens

Esta técnica pode ser utilizada com recurso a apenas uma superfície do componente, permitindo inspecionar secções com espessuras muito elevadas. É uma técnica precisa na localização e dimensionamento de defeitos internos. Os resultados obtidos são imediatos e é

uma técnica mais barata quando comparada com outras técnicas utilizadas para detetar os mesmo tipos de defeitos [26].

Limitações

Os ultra-sons permitem penetrações muito elevadas quando se trata de aços de grão fino ou alumínio, mas em estruturas mais grosseiras como peças fundidas, especialmente de ferro fundido ou aço inoxidável, a penetração máxima é muito menor, chegando a ser inferior a 50 mm. É muito sensível ao acoplamento e é inadequado para geometrias complexas e defeitos superficiais. Esta técnica requer um operador altamente qualificado [26].

2.2.4 Termografia

As técnicas de termografia funcionam com base no fenómeno da emissão de radiação infravermelha de um corpo onde a temperatura é superior ao zero absoluto (-273.15°C). É possível obter a temperatura superficial de um corpo sabendo a sua emissividade e a banda de comprimento de onda da radiação emitida. Para a deteção dos defeitos ou das diferentes estruturas internas num componente através de uma imagem termográfica, é preciso que haja variações na condutividade térmica por forma a criar contrastes na resposta térmica em diferentes zonas da superfície do componente [27].

Nas técnicas de termografia existem dois grupos de variantes, de acordo com a fonte de energia térmica, nomeadamente, termografia passiva e termografia ativa, apresentadas na Figura 2.9. Nas variantes passivas, o componente a inspecionar está a uma temperatura diferente da do meio ambiente, sendo que aproveitam o calor resultante do processo de produção ou das condições de funcionamento do componente em serviço. Por essas razões, são utilizadas na monitorização de componentes elétricos, motores e tubagens ou na deteção de problemas de humidade em edifícios. Nas variantes ativas é necessário que o componente em estudo seja estimulado por uma fonte de energia externa para produzir um contraste térmico, sendo que essa energia pode ser fornecida sob a forma de radiação, corrente elétrica ou vibração mecânica [28].

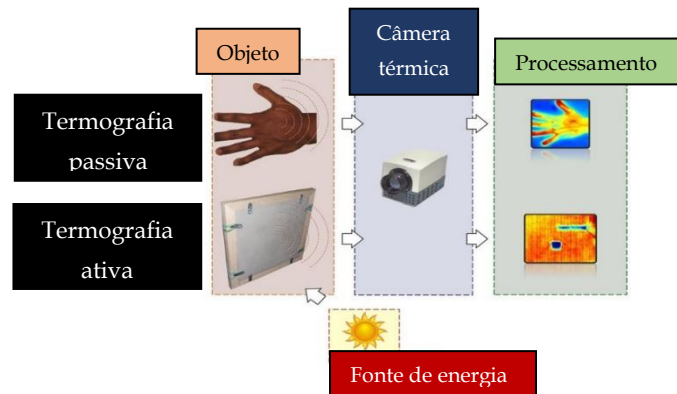


Figura 2.9 - Esquema das variantes passiva e ativa, adaptado de [28]

A diferença de condutividade térmica entre os defeitos (ausência de material) e o material, faz com que seja possível observar uma diferença na temperatura da superfície da amostra. A sua resposta térmica é analisada e gravada através de uma câmara termográfica e, posteriormente, processada utilizando um *software* de análise específico. O resultado é um conjunto de imagens térmicas que representam a emissão de calor superficial do componente em estudo, onde os contrastes gerados pela presença de defeitos internos são visualizados num computador [29].

Vantagens

Esta técnica permite uma inspeção rápida, e não necessita de estar em contacto com o componente, mas tem que estar relativamente próximo. Permite diversas aplicações e os resultados são fáceis de interpretar sendo a maioria obtida em formatos de imagem ou vídeo. Não necessita de técnicos altamente especializados quando comparada com as outras técnicas de END [28].

Limitações

A termografia apresenta algumas limitações no que toca ao custo e ao tipo de defeitos a inspecionar. O custo dos seus equipamentos é elevado quando comparado com algumas técnicas de END. As perdas térmicas por convecção e por radiação de calor podem gerar falsos contrastes prejudicando a interpretação de resultados. Só tem a capacidade de detetar defeitos que resultem numa mudança mensurável das propriedades térmicas da superfície inspecionada e apenas consegue inspecionar uma espessura limitada de material. As variações de emissividade ou materiais de baixa emissividade refletem as radiações térmicas do ambiente dificultando a inspeção [28].

2.2.5 Líquidos Penetrantes

A técnica de inspeção de END por LP é um método utilizado para a detecção de defeitos superficiais em materiais sólidos não porosos ou com pouca rugosidade. É uma técnica que pode ser utilizada em materiais magnéticos e, também, em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio. Também pode ser utilizada em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos [30].

O método consiste na utilização de um líquido penetrante que é aplicado sobre a superfície, previamente limpa, do componente a inspecionar, e que por capilaridade preenche os defeitos existentes à superfície [19]. O líquido penetrante permanece algum tempo à superfície até ser removido o excesso. Após a remoção do excesso de líquido à superfície, é aplicado um produto absorvente, o revelador, que aumenta a visibilidade do defeito [30].

Um líquido penetrante deve ter as seguintes características [19], [30]:

- Capilaridade/molhabilidade;
- Coloração, permitindo visualizar o defeito;
- Viscosidade mínima de 5 centistokes, para que o líquido penetrante consiga entrar nos defeitos;
- Baixa volatilidade e toxicidade, por forma a não evaporar nem a ter efeitos secundários sobre o operador;
- Ponto de inflamação mínimo de 55 °C, para estar do lado da segurança;
- Estabilidade térmica para não haver perda de brilho e cor;
- Inércia química para que o líquido penetrante não reaja quimicamente com o componente a inspecionar;
- Facilidade de remoção do excesso, mantendo o líquido penetrante no defeito.

Os LP devem apresentar quatro propriedades principais, nomeadamente, a capilaridade, a molhabilidade, a viscosidade e a coloração. A capilaridade é a capacidade que os líquidos têm para subir espontaneamente no interior de um espaço estreito. A molhabilidade é a propriedade que um líquido tem de se espalhar por toda a superfície, não se juntando em porções ou gotas, sendo esta maior quanto menor for o ângulo de contacto do líquido com a superfície sólida. A viscosidade é a medida de atrito interno do fluido devido às interações moleculares, refletindo-se numa resistência que o fluido oferece à deformação por cisalhamento. Quanto maior a viscosidade, maior é o esforço de remoção devido à aderência do líquido à superfície, por outro lado, quanto menor a viscosidade, maior a probabilidade de não conseguir entrar nos defeitos [19], [30].

O líquido penetrante deve ser escolhido de acordo com a sua sensibilidade (aptidão que o penetrante tem para revelar descontinuidades pequenas e estreitas) e deve-se também ter em conta a qualidade superficial do componente a analisar, bem como a morfologia e dimensão dos defeitos. Devem-se conjugar as condições anteriores, de forma a encontrar o líquido penetrante que melhor se adequa e que possua o menor custo associado [19].

O método dos LP é constituído por seis etapas principais, apresentadas na Figura 2.10 [30]:

1) **Preparação da superfície** – a superfície do componente a inspecionar deve ser limpa e seca, removendo todas as impurezas e sujidades para que estas não perturbem os resultados do ensaio.

2) **Aplicação do penetrante** – Consiste na aplicação de um LP, para que este forme um filme sobre a superfície que se pretende inspecionar e que por ação da capilaridade, o LP penetra nas descontinuidades existentes. Deve ser dado algum tempo para que o LP penetre completamente.

3) **Remoção do excesso de penetrante** – Após o tempo de deposição (entre 5 e 30 min), procede-se à remoção do líquido penetrante que se encontra em excesso na superfície do componente, através de produtos adequados concordantes com o tipo de líquido penetrante aplicado. A superfície do componente deve ficar livre de qualquer resíduo.

4) **Aplicação de um revelador** – Consiste na aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície. O revelador absorve o líquido penetrante das descontinuidades, revelando a posição dos defeitos. Deve ser previsto um tempo de revelação (entre 7 min e 2 horas, dependendo do tamanho do defeito) para que o ensaio tenha sucesso.

5) **Avaliação e inspeção** – Após a deteção dos defeitos, é feita uma análise, sob as devidas condições, para verificar se os defeitos são prejudiciais para o funcionamento do componente.

6) **Limpeza final** – Consiste na limpeza de todos os resíduos e produtos utilizados durante o ensaio, visto que estes podem ser prejudiciais numa futura utilização do componente.

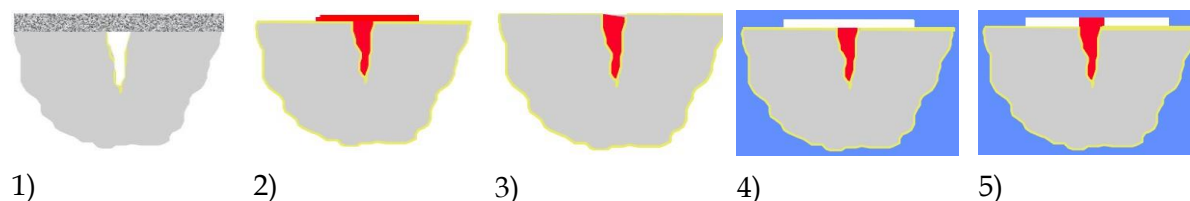


Figura 2.10 - Ilustração das etapas referidas [30]

Vantagens

A principal vantagem desta técnica é a sua simplicidade e facilidade de interpretação dos resultados. Não necessita de técnicos altamente especializados, mas deve-se ter em atenção os cuidados básicos a realizar (limpeza, tempo de penetração). Não há limitação para o tamanho, forma e tipo de material dos componentes a inspecionar. Por outro lado, os componentes devem ser suscetíveis à limpeza e a sua superfície não pode ser rugosa ou porosa. A técnica permite revelar descontinuidades superficiais muito pequenas (da ordem de 0.001 mm) [30].

Limitações

Apenas deteta descontinuidades abertas para a superfície, visto que o penetrante tem de entrar na descontinuidade para ser posteriormente revelado. A superfície do material não pode ser porosa ou absorvente por forma a que seja possível remover na totalidade o excesso de líquido penetrante. A aplicação do líquido penetrante deve ser feita num determinado intervalo de temperatura (entre 5 °C e 52 °C). Algumas aplicações dos componentes em inspeção fazem com que a limpeza tenha de ser o mais completa possível após o ensaio. Quando esta limpeza for difícil de realizar, a inspeção sofre limitações [30].

PRODUÇÃO DE PROVETES

Para ser possível aplicar as técnicas de END referidas no capítulo anterior, foi necessário proceder à produção dos provetes com os respetivos defeitos, sendo neste caso, a presença dos canais. Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para a produção dos provetes para posterior inspeção através das várias técnicas de END. Também são apresentados o material escolhido para os provetes, os equipamentos e ferramentas utilizadas bem como os parâmetros estabelecidos para os ensaios.

3.1 Material dos provetes

A tecnologia do FSC é utilizada na produção de dispositivos de trocas de calor. Assim sendo, remete para um material com alta condutividade térmica e que permita obter um componente com as propriedades mecânicas pretendidas para o seu funcionamento. Além disso, se o material apresentar uma resistência mecânica muito elevada, pode dificultar o seu processamento e consequentemente provocar desgaste ou a quebra da ferramenta.

Posto isto, o material escolhido para a produção dos provetes foi a liga de alumínio AW1050. Esta liga possui características como baixa resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica [31]. Na Tabela 3.1 é apresentada a composição química do material.

Tabela 3.1 - Composição química da liga AW1050 [31]

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Min [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	99.5
Max [%]	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	0.07	0.05	-

As propriedades físicas do material são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades físicas da liga AW1050 [31]

Densidade	2700 kg.m ⁻³
Módulo de elasticidade	69 GPa
Coefficiente de dilatação linear	23.5 · 10 ⁻⁶

Condutividade térmica	229 W.(mK) ⁻¹
Difusividade térmica	9.208 · 10 ⁻⁵ m ² .s ⁻¹
Condutividade elétrica	59.45 %IACS

Foram utilizadas chapas com 200×100×5 mm. Este material demonstrou ter as características pretendidas, especialmente na facilidade do seu processamento, permitindo realizar a produção dos provetes.

3.2 Equipamento e ferramentas utilizadas

Para a realização dos ensaios do FSC foi utilizado o centro de maquinagem CNC Super Mini Mill 2 da Haas, apresentado na Figura 3.1. Este equipamento realiza movimentos nas direções x,y e z, sendo todos eles controlados de forma manual ou automatizada através da região destacada na Figura 3.1.



Figura 3.1 - CNC Super Mini Mill 2 da Haas

O controlo manual permite controlar a posição da ferramenta bem como a posição da mesa onde está situada a chapa. O controlo automatizado é feito através de código G, permitindo definir os parâmetros de cada ensaio e a trajetória da ferramenta.

O suporte para a ferramenta é fixado ao equipamento por vácuo e a ferramenta é colocada por meio de uma rosca. A chapa foi fixada a um substrato metálico por meio de ligações aparafusadas. Foram utilizados pinos com diferentes diâmetros, nomeadamente de 2, 1 e 0.5 mm para a produção dos canais. Estes diferentes pinos foram produzidos no âmbito do doutoramento de Wagner Sabor.

O funcionamento do centro da maquinagem e a respetiva produção dos canais é apresentada no seguinte [vídeo](#).

3.3 Parâmetros definidos

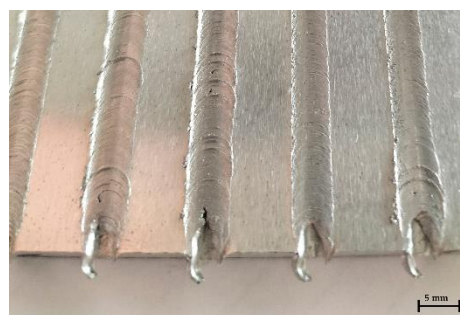
Foram realizados dois tipos de ensaios, lineares e curvilíneos, também denominados como serpentinas. Para a realização dos ensaios estabeleceu-se um conjunto de parâmetros que foram sendo alterados ou fixados consoante os resultados obtidos. Foram definidos os seguintes parâmetros:

- Comprimento do pino [mm];
- Velocidade de avanço [mm.min⁻¹];
- Velocidade de rotação [min⁻¹];
- Espaçamento [mm];
- Rampa de aceleração [mm.min⁻¹];
- Avanço para cada velocidade de rampa [mm].

Estes parâmetros foram controlados através do código G, antes da realização de cada ensaio. A definição dos parâmetros consistia no seguinte método, cada chapa utilizada era definida como uma série constituída por um determinado número de ensaios com uma determinada conjugação dos parâmetros referidos. Após a finalização de cada chapa, verificava-se quais os melhores resultados através da rugosidade superficial, da geometria do canal e da existência de fissuras superficiais, como é visível na Figura 3.2. Posteriormente, eram definidos quais os parâmetros a alterar e quais a fixar. No caso das serpentinas, apenas foram aplicados os parâmetros que permitiram obter os melhores resultados. Estes ensaios foram realizados para as três dimensões dos pinos.



a)



b)

Figura 3.2 - Características observadas após a realização dos ensaios
a) Geometria do canal; b) Rugosidade superficial

Na Tabela 3.3 é demonstrado como exemplo os parâmetros utilizados para o pino de $\varnothing = 2$ mm. Os parâmetros utilizados para os pinos de $\varnothing = 1$ e $\varnothing = 0.5$ mm encontram-se nos Anexos A.1 e A.2, respetivamente.

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados para o pino de Ø = 2 mm

Série	Ferramenta	Ensaio	Comprimento do pino [mm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Velocidade de rotação [min ⁻¹]	Espaçamento [mm]	Tempo [s]	Rampa de aceleração [mm/min]	Avanço para cada velocidade da rampa [mm]
A	MC2.0	2	2,25	180	2440	0,06	3	25-60-110-150-180	1
		3		180	2440	0,07		25-60-110-150-180	
		4		180	2440	0,08		25-60-110-150-180	
		5		180	1800	0,06		25-60-110-150-180	
		6		180	3000	0,06		25-60-110-150-180	
		7		180	3500	0,06		25-60-110-150-180	
		8		180	4000	0,06		25-60-110-150-180	
		9		145	3000	0,06		25-60-90-120-145	
		10		125	3000	0,06		25-60-95-125	
		11		100	3000	0,06		25-50-75-100	
		12		75	3000	0,06		19-38-60-75	
B	MC2.0	1	2,25	50	3000	0,06	3	10-25-40-50	1
		2		160	3000			25-60-90-130-160	
		3		50	2750			10-25-40-50	
		4		75	2750			19-38-60-75	
		5		100	2750			25-50-75-100	
		6		125	2750			25-60-95-125	
		7		145	2750			25-60-90-120-145	
		8		160	2750			25-60-90-130-160	
		9		180	2750			25-60-110-150-180	
		10		220	2750			25-60-110-170-220	
C	MC2.0	1	2,25	75	2100	0,06	3	19-38-60-75	1
		2		100	2100			25-50-75-100	
		3		145	2100			25-60-90-120-145	
		4		160	2100			25-60-90-130-160	
		5		180	2100			25-60-110-150-180	
		6		75	1800			19-38-60-75	
		7		100	1800			25-50-75-100	
		8		145	1800			25-60-90-120-145	
		9		160	1800			25-60-90-120-140-160	
		10		180	1800			25-60-110-150-180	
		11		180	1800			25-60-110-150-180	
		12		160	2100			25-60-90-120-140-160	

Tal como referido anteriormente, nos ensaios das serpentinas foram utilizados os melhores parâmetros dos ensaios lineares para cada pino, apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados para as serpentinas

Série	Ferramenta	Ensaio	Comprimento do pino [mm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Velocidade de rotação [min ⁻¹]	Espaçamento [mm]	Tempo [s]	Rampa de aceleração [mm/min]	Avanço para cada velocidade da rampa [mm]
I	MC2.0	11	2,25	180	1800	0,06	3	25-60-110-150-180	1,0
		12		160	2100			25-60-90-120-140-160	
J	MC1.0	1	1,05	75	3200	0,03	3	19-38-60-75	0,5
		2		160	3200			25-60-90-120-140-160	
		3		145	2000			25-60-90-120-145	
		4		180	2800			25-60-90-130-160-180	
K	MC0.5	1	0,53	40	4000	0,02	3	5-10-20-30-40	0,5
		2		145	7000			5-15-30-60-120-145	
		3		145	4000			5-15-30-60-120-145	
		4		80	7000			5-10-25-40-60-80	
		5		100	5500			5-15-30-55-80-100	
		6		120	5500			5-15-30-50-70-90-120	
		7		120	7000			5-15-30-50-70-90-120	
		8		20	8500			5-10-15-20	

3.4 Provetes produzidos

Para colocar os provetes nas devidas condições para serem aplicados os ensaios das diferentes técnicas de END, foi necessário proceder ao corte e acabamento superficial das chapas obtidas. Como referido em § 3.3, foram realizados dois tipos de ensaios, os lineares e as serpentinas, sendo estes apresentados nas Figuras 3.3a) e 3.3b), respetivamente.

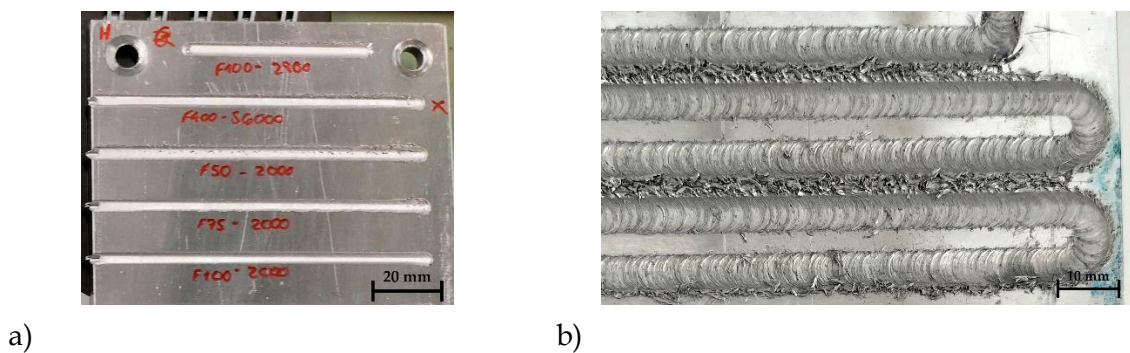


Figura 3.3 - Tipos de ensaios realizados
a) Lineares; b) Serpentinhas

No final do ensaio, a região onde o material foi processado possui uma rugosidade superficial, como é possível observar na Figura 3.4a). De forma a ser possível aplicar as diferentes técnicas de END, a superfície das chapas não pode conter rugosidades superficiais. Este procedimento foi realizado através da utilização de lixas com grão cada vez mais refinado até obter o resultado pretendido, como é apresentado na Figura 3.4b). Foi, também realizado o seccionamento da chapa em pequenos provetes para facilitar a inspeção dos diferentes canais obtidos.

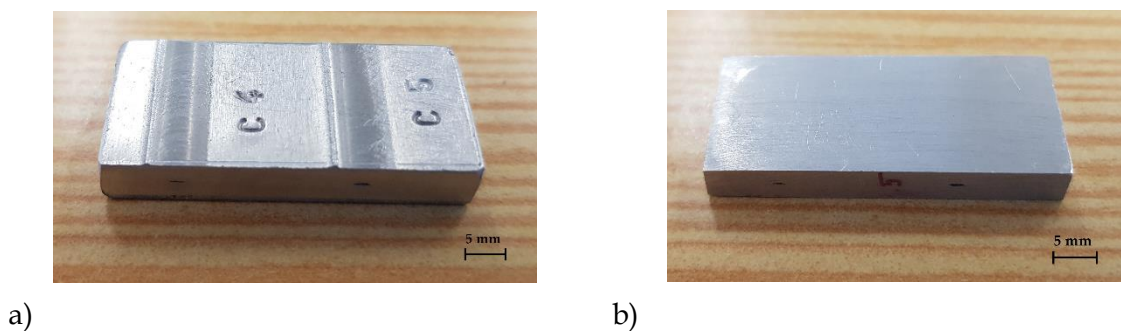
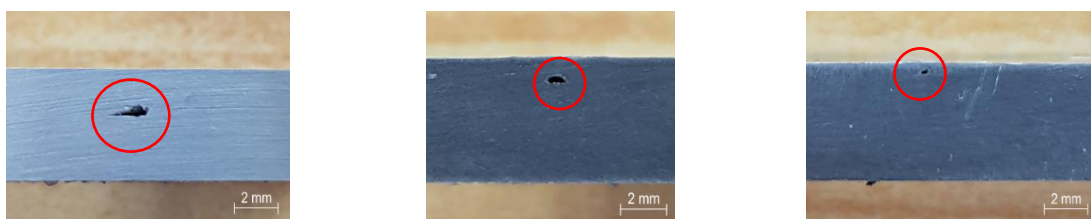


Figura 3.4 - Aspeto do provete
a) Com rugosidade superficial; b) Sem rugosidade superficial

Após aplicar estes dois procedimentos, encontram-se nos Anexos A.3 e A.4, exemplos de resultados obtidos para canais lineares e para serpentinhas, respetivamente.

Os canais dos provetes produzidos possuem diferentes profundidades consoante o pino que foi utilizado, tal como é apresentado em § 3.3, no parâmetro comprimento do pino. Quando o pino utilizado é o de $\varnothing = 2$ mm, a distância do base do canal à superfície é de 2.25 mm, para o pino de $\varnothing = 1$ mm essa distância é de 1.05 mm e para o pino de $\varnothing = 0.5$ mm é de 0.53 mm. Na Figura 3.5 é destacado a localização dos canais para cada um dos pinos utilizados.



a)

b)

c)

Figura 3.5 - Diferentes profundidades dos canais

a) Pino de $\varnothing = 2$ mm; b) Pino de $\varnothing = 1$ mm; c) Pino de $\varnothing = 0.5$ mm

No caso das serpentinas, após ser feito o furo de entrada e saída, foi necessário proceder à abertura dos canais, destacado na Figura 3.6, de forma a permitir a execução de algumas das técnicas de END. Esta abertura foi realizada com o auxílio de um "gancho" de aço que tinha um diâmetro de pequena dimensão.



Figura 3.6 - Localização da entrada da serpentina

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO LABORATORIAL

Neste capítulo é referido o desenvolvimento laboratorial necessário para inspecionar a presença dos microcanais nos provetes apresentados no capítulo anterior. Foram utilizadas cinco técnicas de END: radiologia digital, correntes induzidas, ultra-sons, termografia e líquidos penetrantes. São apresentados os equipamentos e as condições utilizadas para cada uma das técnicas referidas bem como as sondas utilizadas e os suportes produzidos para a realização dos ensaios.

4.1 Equipamento para ensaios de Radiologia Digital

Para aplicar a técnica de radiologia digital, foi utilizado um equipamento disponível no laboratório de caracterização de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) presente na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA). Este equipamento é constituído por um sistema de radiografia digital KODAK RVG 5100 e por uma unidade KODAK 2100 RX. Esta unidade é capaz de produzir raios-x de alta frequência com uma tensão de 60 kV funcionando a 7 mA com um colimador [32]. A área do sensor ativa é de 22×30 mm e o tempo máximo de integração é de 620 ms.

Para a realização deste ensaio, foi necessário garantir que a superfície dos provetes inspecionados não tinha rugosidades superficiais, como foi referido em § 3.4, de forma a produzir os melhores resultados. Como este ensaio envolve radiação, é necessário haver uma caixa de chumbo na região onde a radiação é emitida por forma a garantir a segurança na sua realização. Além disso, foi utilizado um computador para fazer a observação e tratamento dos dados obtidos.

O aparato experimental do ensaio é apresentado na Figura 4.1.

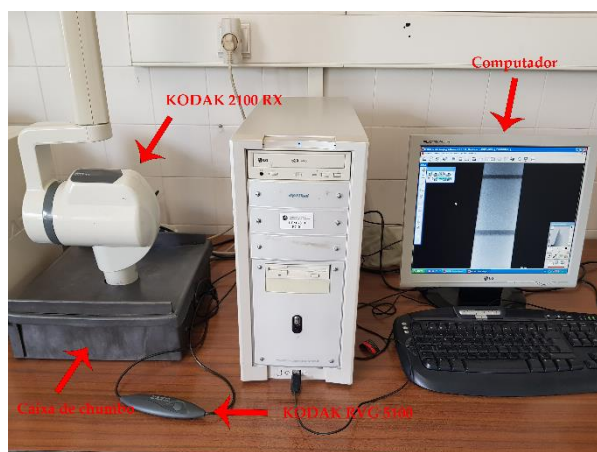


Figura 4.1 - Aparato experimental do ensaio de Radiografia

4.2 Equipamento para ensaios de Correntes Induzidas

Para realizar a inspeção dos provetes foram utilizadas duas sondas de superfície de eixo reto comercializadas pela *Olympus*, com diâmetro de 3,17 mm, sendo que funcionam em diferentes gamas de frequências. As diferentes gamas são entre 100 e 500 kHz e 50 e 100 kHz.

O equipamento de medição utilizado foi o *Nortec 600* comercializado pela *Olympus* [33]. Este equipamento permite a leitura da impedância das sondas, sendo capaz de funcionar numa gama de frequências entre os 10 Hz e os 12 MHz. O ganho é ajustável, variando entre os 0 dB e os 100 dB com incrementos de 0,1 dB ou 1dB. Também permite o controlo do ângulo, onde este varia entre 0° e 359,9° com incrementos de 0,1° ou 1°.

Para realizar os ensaios desta técnica foi utilizada uma mesa XY desenvolvida pela NOVA NDT Lab., que permite automatizar o processo de inspeção dos provetes. Esta mesa possui um curso útil de 50×50 mm onde o seu movimento é controlado através de código G, permitindo efetuar um varrimento ao longo da área do provete. Por outro lado, a sonda permanece sempre na mesma posição. O movimento da mesa e a aquisição dos dados é feito através de um programa criado no *software LabView*, sendo que a sua interface se encontra no Anexo A.5. O funcionamento deste sistema consiste no equipamento enviar os dados para uma placa DAQ-6008 da *National Instruments* [34], onde são recebidos. Por sua vez, os dados recebidos são enviados para o programa do *LabView* onde são processados. No final, esses dados são apresentados, permitindo o seu armazenamento para posterior utilização. Esta mesa e consequentemente o programa elaborado no *software*, permite a automatização dos ensaios devido à possibilidade que oferece em criar uma interface onde estão localizados os controlos necessários para realizar os diferentes ensaios com o equipamento, permitindo definir os parâmetros em cada ensaio, controlar a área a inspecionar e a resolução do deslocamento dessa área.

Para fixar as sondas à mesa e garantir que estão sempre na mesma posição ao longo de todo o ensaio, foi necessário produzir um suporte. Este suporte foi modelado no *SolidWorks* e produzido através de impressão 3D, como é observado na Figura 4.2. No Anexo A.6 encontra-se o desenho técnico do suporte.

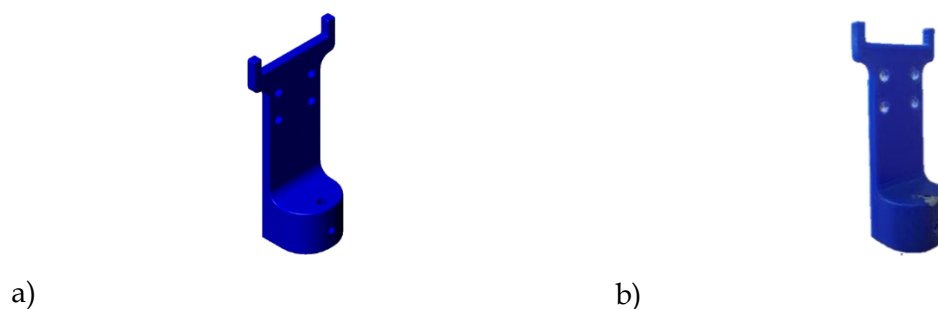


Figura 4.2 - Suporte produzido para a realização dos ensaios (CI)
a) Modelação *SolidWorks*; b) Suporte impresso em 3D

Tal como na técnica referida em § 4.1, a superfície dos provetes a inspecionar não deve conter qualquer rugosidade, por forma a obter os melhores resultados. O aparato experimental do ensaio é apresentado na Figura 4.3.

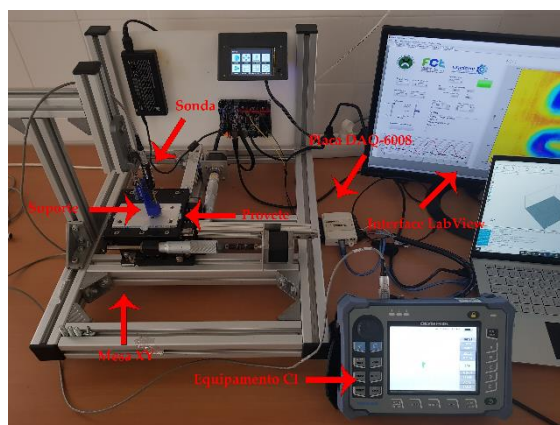


Figura 4.3 - Aparato experimental do ensaio de Correntes Induzidas

4.3 Equipamento para ensaios de Ultra-sons

Para realizar a inspeção dos provetes foram utilizadas duas sondas comerciais da *Olympus*. Ambas possuem uma frequência de 10 MHz, sendo a diferença as suas dimensões, onde uma possui um diâmetro de 10 mm e outra um diâmetro de 3.18 mm. O equipamento de medição utilizado foi o *krautkramer USM 36*. Este equipamento permite a leitura do tempo ou o espaço percorrido das ondas sonoras em função do ganho, que é ajustado pelo utilizador. É capaz de funcionar numa gama de frequências entre 1 e 15 MHz [35]. Esta técnica foi utilizada de duas formas distintas, sendo uma a inspeção por contacto e outra a inspeção por imersão.

O objetivo da utilização da variante por contacto foi determinar a velocidade de som no material e localizar o canal ao longo da espessura do provete. Para a realização do ensaio foi necessário garantir que a superfície e a base do provete não tivessem rugosidades. O líquido acoplante utilizado foi a vaselina.

Na variante por imersão o objetivo foi detetar a presença do canal nos provetes inspecionados. Para a realização do ensaio foi necessário garantir que a superfície do provete não tivesse rugosidades. O líquido acoplante utilizado foi a água. Os ensaios desta variante foram realizados utilizando a mesa XY, explicada em § 4.2, sendo que as diferenças estão relacionadas com o equipamento e os suportes utilizados para as sondas. Foi utilizado o mesmo programa do *software LabView* para a análise e armazenamento dos dados obtidos. Para fixar as sondas à mesa e garantir que estão sempre na mesma posição ao longo de todo o ensaio, foi necessário produzir dois novos suportes. Estes suportes foram modelados no *SolidWorks* e produzidos através de impressão 3D, como é observado na Figura 4.4. Nos Anexos A.7 e A.8 encontra-se os desenhos técnicos dos suportes.

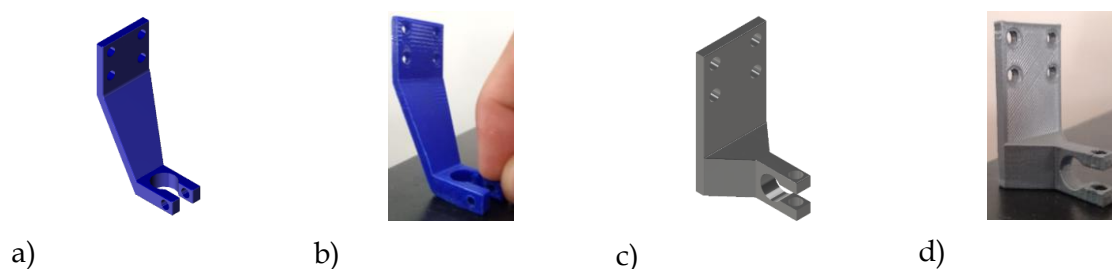


Figura 4.4 - Suportes produzidos para a realização dos ensaios (US)

a) Modelação ($\varnothing = 10 \text{ mm}$); b) Impressão ($\varnothing = 10 \text{ mm}$); c) Modelação ($\varnothing = 3.18 \text{ mm}$) ; d) Impressão ($\varnothing = 3.18 \text{ mm}$)

O aparato experimental desta variante é apresentado na Figura 4.5.

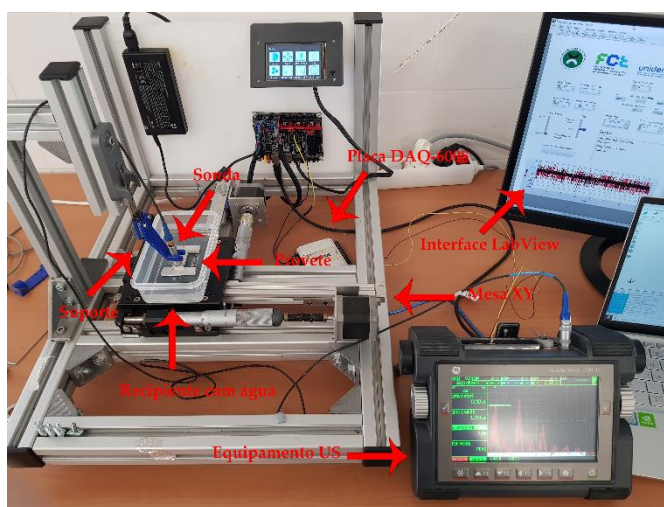


Figura 4.5 - Aparato experimental do ensaio de Ultra-sons

4.4 Equipamento para ensaios de Termografia

O equipamento utilizado na técnica de termografia foi uma câmara termográfica *Fluke Ti400* comercializada pela *Fluke* [36]. Este equipamento permite a captar e visualizar a radiação infravermelha, sendo capaz de detetar uma gama de temperaturas entre os -20°C e 1200°C com uma precisão de medição de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma banda espectral de infravermelhos entre $7.5\text{ }\mu\text{m}$ e $14\text{ }\mu\text{m}$. Permite captar imagens com uma taxa de atualização de 9 Hz , tendo um campo de visão de $24^{\circ}\times 17^{\circ}$ e uma resolução espacial de 1.31 mRad .

Para o tratamento dos vídeos e produção de imagens relativas ao ensaio, foi utilizado o *software SmartView*, sendo que a sua interface se encontra no Anexo A.9. Este *software* permite definir escalas de temperaturas, escalas de cores, controlar a gama de radiação a observar e a região do vídeo ou imagem a ser analisada. Também permite a produção de vídeos ou imagens de acordo com os frames pretendidos.

Para os ensaios serem realizados nas melhores condições possíveis foi necessário proceder a certos procedimentos tanto nos provetes como nas proximidades do local do ensaio. A superfície das serpentinas utilizadas foram pintadas de preto, como é apresentado na Figura 4.6a), por forma a melhorar o contraste visualizado na câmara termográfica. No local da entrada e saída de fluído foi necessário proceder à abertura dos canais, tal como referido em § 3.4, sendo posteriormente colocado um sistema, apresentado na Figura 4.6b), constituído por um parafuso, um o-ring, uma anilha, uma porca e uma peça em L. Este sistema permite isolar esses locais bem como colocar mangueiras para a circulação de fluído.

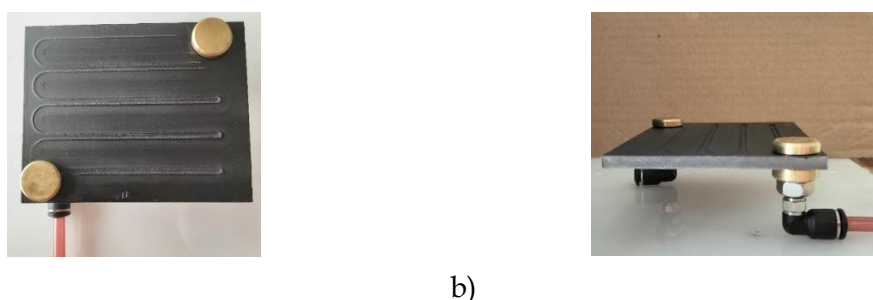


Figura 4.6 - Condições necessárias para a realização do ensaio
a) Serpentina pintada de preto; b) Sistema de isolamento da entrada e saída de fluído

Para a realização do ensaio, foi utilizado um cartão pintado de preto por forma a tornar a área em redor da serpentina uma região escura e facilitar a visibilidade do contraste nos resultados. A chapa foi aquecida a uma temperatura elevada através de água a ferver e foi utilizado líquido refrigerante a uma temperatura abaixo da temperatura ambiente para que o contraste de temperaturas entre o líquido e o provete com a serpentina fosse o maior, facilitando a sua deteção na câmara termográfica. A câmara termográfica estava fixa a um

suporte produzido pela NOVA NDT Lab. e a circulação do fluído foi feita com o recurso a uma bomba. Para o funcionamento da bomba foi utilizada uma fonte de energia DC. O aparato experimental dos ensaios realizados é apresentado na Figura 4.7.

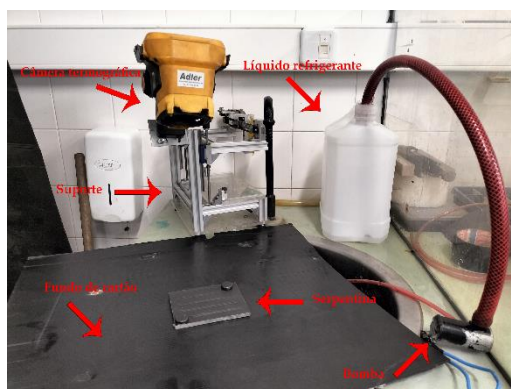


Figura 4.7 - Aparato experimental do ensaio de Termografia

4.5 Equipamento para ensaios de Líquidos penetrantes

Para a realização da técnica de líquidos penetrantes é necessário seguir os passos descritos em § 2.2.5. Para tal foi utilizado um líquido que limpa a superfície do provete, o líquido penetrante e por fim o revelador. A realização destes ensaios não seguiu o formato tradicional devido à forma como foi aplicado o líquido penetrante. A aplicação do penetrante foi efetuado por meio de um êmbolo e de um sistema semelhante ao apresentado em § 4.4, onde a diferença é que neste ensaio foi utilizado uma peça vertical e não uma peça em L. Outro cuidado necessário foi garantir que a superfície do provete não continha rugosidades e que a região de entrada e saída dos provetes estava com os canais abertos para permitir a injeção do líquido. O aparato experimental dos ensaios realizados é apresentado na Figura 4.8.

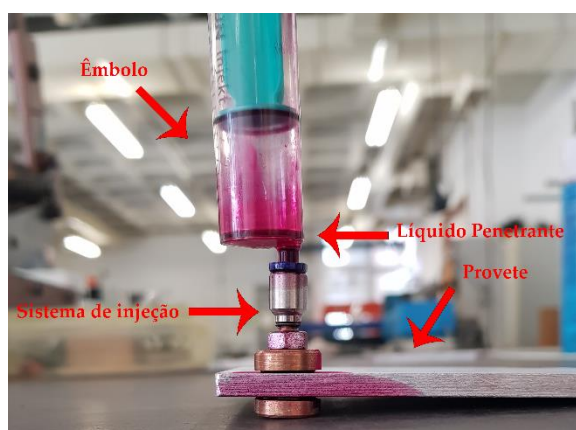


Figura 4.8 - Aparato experimental do ensaio de Líquidos Penetrantes

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente através das técnicas que foram enunciadas anteriormente bem como os parâmetros que foram utilizados durante a realização dos ensaios. Na radiologia digital foram realizados ensaios aos canais lineares e às serpentinas produzidos com as três dimensões dos pinos por forma a verificar se seria possível detetar os canais, possíveis irregularidades, as suas dimensões e trajetórias.

Nas correntes induzidas foram testadas as duas sondas nas diferentes dimensões de canais produzidos e também foram realizadas inspeções ao longo das serpentinas, com o intuito de verificar a presença do canal.

Nos ensaios de ultra-sons foram utilizadas duas variantes, a com contacto e por imersão. A variante por contacto foi utilizada para verificar a velocidade do som no material e ver se seria possível localizar o canal na espessura do material. A variante por imersão foi utilizada para ver se era possível identificar os canais lineares e as serpentinas.

Nos ensaios de termografia foram utilizadas as serpentinas para ver se seria possível identificar a região do canal através do contraste térmico entre o líquido a circular e a temperatura da chapa.

A utilização dos líquidos penetrantes foi para verificar a possível existência de defeitos superficiais formados durante o processo da formação dos microcanais através do FSC.

5.1 Resultados da Radiologia digital

O objetivo deste ensaio era verificar a existência dos canais que foram produzidos com os diferentes pinos e, posteriormente, verificar a sua regularidade ao longo de toda a secção e as suas dimensões. Este ensaio também foi aplicado às serpentinas para verificar se seria possível detetar as regiões curvilíneas. O parâmetro controlado durante os ensaios foi o tempo de exposição dos provetes à radiação dado em [ms].

Pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$, os resultados permitiram não só observar a região onde o canal se encontra, mas também a sua regularidade ao longo da secção e regiões onde o canal não está bem definido, sendo que os melhores resultados estão

associados aos provetes com secções transversais com uma geometria bem definida. O tempo de exposição que produziu melhores resultados foi de 240 ms, onde é possível observar o maior contraste entre o material e a região com a ausência dele. Esta técnica permite determinar a largura dos canais produzidos. Os provetes produzidos com o pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$ formam canais com 1.5 mm de largura. Na Figura 5.1 é apresentado dois provetes onde é possível verificar a presença e a regularidade do canal ao longo da secção.



a)

b)

Figura 5.1 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 2 \text{ mm}$)

a) Série A5; b) Série C9

Estes ensaios permitiram detetar os casos onde a formação do canal não ocorreu da forma pretendida sendo possível observar falhas na regularidade do canal ao longo da secção, como é apresentado na Figura 5.2.



a)

b)

Figura 5.2 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 2 \text{ mm}$)

a) Série B6; b) Série B8

Este ensaios também conseguiram detetar as situações onde os provetes tiveram uma má formação do canal, originando grandes falhas de regularidade ao longo da secção, como é observado na Figura 5.3.



a)

b)

Figura 5.3 - Provetes com má formação do canal ($\varnothing = 2 \text{ mm}$)

a) Série B2; b) Série B4

No caso das serpentinas, estas só foram realizadas com os melhores parâmetros, sendo que os resultados obtidos permitiram visualizar a região curvilinear de forma nítida, como é possível observar na Figura 5.4.

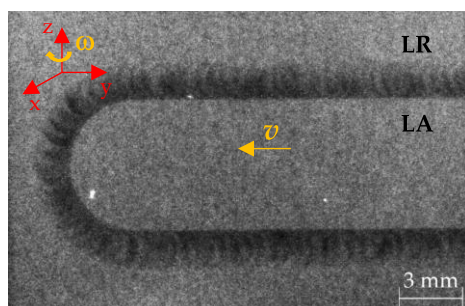


Figura 5.4 - Serpentina com o pino de $\varnothing = 2$ mm

Pino de $\varnothing = 1$ mm

Para os provetes produzidos com o pino de $\varnothing = 1$ mm, o tempo de exposição que produziu os melhores resultados foi de 240 ms. Os resultados obtidos demonstraram o mesmo comportamento que os resultados do pino de $\varnothing = 2$ mm, sendo que a diferença é na largura do canal obtido, que no caso do pino de $\varnothing = 1$ mm é de 0.8 mm. Na Figura 5.5 temos provetes com canais regulares ao longo da secção.

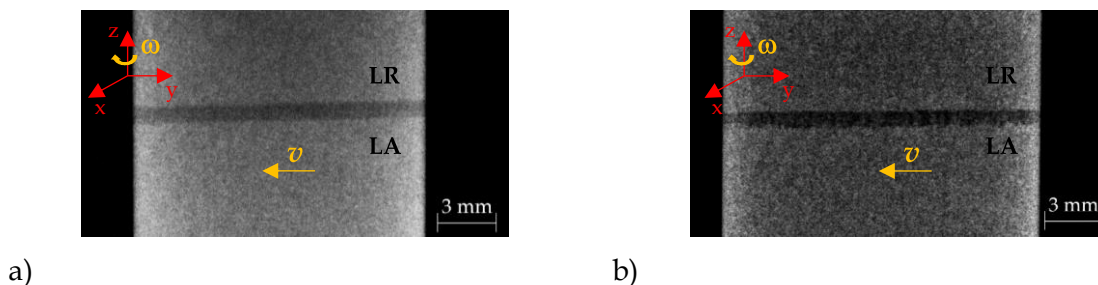


Figura 5.5 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 1$ mm)

a) Série E3; b) Série D4

Na Figura 5.6 é apresentado provetes com muitas irregularidades ao longo da secção.

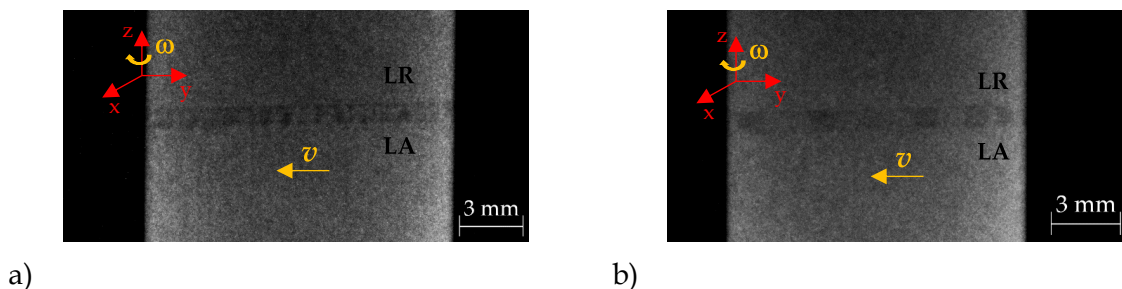


Figura 5.6 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 1$ mm)

a) Série F4; b) Série F9

Tal como nas serpentinas com o pino de $\varnothing = 2$ mm, só foram produzidos serpentinas com os melhores parâmetros. Os resultados permitiram ver com clareza o canal e a região curvilínea da serpentina, como é apresentado a Figura 5.7.

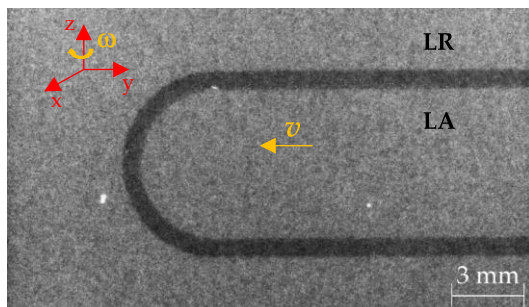
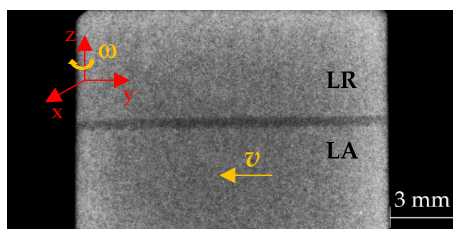


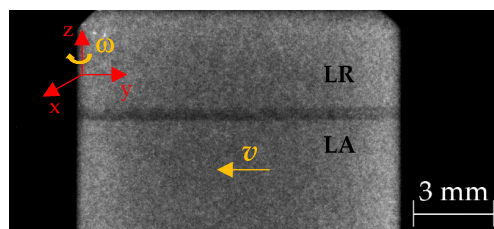
Figura 5.7 - Serpentina com o pino de $\varnothing = 1$ mm

Pino de $\varnothing = 0.5$ mm

Os resultados obtidos para os provetes produzidos com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm apresentam as mesmas características que os resultados obtidos para os outros pinos, sendo a única diferença a largura do canal, que neste caso é de 0.4 mm. Na Figura 5.8 é apresentado canais regulares ao longo da secção.



a)

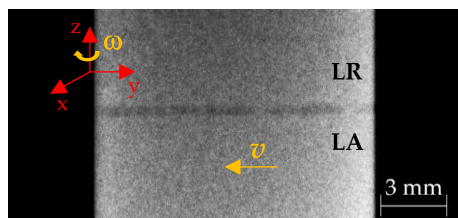


b)

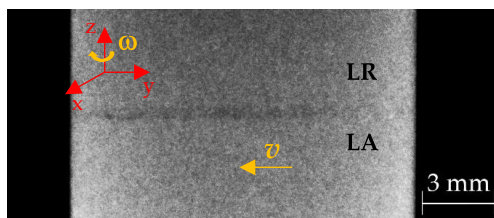
Figura 5.8 - Provetes com canais regulares ($\varnothing = 0.5$ mm)

a) Série H3; b) Série H5

Na Figura 5.9 é apresentado provetes com muitas irregularidades ao longo da secção.



a)



b)

Figura 5.9 - Provetes com irregularidades no canal ($\varnothing = 0.5$ mm)

a) Série G4; b) Série G6

Tal como nas serpentinas com os pinos anteriores, só foram produzidos serpentinas com os melhores parâmetros. Os resultados permitiram ver com de forma nítida o canal e a região curvilínea da serpentina, como é apresentado a Figura 5.10.

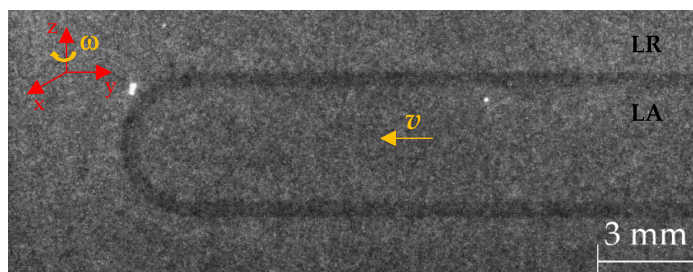


Figura 5.10 - Serpentina com pino de $\varnothing = 0.5$ mm

Os ensaios de radiologia digital são aplicáveis às três dimensões dos pinos utilizados, e permitem determinar a presença, a largura e a regularidade do canal ao longo da secção do provete. No caso das serpentinas também permite identificar a sua trajetória.

5.2 Resultados das Correntes induzidas

O objetivo deste ensaio foi verificar se através de correntes induzidas era possível identificar variações de impedância que indicassem a presença do canal. Foram realizados ensaios lineares e ensaios nas serpentinas por meio de c-scans. Os parâmetros controlados foram a área a inspecionar, a frequência das sondas e o ganho. Para conhecer quais as frequências a serem utilizadas para os provetes com diferentes canais, esta foi calculada com base nas diferentes profundidades dos canais, referidas em § 3.4, na permeabilidade magnética, μ [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$], e na condutividade elétrica, σ [%IACS] do material. Os diferentes valores são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores utilizados para o cálculo das frequências (CI)

Material	Propriedades físicas		Pinos	Profundidade [mm]
	μ [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]	σ [%IACS]		
Liga AW1050	1,0002	59,45	$\varnothing = 2$ mm	2,25
			$\varnothing = 1$ mm	1,05
			$\varnothing = 0.5$ mm	0,53

O cálculo da profundidade de penetração é dado pela Eq. 2.2, apresentada em § 2.2.2. Esta equação foi aplicada para todos os valores de frequência entre 1 e 1000 kHz, por forma a determinar qual a frequência indicada para a profundidade pretendida. Após a aplicação da equação, obteve-se um gráfico com o comportamento esperado, onde há medida que a

frequência aumenta, a profundidade de penetração é menor. O gráfico encontra-se no Anexo A.10. Os valores obtidos para a profundidade são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores obtidos para a profundidade (CI)

Pinos	Profundidade requerida [mm]	Frequência [kHz]	Profundidade obtida [mm]
Ø = 2 mm	2,25	1	2,31
Ø = 1 mm	1,05	5	1,03
Ø = 0.5 mm	0,53	20	0,52

Para a realização dos ensaios foram definidos um conjunto de frequências a serem testadas para além das determinadas para os provetes de cada um dos pinos, para analisar qual é o comportamento à medida que se aumenta a frequência, como é apresentado na Tabela 5.3. O valor do ganho utilizado foi sempre o máximo possível, de forma a não saturar o sinal. A região a inspecionar foi escolhida de modo a evitar o efeito de pele e a permitir que a sonda passasse por zonas do provete sem e com canal, tendo o cuidado do canal estar situado na região central do comprimento percorrido.

Tabela 5.3 - Frequências utilizadas nos diferentes ensaios de CI

Pinos	Frequências [kHz]					
Ø = 2 mm	1	5	20	50	100	500
Ø = 1 mm		5	20	50	100	500
Ø = 0.5 mm			20	50	100	500

Na escolha dos provetes para os ensaios, foram utilizados os resultados obtidos por radiologia digital para saber quais os resultados associados a provetes com um canal regular e bem formado e por outro lado, a provetes com uma má formação do canal.

Pino de Ø = 2 mm

Para os canais produzidos com o pino de Ø = 2 mm, os resultados obtidos não demonstram com clareza a região do canal. Apesar de se detetar algumas variações na impedância com algumas frequências, não é possível afirmar a presença exclusiva do canal. Os ensaios realizados com as frequências de 1 e 5 kHz não demonstram a presença do canal, onde são detetadas pequenas variações na impedância com 5 kHz, mas com a frequência de 1 kHz, a variação é nula. Nos Anexos A.11 e A.12 são apresentados os ensaios com as frequências referidas.

Os ensaios realizados com as frequências de 50 e 100 kHz, demonstram uma variação da impedância significativa, mas não possuem uma região bem definida que possa indicar a presença do canal. Nos Anexos A.13 e A.14 são apresentados os ensaios com as frequências

referidas. O ensaio associado à frequência de 500 kHz não demonstra a presença do canal, possuindo pequenas variações na impedância, como é apresentado no Anexo A.15. A frequência que apresentou o melhor resultado foi a de 20 kHz, onde existe a maior variação da impedância numa região mais definida que as frequências anteriores, como é apresentado na Figura 5.11.

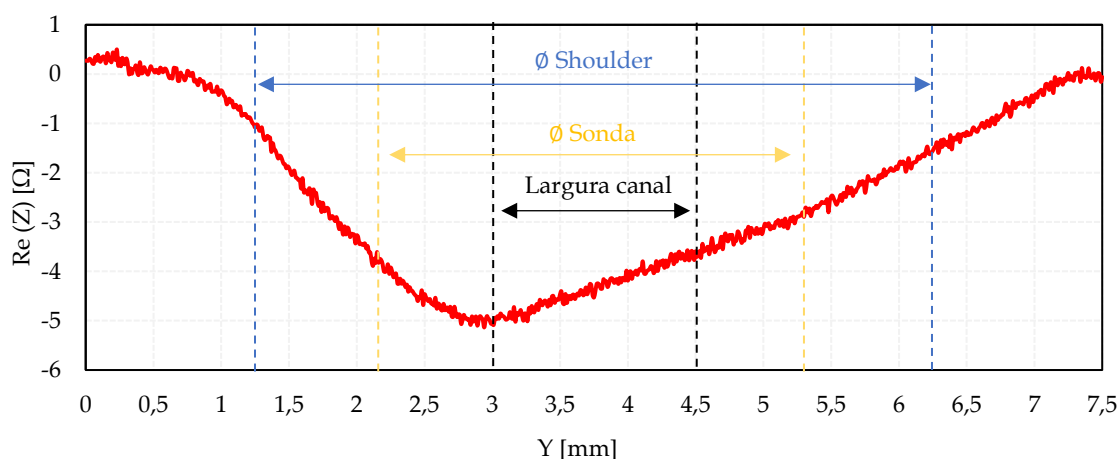


Figura 5.11 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 2$ mm)

Os ensaios realizados ao provetes produzido com o pino de $\varnothing = 2$ mm não permitem garantir e afirmar que as variações detetadas coincidem com a presença e localização do canal. Os ensaios com as frequências de 1 e 5 kHz não produziram bons resultados, apesar de serem as frequências indicadas para a profundidade do canal segundo os cálculos teóricos. Uma das razões deverá estar relacionado com o facto da gama de frequências que a sonda de 50-100 kHz consegue operar estar mais distante das frequências utilizadas. Os ensaios com as frequências de 20, 50 e 100 kHz, já produziram melhores resultados, sendo possível verificar uma variação significativa da impedância, apesar de não ser possível detetar uma região bem definida onde possa estar o canal. Tal facto, pode estar relacionado com o facto dessas frequências estarem a atingir uma profundidade inferior relativamente a onde se encontra o canal e a estarem a detetar alterações na condutividade elétrica na região onde o material foi processado quando o canal foi produzido, visto que essa região de variação de impedância é coincidente com o diâmetro do *shoulder*, sendo neste caso, de 5 mm. O ensaio com a frequência de 500 kHz também não detetou o canal por estar a detetar uma região muito superior em relação a onde se encontra o canal. Por forma a tentar garantir que as variações detetadas se referem à presença do canal, foi realizada uma comparação entre o melhor resultado obtido, que foi com a frequência de 20 kHz, e um ensaio com a mesma frequência num provete que possuía um canal irregular. Esta comparação mostra que a variação de impedância no provete com o canal

irregular é menor, podendo concluir que a maior variação é de facto a região onde se encontra o canal, como é apresentado na Figura 5.12.

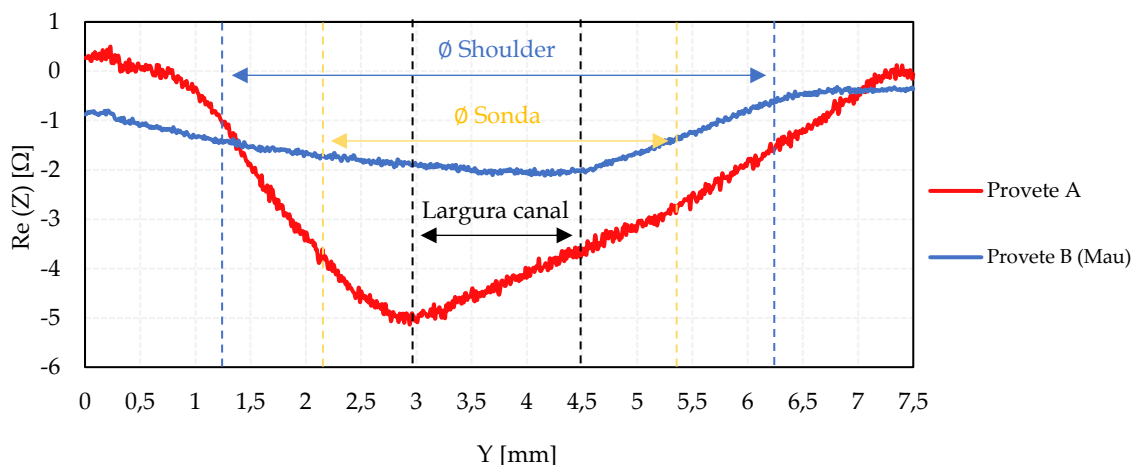


Figura 5.12 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 2$ mm)

Foi ainda realizado um ensaio com o melhor parâmetro em um outro provete com um canal regular. O resultado obtido demonstrou uma variação de impedância menor, mas uma região mais precisa dessa variação que os resultados anteriores, como é apresentado na Figura 5.13.

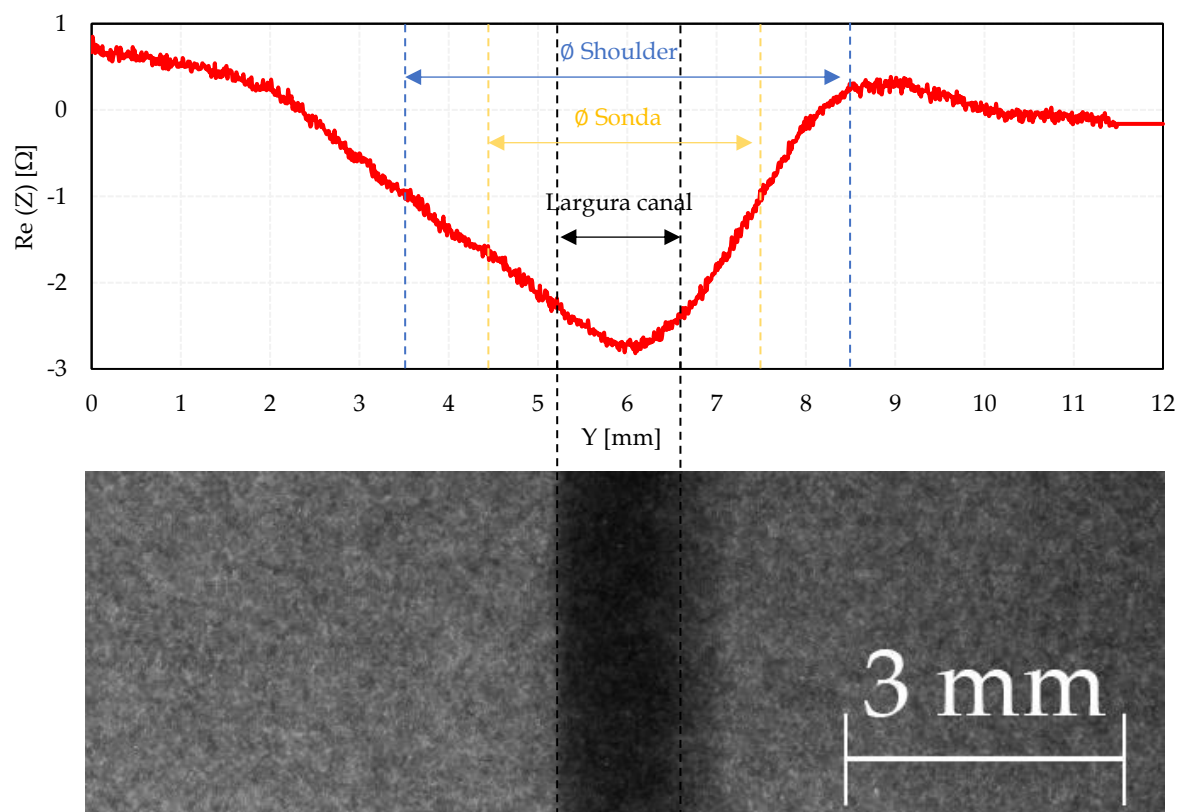


Figura 5.13 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 2$ mm)

No caso das serpentinas apenas foi realizado o ensaio com o melhor parâmetro, onde o resultado confirmou que é possível detetar a variação de impedância na região onde o material foi processado e se encontra o canal, mas não é possível identificar apenas o canal, como é apresentado na Figura 5.14.

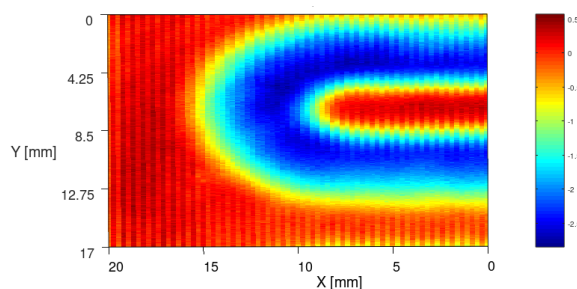


Figura 5.14 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 2$ mm a 20 kHz

Pino de $\varnothing = 1$ mm

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 1$ mm, os resultados obtidos não demonstram com precisão a zona do canal, apesar de estar mais definida que os resultados do pino de $\varnothing = 2$ mm. São detetadas algumas variações significativas da impedância com algumas frequências, mas não é possível afirmar a presença exclusiva do canal. Os ensaios realizados com as frequências de 5, 50 e 100 kHz apresentam variações na impedância, sendo que com 5 e 100 kHz essa variação é reduzida, mas com 50 kHz a variação é maior e apresenta uma região mais precisa. Nos Anexos A.16, A.17 e A.18 são apresentados os ensaios com as frequências referidas por ordem. O ensaio referente à frequência de 500 kHz apresenta algumas variações na impedância mas de forma irregular e sem uma região definida onde possa indicar a presença do canal, como é apresentado no Anexo A.19. A frequência que apresentou o melhor resultado foi a de 20 kHz, onde existe a maior variação da impedância com a região mais precisa que as frequências anteriores, como é apresentado na Figura 5.15.

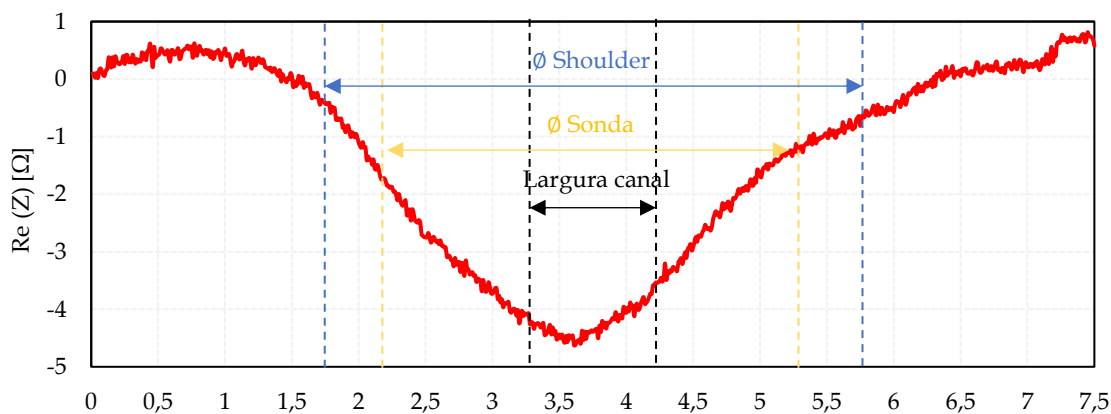


Figura 5.15 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 1$ mm)

Os ensaios realizados ao provetes produzido com o pino de $\varnothing = 1$ mm não permitem garantir e afirmar que as variações detetadas coincidem com a presença e localização do canal. O ensaio com a frequência de 5 kHz não produziu um bom resultado, apesar de ser a frequência indicada segundo os cálculos teóricos. Uma das razões deverá estar relacionado com o facto da gama de frequências que a sonda de 50-100 kHz consegue operar estar mais distante das frequências utilizadas. Os ensaios com as frequências de 20 e 50 kHz produziram os melhores resultados, onde é possível verificar uma variação significativa da impedância e detetar uma região mais definida onde possa estar o canal. O facto de não detetar apenas o canal numa região bem definida pode estar relacionado com as mesmas razões que as apresentadas para os ensaios com o pino de $\varnothing = 2$ mm, sendo neste caso o diâmetro do *shoulder* de 4 mm. Os ensaios com as frequências de 100 e 500 kHz também não produziram bons resultados, detetando pequenas variações da impedância e de forma irregular ao longo do comprimento inspecionado. Uma das razões desse resultado é a sonda estar a detetar uma região muito superior em relação a onde se encontra o canal. Por forma a tentar garantir que as variações detetadas se referem à presença do canal, foi realizada uma comparação entre o melhor resultado obtido, que foi com a frequência de 20 kHz, e um ensaio com a mesma frequência num provete que possuía um canal irregular. Esta comparação mostra que a variação de impedância no provete com o canal irregular é menor, podendo concluir que a maior variação é de facto a região onde se encontra o canal, como é apresentado na Figura 5.16.

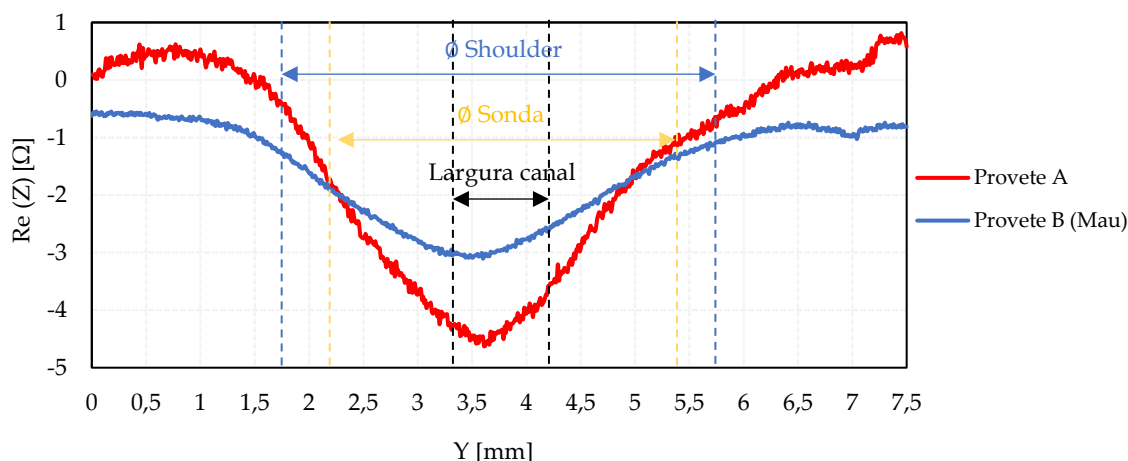


Figura 5.16 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 1$ mm)

Foi também realizado um ensaio com o melhor parâmetro em um outro provete com um canal regular. O resultado obtido demonstrou uma variação de impedância menor, mas uma região mais precisa dessa variação que os resultados anteriores, como é apresentado na Figura 5.17.

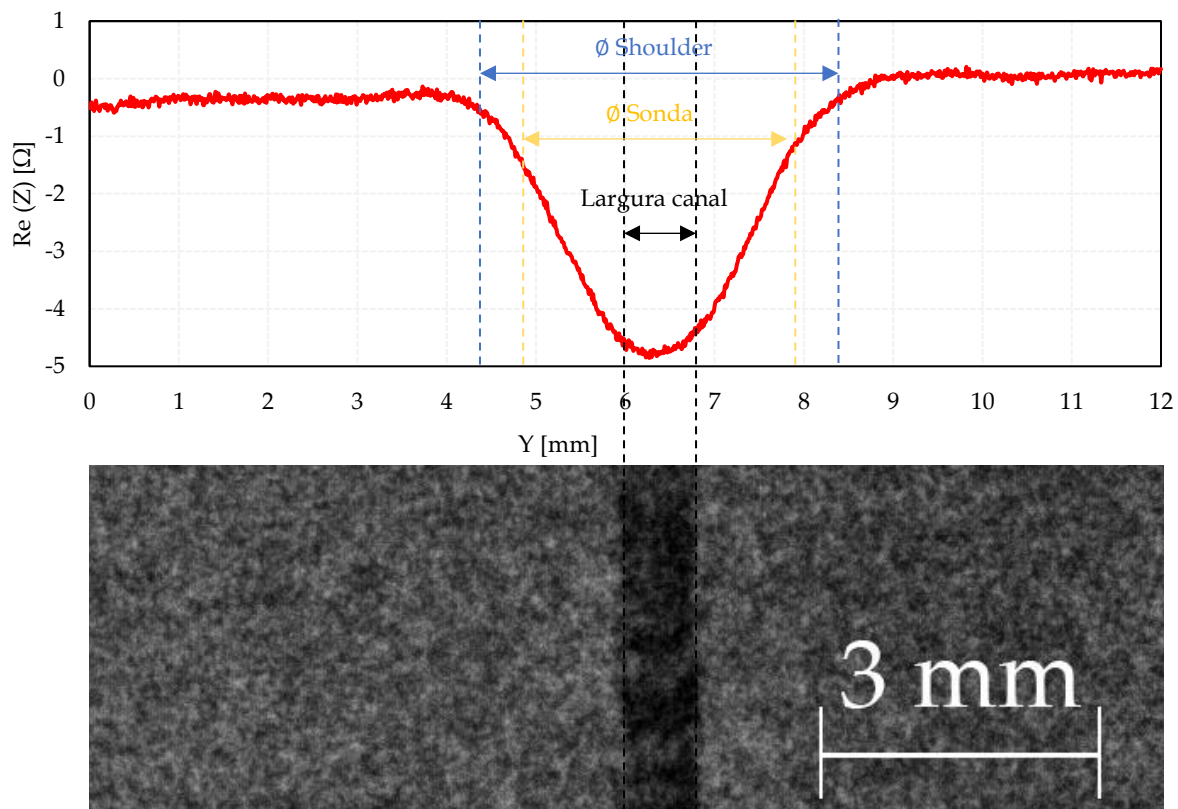


Figura 5.17 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 1$ mm)

No caso das serpentinas apenas foi realizado o ensaio com o melhor parâmetro, onde o resultado confirmou que é possível detetar a variação de impedância na região onde o material foi processado e se encontra o canal, mas não é possível identificar apenas o canal, como é apresentado na Figura 5.18.

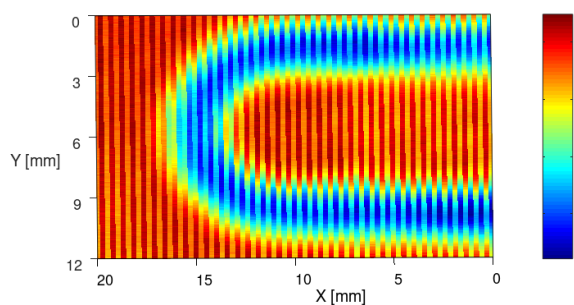


Figura 5.18 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 1$ mm a 20 kHz

Pino de $\varnothing = 0.5$ mm

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm, os resultados obtidos demonstram uma região da variação de impedância mais restrita e precisa que os ensaios com os pinos de anteriores.

Com algumas das frequências utilizadas são detetadas variações significativas da impedância, mas não é possível afirmar a presença exclusiva do canal. Os ensaios realizados com as frequências de 20, 50 e 100 kHz apresentam variações significativas na impedância muito próximas umas das outras e uma região precisa dessa variação, sendo a frequência de 20 kHz o melhor resultado por estar próximo dos cálculos teóricos realizados. Na Figura 5.19 é apresentado o melhor resultado, e nos Anexos A.20 e A.21, encontram-se os ensaios relativos às frequências de 50 e 100 kHz. No ensaio referente à frequência de 500 kHz, as variações da impedância são muito reduzidas e sem uma região definida onde possa indicar a presença do canal, como é apresentado no Anexo A.22.

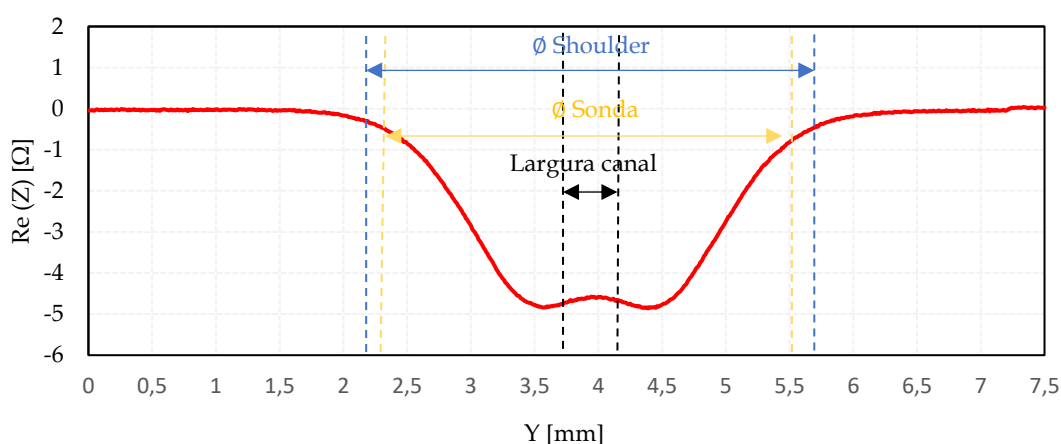


Figura 5.19 - Ensaio de CI a 20 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm)

Os ensaios realizados ao provetes produzido com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm não permitem garantir e afirmar que as variações detetadas são referentes exclusivamente ao canal. Os ensaios com as frequências de 20, 50 e 100 kHz produziram bons resultados com variações significativas da impedância e uma região bem definida dessas variações. Ainda assim, não é possível afirmar que só se deteta o canal devido às alterações provocadas na condutividade elétrica provenientes do processo de formação do canal, sendo neste caso o diâmetro do *shoulder* de 3.5 mm. O ensaio com a frequência de 500 kHz não produziu um bom resultado, detetando pequenas variações da impedância e de forma irregular ao longo da comprimento inspecionado por estarem a detetar uma região muito superior em relação a onde se encontra o canal. Por forma a tentar garantir que as variações detetadas se referem à presença do canal, foi realizada uma comparação entre o melhor resultado obtido, sendo escolhida a frequência de 20 kHz por estar mais próxima dos cálculos teóricos, e um ensaio com a mesma frequência num provete que possuía um canal irregular. Esta comparação mostra que a variação de impedância no provete com canal irregular é menor, podendo concluir que a maior variação é de facto a região onde se encontra o canal, como é apresentado na Figura 5.20.

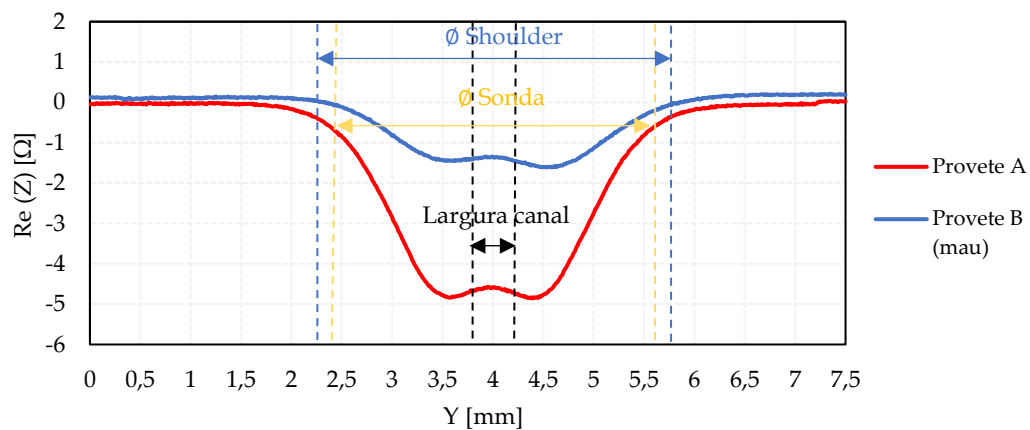


Figura 5.20 - Comparação entre um canal regular e irregular ($\varnothing = 0.5$ mm)

Foi também realizado um ensaio com o melhor parâmetro em um outro provete com um canal regular. O resultado obtido demonstrou uma variação de impedância significativa e uma região precisa dessa variação tal como nos resultados anteriores, como é apresentado na Figura 5.21.

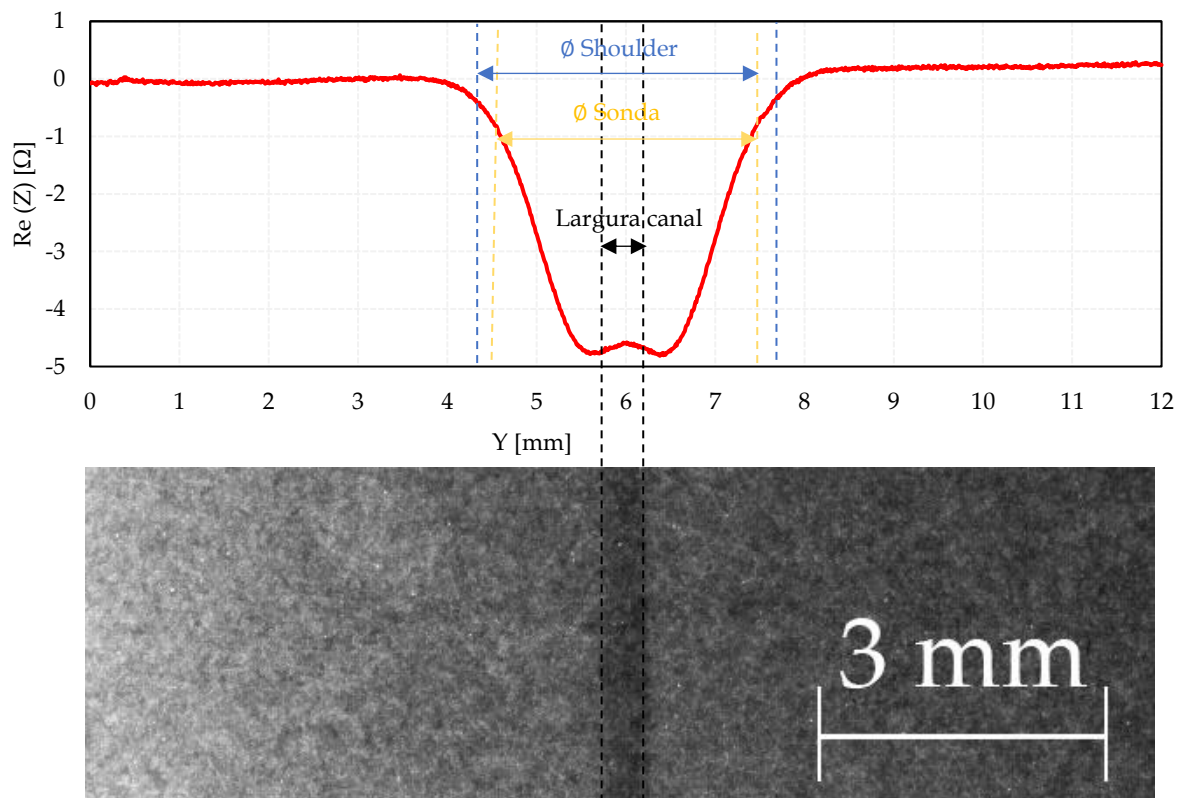


Figura 5.21 - Ensaio de CI a 20 kHz a provete com canal regular ($\varnothing = 0.5$ mm)

No caso das serpentinas apenas foi realizado o ensaio com o melhor parâmetro, onde o resultado confirmou que é possível detetar a variação de impedância na região onde o material

foi processado e se encontra o canal, mas não é possível identificar apenas o canal, como é apresentado na Figura 5.22.

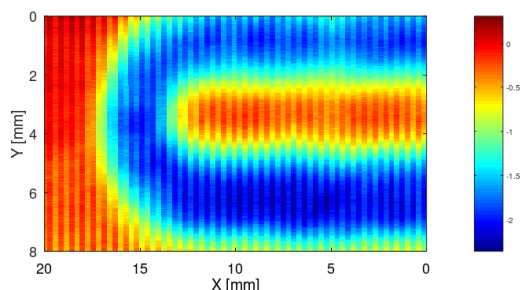


Figura 5.22 - C-Scan da serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm a 20 kHz

5.3 Resultados dos Ultra-sons

O objetivo deste ensaio foi verificar a sua aplicabilidade na localização dos canais ao longo da espessura e verificar a sua presença de forma evidente. Foram realizados ensaios de ultra-sons por contacto para determinar a localização do canal e ultra-sons por imersão para detetar a presença do canal, tanto dos canais lineares como das serpentinhas. Os parâmetros controlados foram a área a inspecionar, a frequência e o ganho. Para saber quais as frequências mais indicadas para os provetes com diferentes canais, estas foram calculadas com base nas larguras dos canais obtidas por meio dos ensaios de radiologia digital e da velocidade do som no material. Os diferentes valores são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores utilizados para o cálculo das frequências (US)

Material	Propriedades físicas	Pinos	Largura [mm]
	$C [m \cdot s^{-1}]$		
Liga AW1050	6320	$\varnothing = 2$ mm	1,5
		$\varnothing = 1$ mm	0,8
		$\varnothing = 0.5$ mm	0,4

O cálculo das frequência é dado pela Eq. 5.1, onde f [Hz] é a frequência, $C [m \cdot s^{-1}]$ é a velocidade do som no material e $l_{defeito}$ [m] é a dimensão do defeito.

$$f \geq \frac{2C}{l_{defeito}} \quad (5.1)$$

Esta equação foi aplicada para os valores de dimensão de defeito entre 0.1 e 2 mm, por forma a determinar qual a frequência indicada para o tamanho do canal. Após a aplicação da equação, obteve-se um gráfico, onde há medida que a dimensão do defeito aumenta, a

frequência diminui tal como é apresentado no Anexo A.23. Os valores obtidos de frequência para as diferentes dimensões dos defeitos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores obtidos para as frequências a serem utilizadas para cada um dos pinos

Pinos	Tamanho do canal [mm]	Frequência obtida [MHz]	Frequência definida [MHz]
$\varnothing = 2 \text{ mm}$	1,5	9,02	10
$\varnothing = 1 \text{ mm}$	0,8	15,8	20
$\varnothing = 0.5 \text{ mm}$	0,4	31,6	35

Para a realização dos ensaios e de acordo com os equipamentos e sondas disponíveis foram utilizadas as duas sondas, referidas em § 4.3, sendo que o próprio equipamento *krautkramer USM 36* funciona apenas entre 1 e 15 MHz. O valor do ganho utilizado foi sempre o máximo possível, de forma a não saturar o sinal. A região a inspecionar foi escolhida de modo a permitir que a sonda passasse por zonas do provete sem e com canal, tendo o cuidado do canal estar situado na região central do comprimento percorrido nos ensaios lineares. Tal como nos ensaios de correntes induzidas, na escolha dos provetes para os ensaios, foi utilizado os resultados obtidos por radiologia digital para saber quais são os resultados associados a provetes com um canal regular e bem formado e por outro lado, a provetes com uma má formação do canal.

Ultra-sons por contacto

Os ensaios realizados pela variante de ultra-sons por contacto foram utilizadas para medir a velocidade do som no material e comparar com o valor teórico, e para calcular a localização do canal na espessura do material. A sonda utilizada foi a de $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$ num canal produzido com o pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$. Através do microscópio foi possível ver com precisão a localização do canal, como é apresentado na Figura 5.23, sabendo que a chapa tem 5 mm de espessura.

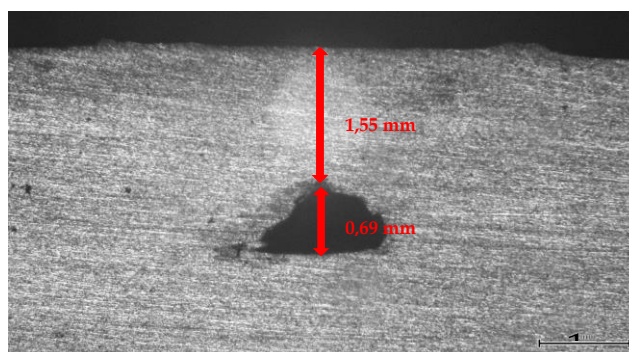


Figura 5.23 - Secção transversal do canal

Através do equipamento de US, é possível ler o tempo de percurso da ondas sonoras em função do ganho. As sondas funcionam em modo de emissão e recepção, sendo que entre dois picos do gráfico, é medido o tempo do percurso da onda sonora desde a saída da sonda, até à chegada do som refletido pelo provete à mesma. Este percurso equivale a duas espessuras do material, onde é possível determinar uma espessura total que corresponde a um determinado intervalo de tempo, e que por sua vez, depende do número de picos escolhidos. Com a função *GATE* do equipamento de US é possível colocar uma linha por cima do pico da onda, de onde se obtém o tempo do percurso da onda no ponto de maior ganho coberto por essa mesma linha. O *display* bem como algumas das características referidas acima são apresentadas na Figura 5.24.



Figura 5.24 - *Display* do equipamento de US

1) Ganho; 2) Tempo do percurso da onda da respectiva *GATE*; 3) *GATE*

O cálculo da velocidade do som no material e da distância percorrida pela onda é dado pela Eq. 5.3, onde C [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] é a velocidade do som, Δx [m] é a distância percorrida e Δt [s] o tempo correspondente à distância percorrida.

$$C = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Os valores utilizados para o cálculo da velocidade do som no material são apresentados na Figura 5.25.

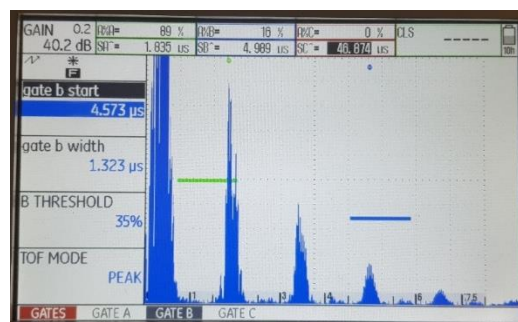


Figura 5.25 - Dados para o cálculo da velocidade do som

Neste caso, foram considerados os primeiros três picos, sendo a distância total percorrida pelo som quatro vezes a espessura do material. O intervalo de tempo é obtido diretamente da leitura do equipamento, colocando uma *GATE* no primeiro e terceiro pico. O resultado da velocidade do som é dado pela Eq. 5.3.

$$v = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{(4,989 - 1,835) \cdot 10^{-6}} = 6341,2 \text{ m/s} \quad (5.3)$$

Este resultado é relativamente próximo do valor teórico que é 6320 m/s. Para o cálculo da distância do canal à parede superior e inferior do provete foram utilizados os mesmos procedimentos que no cálculo da velocidade do som. Os respetivos dados encontram-se nos Anexos A.24 e A.25.

O resultado da distância à parede superior é dado pela Eq. 5.4.

$$\Delta x = \frac{6341,2 \cdot (1,947 - 0,807) \cdot 10^{-6}}{4} = 0,00180 \text{ m} = 1,80 \text{ mm} \quad (5.4)$$

A diferença entre o resultado obtido e o valor do microscópio é pequena, sendo de 0.25 mm. O resultado da distância à parede inferior é dado pela Eq. 5.5.

$$\Delta x = \frac{6341,2 \cdot (2,914 - 1,204) \cdot 10^{-6}}{4} = 0,00271 \text{ m} = 2,71 \text{ mm} \quad (5.5)$$

A diferença entre o resultado obtido e o valor do microscópio é pequena, sendo de 0.07 mm, visto que a distância do canal à parede inferior é de 2.78 mm.

Esta variante permitiu determinar com alguma precisão a velocidade do som no material e localizar a posição do canal ao longo da espessura.

Ultra-sons por imersão

Os ensaios realizados pela variante de ultra-sons por imersão foram realizados com o auxílio da mesa XY, referida em § 4.3, por forma a tentar determinar a presença e localização do canal. Para saber qual a distância ideal a que a sonda deveria estar do provete foi calculado o campo próximo das duas sondas utilizadas. O cálculo do campo próximo é dado pela Eq. 5.6, onde N [m] é o campo próximo, $\emptyset$ [m] é o diâmetro da sonda, f [Hz] é a frequência e C [m/s] a velocidade do som na água.

$$N = \frac{\emptyset^2 \cdot f}{2C} \quad (5.6)$$

Na Eq. 5.7 é apresentado o valor do campo próximo para a sonda de $\emptyset = 10 \text{ mm}$.

$$N = \frac{0,00635^2 \cdot 10 \cdot 10^6}{2 \cdot 1480} = 0,136 \text{ m} = 136 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Na Eq. 5.8 é apresentado o valor do campo próximo para a sonda de $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$.

$$N = \frac{0,003175^2 \cdot 10 \cdot 10^6}{2 \cdot 1480} = 0,034 \text{ m} = 34 \text{ mm} \quad (5.8)$$

A nível prático foi apenas testado o campo próximo da sonda de $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$ por ser uma distância possível de colocar no aparato experimental. Os resultados obtidos para os provetes com as três dimensões dos canais foram os mesmos, não sendo possível detetar o canal em todos eles. Os resultados para os pinos de $\varnothing = 2 \text{ mm}$, $\varnothing = 1 \text{ mm}$ e $\varnothing = 0.5 \text{ mm}$ são apresentados nos Anexo A.26, A.27 e A.28, respetivamente.

Pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$

Na realização dos restantes ensaios a distância associada ao campo próximo foi reduzida para 2 mm por forma a obter os melhores resultados possíveis.

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2 \text{ mm}$, os resultados de ambas as sondas demonstraram uma variação da amplitude evidente na região onde se encontra o canal, sendo esta mais evidente com a sonda de $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$. Na Figura 5.26 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10 \text{ mm}$ e $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$.

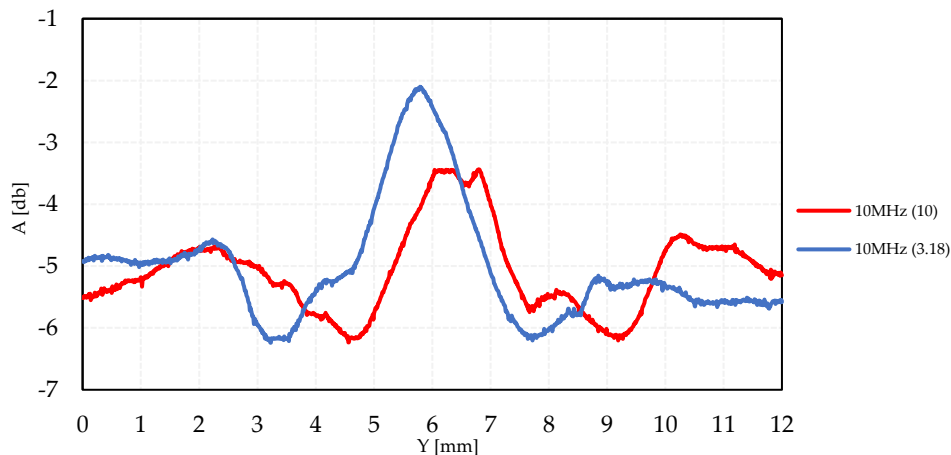


Figura 5.26 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10 \text{ mm}$ e $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$ ($\varnothing = 2 \text{ mm}$)

No caso das serpentinas foram realizadas ensaios com ambas as sondas, onde os resultados confirmaram que é possível detetar a variação de amplitude na região onde o material foi processado e se encontra o canal, podendo afirmar a presença do canal. Na Figura 5.27 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10 \text{ mm}$ e $\varnothing = 3.18 \text{ mm}$.

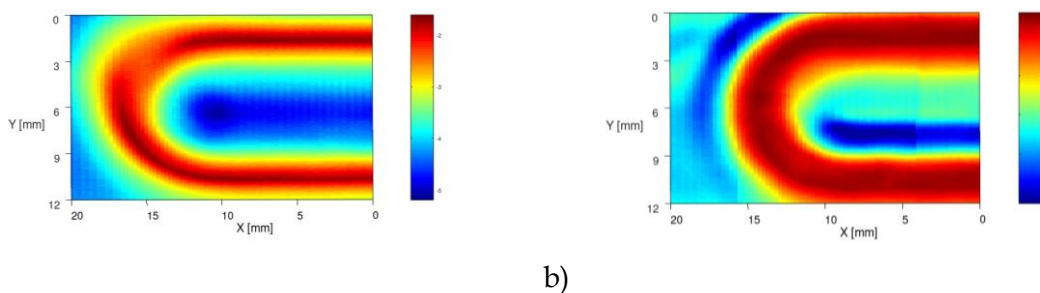


Figura 5.27 - C-Scan das serpentinas de $\varnothing = 2$ mm
a) $\varnothing = 10$ mm; b) $\varnothing = 3.18$ mm

Pino de $\varnothing = 1$ mm

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 1$ mm, os resultados das duas sondas demonstraram uma variação da amplitude evidente na região onde se encontra o canal, sendo mais evidente com a sonda de $\varnothing = 3.18$ mm. Na Figura 5.28 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm.

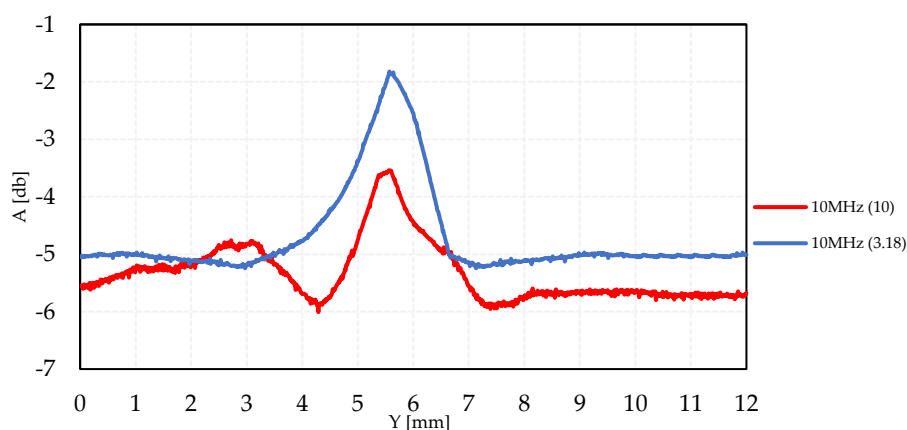


Figura 5.28 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm ($\varnothing = 1$ mm)

No caso das serpentinas foram realizadas ensaios com ambas as sondas, onde os resultados confirmaram que é possível detetar a variação de amplitude na região onde o material foi processado e se encontra o canal, podendo afirmar a presença do canal. Na Figura 5.29 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm.

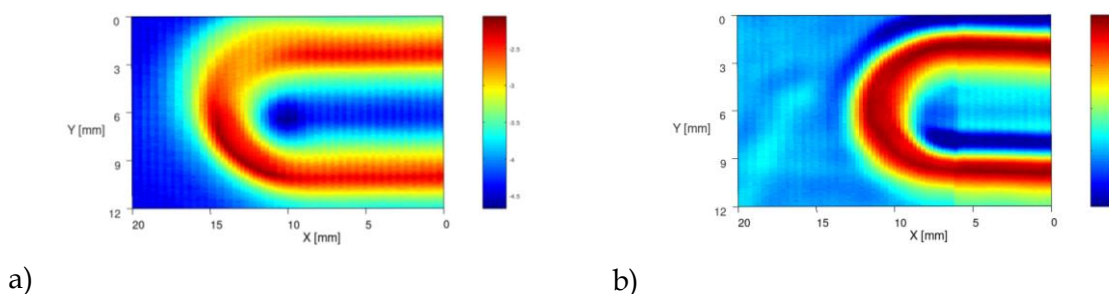


Figura 5.29 - C-Scan das serpentinas de $\varnothing = 1$ mm
a) $\varnothing = 10$ mm; b) $\varnothing = 3.18$ mm

Pino de $\varnothing = 0.5$ mm

Para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm, os resultados das duas sondas demonstraram uma variação da amplitude significativa na região onde se encontra o canal. Na Figura 5.30 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm

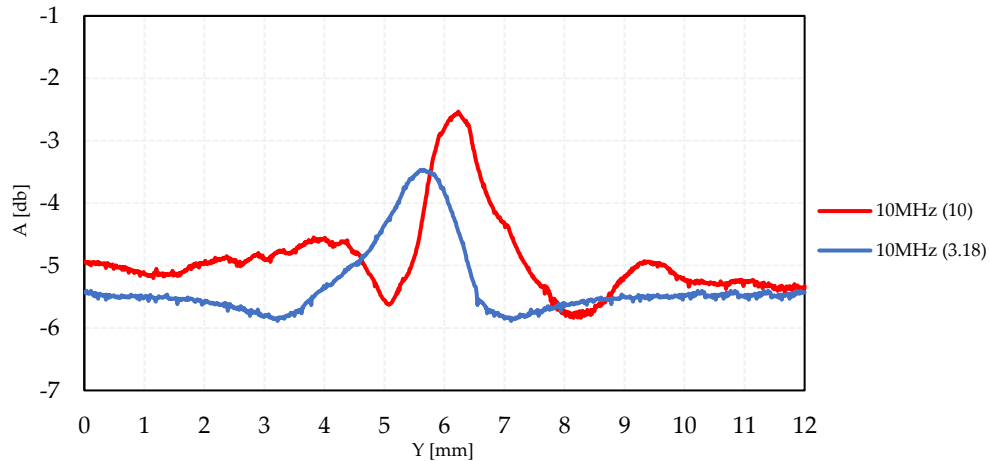


Figura 5.30 - Ensaio com as sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm ($\varnothing = 0.5$ mm)

No caso das serpentinas foram realizadas ensaios com ambas as sondas. O resultado com a sonda de $\varnothing = 3.18$ mm confirmou que é possível detetar a variação de amplitude na região onde o material foi processado e se encontra o canal, podendo afirmar a presença do canal. Por outro lado, o resultado com a sonda de $\varnothing = 10$ mm, deteta um variação de amplitude, mas a região dessa variação não é bem definida. Tal resultado poderá estar relacionado com o facto da dimensão da sonda ser muito superior à dimensão do canal, dificultando a sua detetção com clareza. Na Figura 5.31 é apresentado os resultados das sondas de $\varnothing = 10$ mm e $\varnothing = 3.18$ mm.

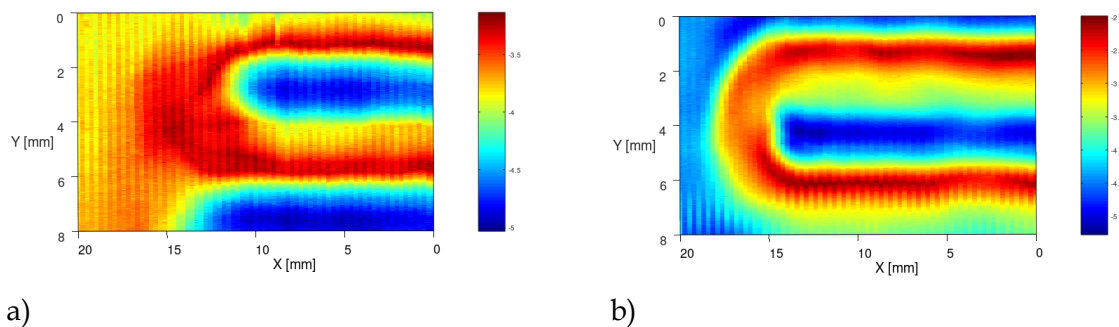


Figura 5.31 - C-Scan das serpentinas de $\varnothing = 0.5$ mm
a) $\varnothing = 10$ mm; b) $\varnothing = 3.18$ mm

5.4 Resultados da Termografia

O objetivo deste ensaio consistiu em verificar a possibilidade de detetar os canais e identificar a sua trajetória com base na radiação infravermelha emitida. Este ensaio foi realizado apenas com as serpentinas por forma a produzir melhores resultados. Uma das condições necessárias para produzir bons resultados era garantir que a serpentina tinha um bom fluxo de fluido ao longo do comprimento para o contraste térmico ser evidente na câmara termográfica. Como tal, apenas foram realizados ensaios em serpentinas cujo o caudal fosse o suficiente para a realização do ensaio, sendo o caso das serpentinas produzidas com o pino de $\varnothing = 2$ mm. As serpentinas com os outros dois pinos não foram sujeitas a ensaios devido ao fluxo do fluido ser baixo como é possível observar no seguinte [vídeo](#). Os resultados obtidos não permitiram visualizar um contraste térmico claro e evidente ao longo do percurso do fluido na serpentina. Inicialmente a chapa aquecida estava toda a uma temperatura próxima, como é apresentado na Figura 5.32a), passado algum tempo é possível observar uma região que surge com uma tonalidade mais clara, onde a temperatura diminui e é coincidente com a trajetória da serpentina, apresentado na Figura 5.32b) e por fim, quando o líquido já percorreu toda a serpentina, é possível ver com pouca nitidez a trajetória do canal como é apresentado na Figura 5.32c). Todas estas fases podem ser observadas no seguinte [vídeo](#).

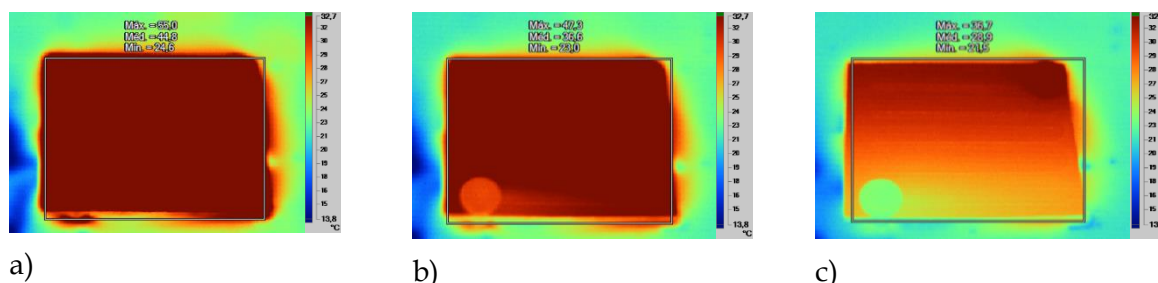


Figura 5.32 - Ensaio com a serpentina de $\varnothing = 2$ mm

a) Serpentina sem o líquido; b) Fase inicial da injeção do líquido; c) Fase avançada da injeção do líquido

Os resultados obtidos não foram os pretendidos nem permitiram alcançar os objetivos definidos. Uma das razões para os maus resultados é o facto do caudal do fluido percorrido ser muito pequeno, fazendo com que demore muito tempo a percorrer todo o comprimento da serpentina. Como o material apresenta uma condutividade térmica elevada e o facto de ter existido uma alteração pouco significativa da mesma na região onde se encontra o canal durante o processo de formação do canal, juntamente com a situação do líquido demorar muito tempo a percorrer a trajetória, faz com que o contraste térmico detetado pela câmara seja reduzido por não existir variações significativas da radiação emitida pela superfície da serpentina, não permitindo ver com clareza e precisão a região do canal.

5.5 Resultados dos Líquidos penetrantes

O objetivo deste ensaio foi verificar se seria possível detetar defeitos superficiais nos provetes produzidos. O interesse deste ensaio recai sobre as serpentinas, sendo que só foram realizados ensaios com as serpentinas produzidas com os diferentes pinos. De acordo com o método explicado em § 4.5, em cada ensaio houve a necessidade de garantir que o líquido estava presente em todo o comprimento da serpentina.

Pino de $\varnothing = 2$ e $\varnothing = 1$ mm

Os ensaios realizados com as serpentinas de $\varnothing = 2$ e $\varnothing = 1$ mm, demonstraram ser possível colocar o líquido em todo o comprimento da serpentina como é apresentado na Figura 5.33, onde é possível observar na região de entrada e saída da serpentina a presença do líquido. Após a aplicação do revelador, não foi detetado nenhum defeito na superfície de ambas as serpentinas.

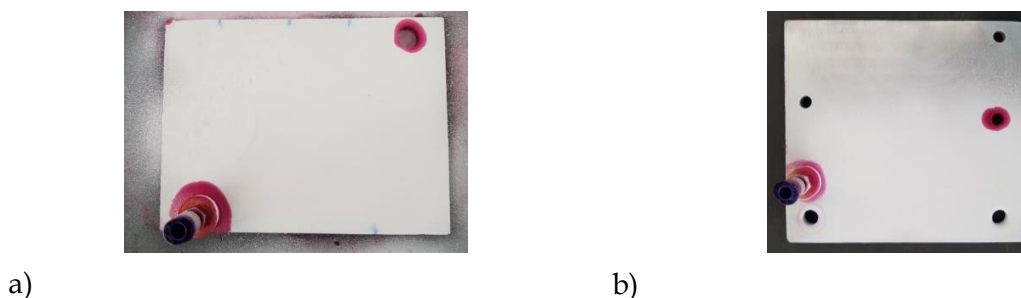


Figura 5.33 - Presença do líquido e revelador aplicado
a) Serpentina de $\varnothing = 2$ mm; b) Serpentina de $\varnothing = 1$ mm

Pino de $\varnothing = 0.5$ mm

No ensaio realizado com a serpentina de $\varnothing = 0.5$ mm, foi possível garantir a continuidade do líquido ao longo da serpentina como é apresentado na Figura 5.34. Por outro lado não foi possível aplicar o revelador na serpentina que apresentou continuidade por não ter sido possível remover a rugosidade superficial sem prejudicar outros ensaios de serpentinas com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm. Nas serpentinas em que foi possível remover a rugosidade superficial, não se conseguiu garantir a abertura dos canais nos furos de entrada e saída.



a)



b)

Figura 5.34 - Ensaio com a serpentina de $\varnothing = 0,5$ mm
a) Local de injeção de líquido; b) Saída do líquido da serpentina

Estes ensaios permitiram verificar que é possível injetar e garantir que o líquido atravessa toda a serpentina, e caso exista um defeito à superfície, este conseguirá ser identificado através do revelador.

5.6 Comparação dos diferentes resultados

Por forma a simplificar e compreender os diferentes resultados obtidos de todas as técnicas de END aplicadas foram definidos um conjunto de características que podem ou não ser identificadas pelas técnicas utilizadas. Na Tabela 5.6 é apresentada as características que foram definidas bem como se estas podem ser detetadas por cada uma das técnicas de END.

Tabela 5.6 - Aplicação das diferentes técnicas às características definidas

		Técnicas de END				
		RX	CI	US	Termografia	LP
Características do canal	Presença	✓		✓		✓
	Regularidade	✓		✓		
	Localização na espessura			✓		
	Alterações da condutividade elétrica		✓			
	Trajectoria	✓	✓	✓		
	Dimensão	✓				

De acordo com as informações da Tabela 5.6, é possível retirar diversas conclusões sobre os resultados obtidos. Os RX demonstraram ser aplicáveis em todas as dimensões dos canais produzidos pelos três pinos. Foram capazes de indicar a presença do canal de forma clara, bem como a sua regularidade ao longo da secção, permitindo visualizar as diferenças quando um canal era regular ou irregular. Esta técnica também permitiu verificar as alterações da trajetória no caso das serpentinas e determinar a largura dos canais produzidos de forma

precisa. As CI não permitiram detetar a presença exclusiva das diferentes dimensões dos canais, tendo sido apenas capaz de detetar alterações da condutividade elétrica numa região bem superior à dimensão do canal, coincidente com o diâmetro do *shoulder* de cada um dos pinos. Esta região é mais reduzida e precisa quanto menor for a dimensão do canal, ou seja, os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2$ mm possuem uma região menos precisa e superior relativamente aos canais produzidos com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm, que possuem uma região menor e mais definida das alterações da condutividade elétrica provocados na produção dos canais pelo diâmetro do *shoulder* ser menor. Apesar de detetar uma região superior à região do canal, nas serpentinas é possível verificar a trajetória onde existiu alterações da condutividade elétrica e onde também se encontra o canal. As duas técnicas de ultra-sons utilizadas complementam-se entre si, visto que a técnica por contacto permitiu determinar a presença do canal e a sua localização na espessura, mas apenas foi possível para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2$ mm. A técnica de ultra-sons por imersão permitiu identificar o canal através de variações da amplitude na região do mesmo, apesar desta região não estar completamente definida e coincidente com as dimensões dos diferentes canais, mas mais precisa que a região observada nas CI. Ao ser aplicada esta técnica nas serpentinas, foi possível ver de forma clara a zona do canal, a sua regularidade bem como a trajetória ao longo de toda a serpentina. A técnica de termografia só foi possível de aplicar às serpentinas produzidas pelo pino de $\varnothing = 2$ mm, visto que as serpentinas produzidas com os pinos mais reduzidos, não tinham um caudal suficientemente grande onde fosse possível registar o contraste térmico na câmara termográfica. Apesar do caudal do maior canal ser superior, não foi possível observar de forma evidente a região onde se encontra o canal por meio das diferenças das temperaturas entre o fluido colocado na serpentina e a temperatura da própria serpentina. Os LP demonstraram a presença de todas as dimensões dos canais por ter sido possível injetar o líquido e este ter percorrido toda a serpentina. Por outro lado, não detetou qualquer defeito superficial, o que não quer dizer que a técnica não permita detetar estes defeitos caso eles existissem.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este capítulo é dividido em dois grupos, as conclusões retiradas ao longo de todo o trabalho que foi desenvolvido e os possíveis desenvolvimentos futuros nos tópicos que foram abordados. Neste capítulo são apresentados de forma resumida as conclusões associadas aos resultados obtidos ao longo da realização dos ensaios de cada uma das técnicas aplicadas bem como os desenvolvimentos futuros que podem otimizar e melhorar os resultados obtidos.

6.1 Conclusões

No decorrer desta dissertação foram avaliadas cinco técnicas de ensaios não destrutivos para a inspeção de microcanais produzidos por *Friction Stir Channeling*. Na produção destes canais foram utilizados pinos com diferentes diâmetros, sendo eles de 2, 1 e 0.5 mm, originando canais com diferentes tamanhos e com diferentes profundidades, sendo elas de 2.25 mm, 1.05 mm e 0.53 mm, respetivamente para os pinos referidos. As técnicas utilizadas para inspecionar os canais foram a radiologia digital, as correntes induzidas, os ultra-sons, a termografia e os líquidos penetrantes. Os ensaios de radiologia digital permitiram detetar os canais produzidos pelos três pinos, sendo o tempo de exposição ótimo de 240 ms. Esta técnica conseguiu determinar a presença dos canais, a sua regularidade e as diferentes trajetórias no caso das serpentinas. Estes ensaios também permitiram identificar maus canais, sendo possível observar com clareza a diferença entre um canal regular e irregular. Também permitiu determinar a largura dos canais produzidos, sendo de 1.5 mm, 0.8 mm e 0.4 mm para os pinos de $\varnothing = 2$, $\varnothing = 1$ e $\varnothing = 0.5$ mm, respetivamente. As correntes induzidas permitiram detetar variações significativas de impedância nas três dimensões dos canais, sendo a frequência que produziu os melhores resultados a de 20 kHz. Nos ensaios com os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2$ mm apesar de existir variações de impedância, a região dessa variação não era bem definida. Os canais produzidos com os pinos de $\varnothing = 1$ e $\varnothing = 0.5$ mm apresentaram o mesmo comportamento, mas com a região um pouco melhor definida, não podendo afirmar em nenhum caso a presença exclusiva do canal. Para tentar garantir a presença do canal, foram realizados ensaios com maus canais, onde se verificou uma

diminuição da variação da impedância nesses mesmos canais. No caso das serpentinas, nas três dimensões foi possível verificar uma região com variações de impedância indicando a trajetória dos canais.

Nos ensaios de ultra-sons foram utilizadas duas variantes, a por contacto e por imersão. Na variante por contacto foi utilizada a sonda de $\varnothing = 3.18$ mm, permitindo calcular a velocidade do som no material e obter um valor muito próximo do teórico, e também localizar a posição do canal na espessura do material, determinando a sua profundidade obtendo resultados com pequenas diferenças relativamente ao microscópio, mas apenas para os canais produzidos com o pino de $\varnothing = 2$ mm. Na variante por imersão, foi possível determinar a presença das três dimensões dos canais com ambas as sondas utilizadas, mas não com os resultados obtidos para o campo próximo. No caso das serpentinas, também se conseguiu determinar o canal, a sua dimensão e trajetória, onde a sonda de $\varnothing = 3.18$ mm produziu melhores resultados. Para a serpentina produzida com o pino de $\varnothing = 0.5$ mm, a sonda de $\varnothing = 10$ mm não detetou com precisão a região do canal.

Os ensaios de termografia não produziram bons resultados, não sendo possível identificar com clareza o canal e a sua trajetória através do contraste térmico na câmara térmica. Os ensaios realizados com os líquidos penetrantes permitiram afirmar a presença e continuidade do canal devido ao líquido ter percorrido todo o comprimento da serpentina, mas não detetaram defeitos nas superfícies das chapas inspecionadas, o que não quer dizer que a técnica não consiga detetar esses defeitos caso eles existam.

6.2 Desenvolvimentos futuros

No âmbito do *Friction Stir Channeling*, a otimização da tecnologia por forma produzir bons canais com uma geometria regular e profundidade definida poderia facilitar a inspeção dos canais por meio das diferentes técnicas de END. No caso da radiologia digital, apesar dos resultados obtidos terem sido claros e evidentes, seria útil adquirir um sistema de *3D Computed Tomography*, que permite uma análise 3D das peças a inspecionar. Para as correntes induzidas, poderia ser relevante testar sondas que funcionem na gama das frequências desejada para atingir as profundidades dos canais, ainda que as alterações da condutividade elétrica provocadas pelo FSC, estejam sempre presentes. No caso dos ultra-sons, apesar de se ter obtido resultados evidentes, a utilização de sondas e equipamentos capazes de funcionar com maiores frequências poderá originar melhores resultados, especialmente para os canais com menor dimensão. Para o caso da termografia, a otimização do FSC na produção das serpentinas com maiores caudais pode melhorar os resultados obtidos, tornando evidente a região onde se encontra o canal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Friction stir channeling: Characterization of the channels," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 8, pp. 3696–3704, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.036.
- [2] R. S. Mishra, "Integral channels in metal components and fabrication thereof," Patent no. US 6923362 B2, 2005.
- [3] C. Vidal, "Development and Mechanical Characterization of a New Manufacturing Technology: Friction Stir Channelling," Universidade de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2005.
- [4] S. G. Kandlikar and W. J. Grande, "Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology," *Heat Transfer Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 3–17, Jan. 2003, doi: 10.1080/01457630304040.
- [5] S. Y. Tarasov, V. E. Rubtsov, A. A. Eliseev, E. A. Kolubaev, A. v. Filippov, and A. N. Ivanov, "Effect of friction stir welding parameters on defect formation," in *AIP Conference Proceedings*, Oct. 2015, vol. 1683. doi: 10.1063/1.4932920.
- [6] C. Vidal, "Processo de abertura de canais internos contínuos em componentes maciços sem alteração da cota de superfície processada e respectiva ferramenta modular ajustável," Patente no. PT 105628, 2012.
- [7] A. Rashidi, A. Mostafapour, S. Salahi, and V. Rezazadeh, "Modified friction stir channeling: A novel technique for fabrication of friction stir channel," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 302, pp. 365–370. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.365.
- [8] A. Rashidi, A. Mostafapour, V. Rezazadeh, and S. Salahi, "Channel formation in modified friction stir channeling," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 302, pp. 371–376. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.371.
- [9] H. Karvinen, D. Nordal, and P. Vilaça, "New Development and Testing of FSChanneling Technique: HybridFSC," Curran Associates, Inc, 2017.
- [10] J. Gandra, "Methods and appratus for creating channels in workpieces," Patent no. WO 2018/083438 A1, 2018.
- [11] M. Buinho, "Desenvolvimento da tecnologia Friction Stir Channelling - estudo da influência da base no processamento de ligas de alumínio," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2020.

- [12] A. J. Chamkha, M. Molana, A. Rahnama, and F. Ghadami, "On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review," *Powder Technology*, vol. 332. Elsevier B.V., pp. 287–322, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.powtec.2018.03.044.
- [13] S. Prakash and S. Kumar, "Fabrication of microchannels: A review," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 229, no. 8, pp. 1273–1288, Aug. 2015, doi: 10.1177/0954405414535581.
- [14] S. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, and M. King, *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. Elsevier, 2005.
- [15] R. Jiang, F. Song, and H. Li, "Flow Characteristics of Deionized Water in Microtubes," *Chinese Physics Letters*, vol. 23, pp. 3305–3008, 2006, doi: 10.1177/0954405414535581.
- [16] J. Borges, "Desenvolvimento de Técnicas Baseadas em Filmes de Células Bacterianas para Aplicação em Ensaaios Não Destrutivos de Materiais de Engenharia," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [17] L. Bernardo, "Técnicas avançadas de controlo não destrutivo para ligações de ligas com memória de forma a aços de construção civil," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [18] P. E. Mix, *Introduction to nondestructive testing*, vol. 56. Wiley, 2005.
- [19] T. G. Santos, "END," *Apontamentos das aulas de PAFED*, 2021.
- [20] S. Pandya, R. S. Mishra, and A. Arora, "Channel formation during friction stir channeling process – A material flow study using X-Ray micro-computed tomography and optical microscopy," *J Manuf Process*, vol. 41, pp. 48–55, May 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.03.021.
- [21] T. Jayakumar, B. Raj, and M. Thavasimuthu, "Practical non-destructive testing," 3rd ed., vol. 3, NAROSHA PUBLISHING HOUSE, 2008, pp. 63–92.
- [22] V. Aviation, "Eddy Current Electromagnetic Induction." <http://www.victor-aviation.com/Eddy-Current-Inspection.php>. (accessed Feb. 10, 2022).
- [23] N. Resource, "NDT and Eddy Current Testing." <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/eddycurrenttesting.xhtml>. (accessed Feb. 10, 2022).
- [24] M. Machado, "Conceção , Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaaios Não Destrutivos de Geometrias Tubulares," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [25] A. S. for N. Testing, "ASNT." <https://asnt.org/>. (accessed Feb. 10, 2022).
- [26] T. Jayakumar, B. Raj, and M. Thavasimuthu, "Practical non-destructive testing," 3rd ed., vol. 3, NAROSHA PUBLISHING HOUSE, 2008, pp. 93–115.

- [27] R. Santos, “Ensaaios Não Destrutivos para Compósitos Produzidos por Manufatura Aditiva: Avaliação de Termografia Ativa Pulsada e Ultra-sons Sem Contacto,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2019.
- [28] C. Ibarra-Castanedo, J. R. Tarpani, and X. P. V. Maldague, “Nondestructive testing with thermography,” *Eur J Phys*, vol. 34, no. 6, Nov. 2013, doi: 10.1088/0143-0807/34/6/S91.
- [29] M. Jolly *et al.*, “Review of Non-destructive Testing (NDT) Techniques and their Applicability to Thick Walled Composites,” in *Procedia CIRP*, 2015, vol. 38, pp. 129–136. doi: 10.1016/j.procir.2015.07.043.
- [30] R. Andreucci, *Ensaio por Líquidos Penetrantes*. Abendi, 2014.
- [31] “PolyLanema.” <https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/folhas/aw-1050/> (accessed Aug. 05, 2022).
- [32] *KODAK 2100 Intraoral X-ray System User’s Manual*. 2007.
- [33] “Olympus Nortec 600.” [https://www.olympus-ims.com/pt/nortec600/#!cms\[focus\]=cmsContent10597](https://www.olympus-ims.com/pt/nortec600/#!cms[focus]=cmsContent10597) (accessed Aug. 06, 2022).
- [34] N. Instruments, “USB-6008 Dispositivo de E/S multifuncionais.” <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.usb-6008.html> (accessed Aug. 05, 2022).
- [35] W. Technologies, “Krautkramer USM 36 Portable Flaw Detector.” <https://www.bakerhughes.com/pt-br/waygate-technologies/ultrasonic-testing/portable-ultrasound-equipment/ultrasonic-flaw-detectors/krautkramer-usm-36-portable-ultrasonic-flaw-detector> (accessed Aug. 07, 2022).
- [36] Fluke, “Câmara infravermelha Fluke Ti400.” <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/ti400#> (accessed Aug. 09, 2022).

ANEXOS

A.1 Parâmetros utilizados para o pino de $\varnothing = 1 \text{ mm}$

Série	Ferramenta	Ensaio	Comprimento do pino [mm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Velocidade de rotação [min-1]	Espaçamento [mm]	Tempo [s]	Rampa de aceleração [mm/min]	Avanço para cada velocidade da rampa [mm]		
D	MC1.0	1	1,48	50	2440	0,05	3	10-25-40-50	1		
		2	1,48	50		0,05		10-25-40-51			
		3	1,05	50		0,05		10-25-40-50			
		4	1,05	50		0,04		10-25-40-50			
		5	1,05	50		0,03		10-25-40-50			
		6	1,05	75		0,03		19-38-60-75			
		7	1,05	100		0,03		25-50-75-100			
		8	1,05	125		0,03		25-60-95-125			
		9	1,05	145		0,03		25-60-90-120-145			
		10	1,05	160		0,03		25-60-90-120-140-160			
E	MC1.0	1	1,05	50	2000	0,03	3	10-25-40-50	1		
		2		75				19-38-60-75			
		3		100				25-50-75-100			
		4		125				25-60-95-125			
		5		145				25-60-90-120-145			
		6		50	2800			10-25-40-50			
		7		75				19-38-60-75			
		8		100				25-50-75-100			
		9		125				25-60-95-125			
		10		145				25-60-90-120-145			
F	MC1.0	1	1,05	50	3200	0,03	3	10-25-40-50	1		
		2		75				19-38-60-75			
		3		100				25-50-75-100			
		4		125				25-60-95-125			
		5		145				25-60-90-120-145			
		6		160	3800			25-60-90-120-140-160			
		7		50				10-25-40-50			
		8		75				19-38-60-75			
		9		100				25-50-75-100			
		10		125				25-60-95-125			
		11		145				25-60-90-120-145			
		12		160				25-60-90-120-140-160			

Figura A.1 - Parâmetros do pino de $\varnothing = 1 \text{ mm}$

A.2 Parâmetros utilizados para o pino de $\varnothing = 0.5 \text{ mm}$

Série	Ferramenta	Ensaio	Comprimento do pino [mm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Velocidade de rotação [min-1]	Espaçamento [mm]	Tempo [s]	Rampa de aceleração [mm/min]	Avanço para cada velocidade da rampa [mm]
G	MC0.5	1	0,53	20	5500	0,02	3	5-10-15-20	0,5
		2		40				5-10-20-30-40	
		3		60				5-10-20-30-45-60	
		4		80				5-10-25-40-60-80	
		5		100				5-15-30-55-80-100	
		6		120	5-15-30-50-70-90-120				
		7		145	5-15-30-60-120-145				
		8		20	5-10-15-20				
		9		40	5-10-20-30-40				
		10		60	5-10-20-30-45-60				
H	MC0.5	1	0,53	20	7000	0,02	3	5-10-15-20	0,5
		2		40				5-10-20-30-40	
		3		60				5-10-20-30-45-60	
		4		80				5-10-25-40-60-80	
		5		100				5-15-30-55-80-100	
		6		120	5-15-30-50-70-90-120				
		7		145	5-15-30-60-120-145				
		8		145	5-10-15-20				
		9		120	5-10-20-30-40				
		10		100	5-10-20-30-45-60				
		11		80	5-10-25-40-60-80				
		12		60	5-15-30-55-80-100				
		13		40	5-15-30-50-70-90-120				
		14		20	5-15-30-60-120-145				

Figura A.2 - Parâmetros do pino de $\varnothing = 0.5 \text{ mm}$

A.3 Preparação dos canais lineares



Figura A.3 - Canais lineares

A.4 Preparação das serpentinas

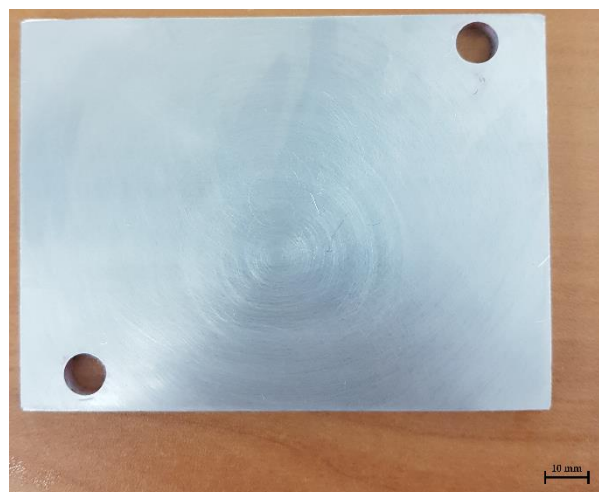


Figura A.4 - Serpentinhas

A.5 Interface do LabView



Figura A.5 - Interface do software Labview

- 1) Controlo do ensaio; 2) Velocidade da inspeção; 3) Área a inspecionar e a resolução; 4) Ligação ao equipamento; 5) Posição inicial e geração do código G; 6) Notas; 7) Resultado em cada linha percorrida; 8) Resultado final

A.6 Suporte das correntes induzidas

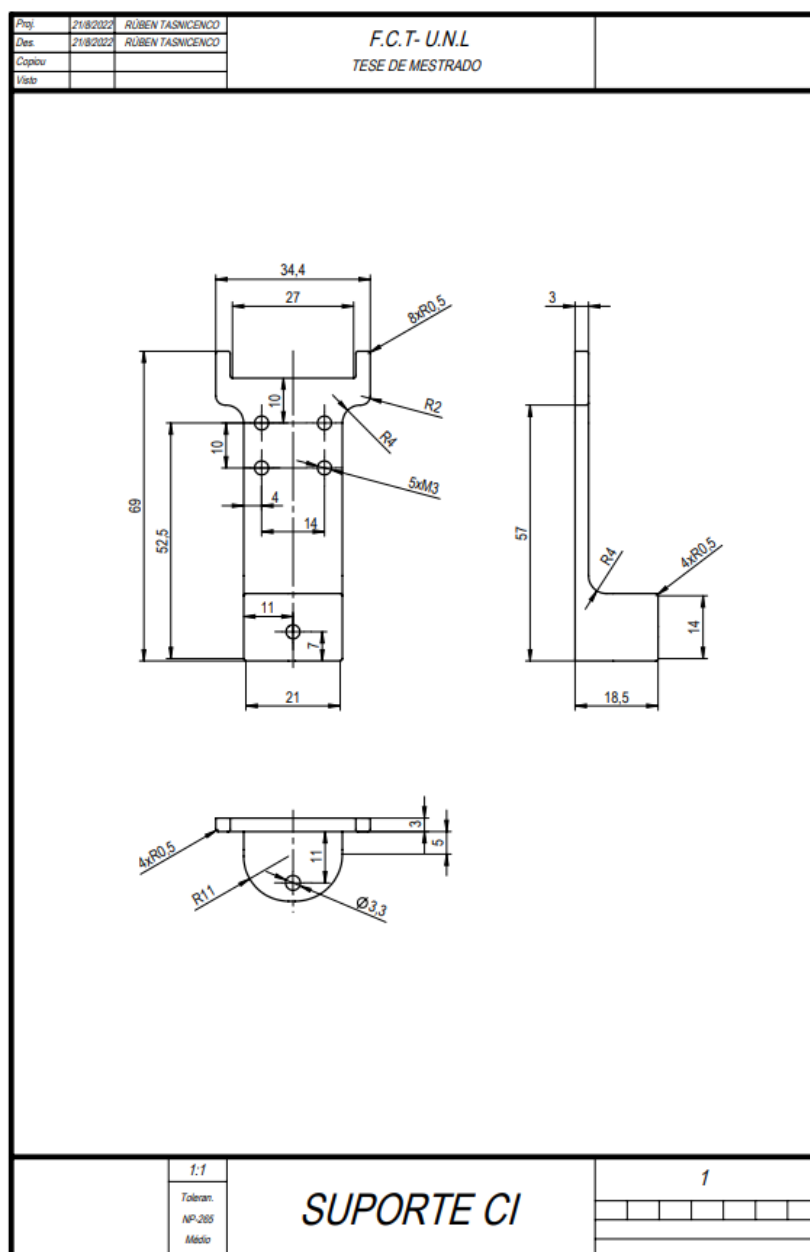


Figura A.6 - Desenho técnico do suporte de CI

A.7 Suporte para o cabo de US

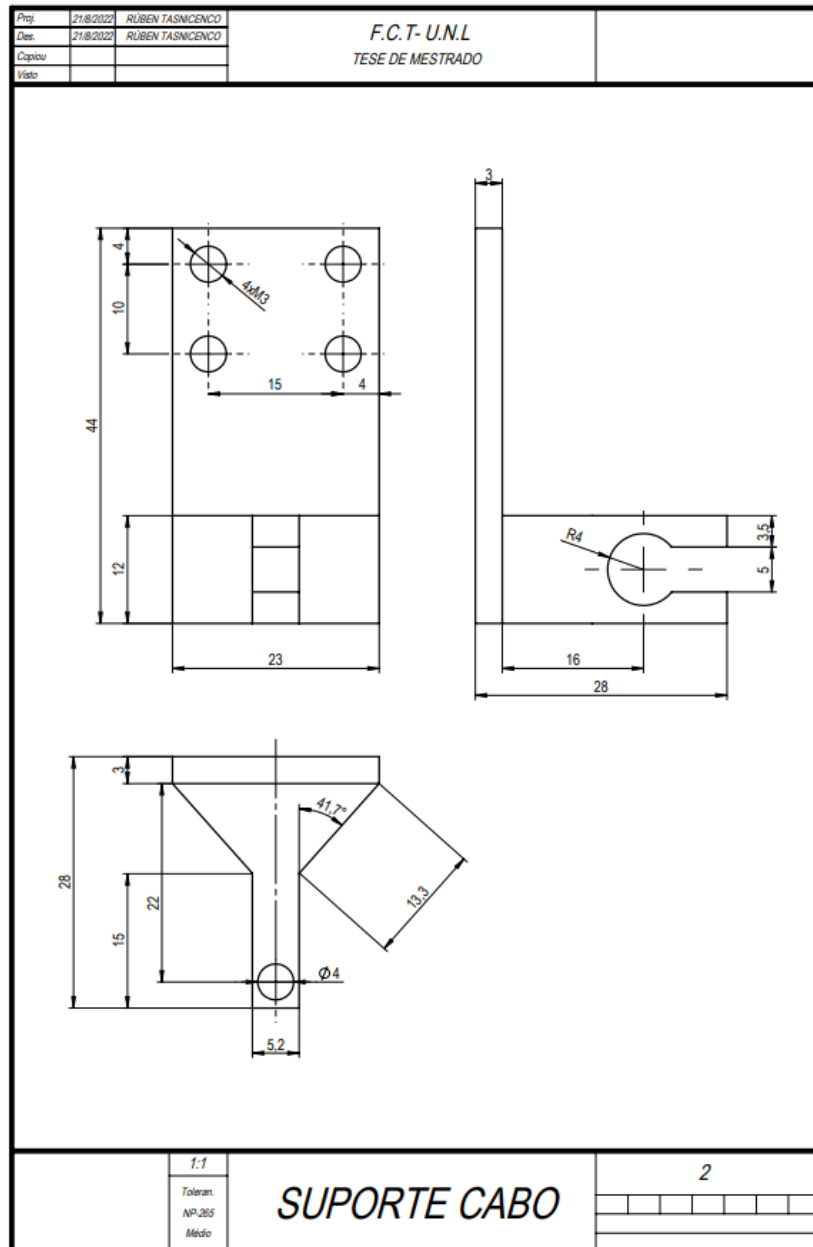


Figura A.7 - Desenho técnico do suporte para o cabo de US

A.8 Suporte para os ultra-sons

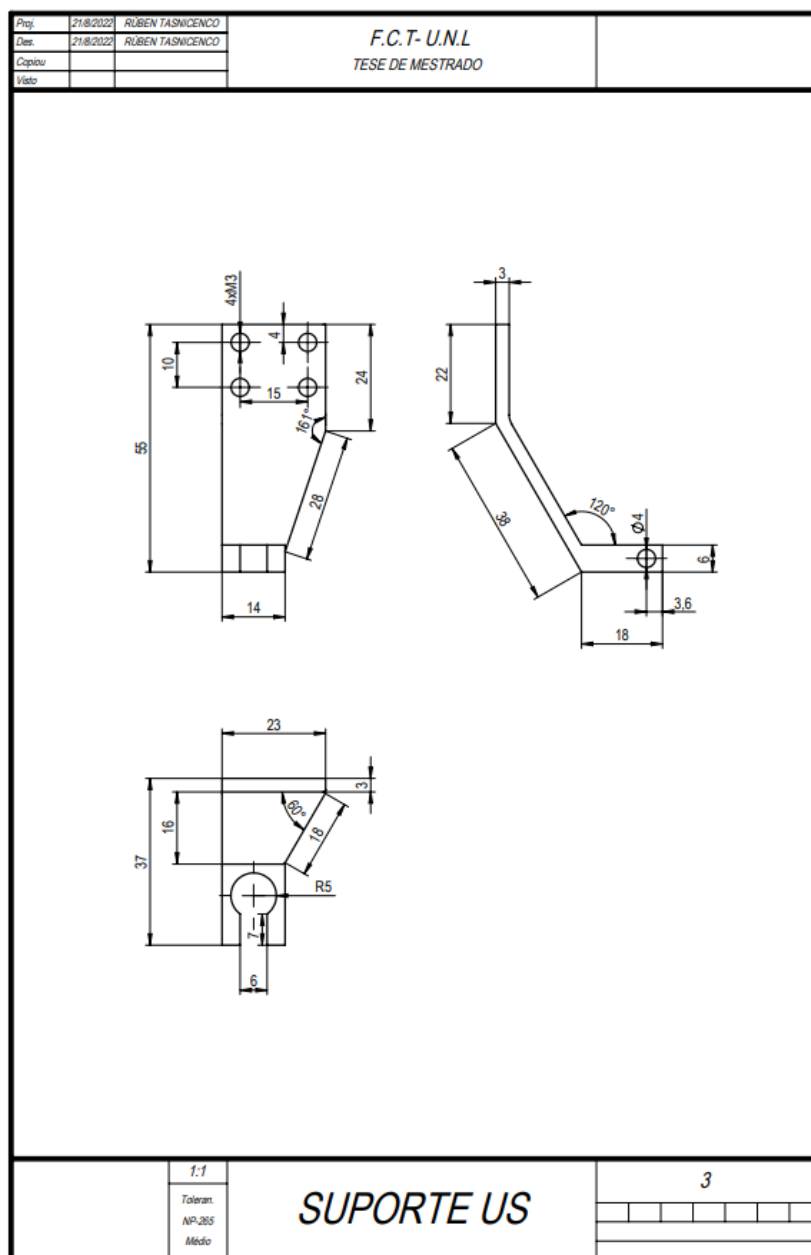


Figura A.8 - Desenho técnico do suporte para US

A.9 Interface do SmartView

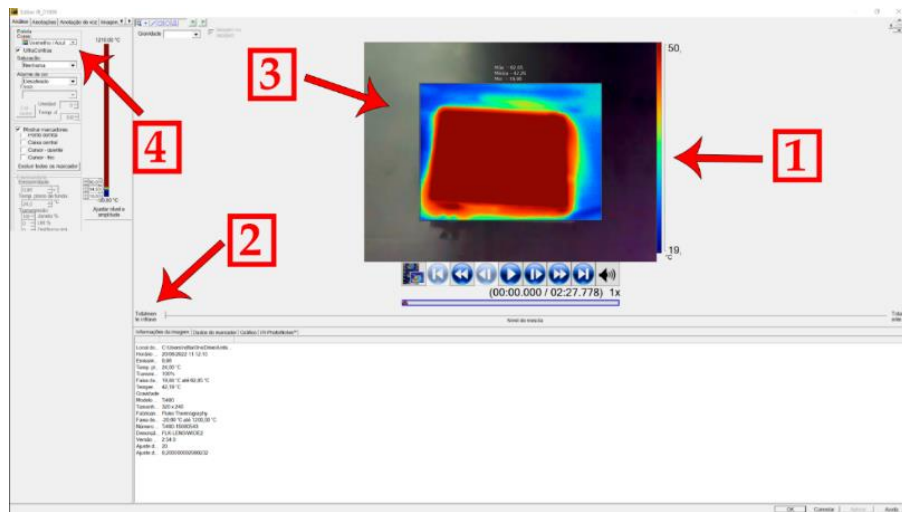


Figura A.9 - Interface do software SmartView

1) Escala de temperatura; 2) Gama da radiação a absorver; 3) Display da imagem térmica; 4) Escala de cores

A.10 Profundidade de penetração

Profundidade de penetração para a Liga AW1050

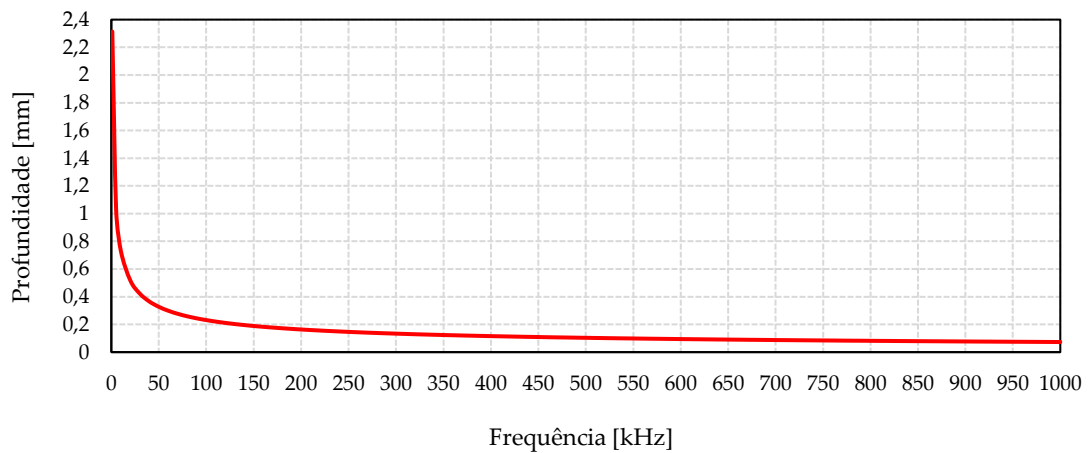


Figura A.10 - Gráfico obtido para a profundidade de penetração (CI)

A.11 Ensaio de CI a 1 kHz com pino de $\varnothing = 2$ mm

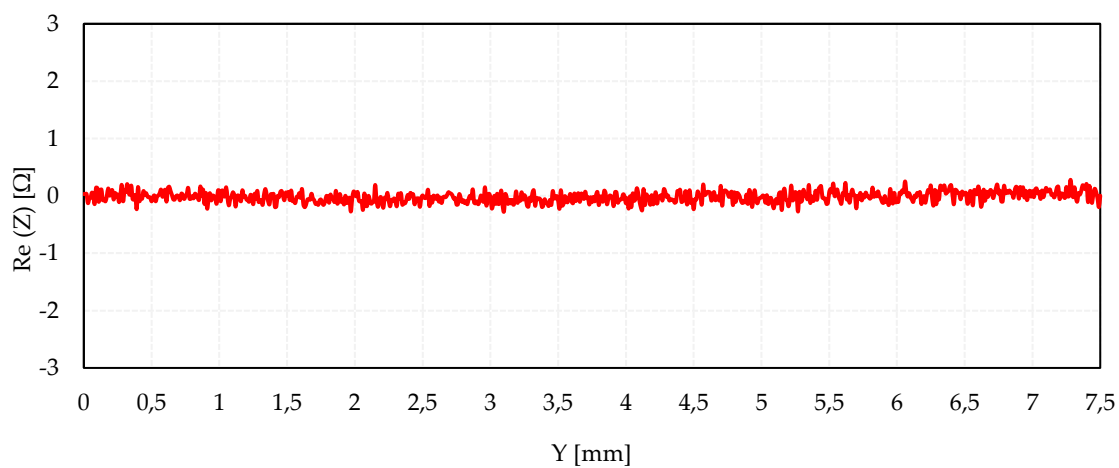


Figura A.11 - Ensaio de CI a 1 kHz ($\varnothing = 2$ mm)

A.12 Ensaio de CI a 5 kHz com pino de $\varnothing = 2$ mm

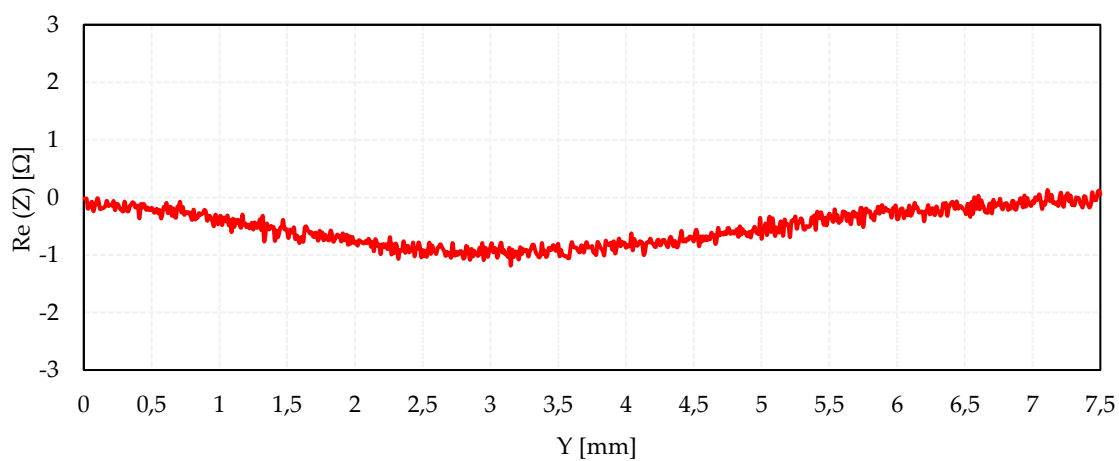


Figura A.12 - Ensaio de CI a 5 kHz ($\varnothing = 2$ mm)

A.13 Ensaio de CI a 50 kHz com pino de $\varnothing = 2$ mm

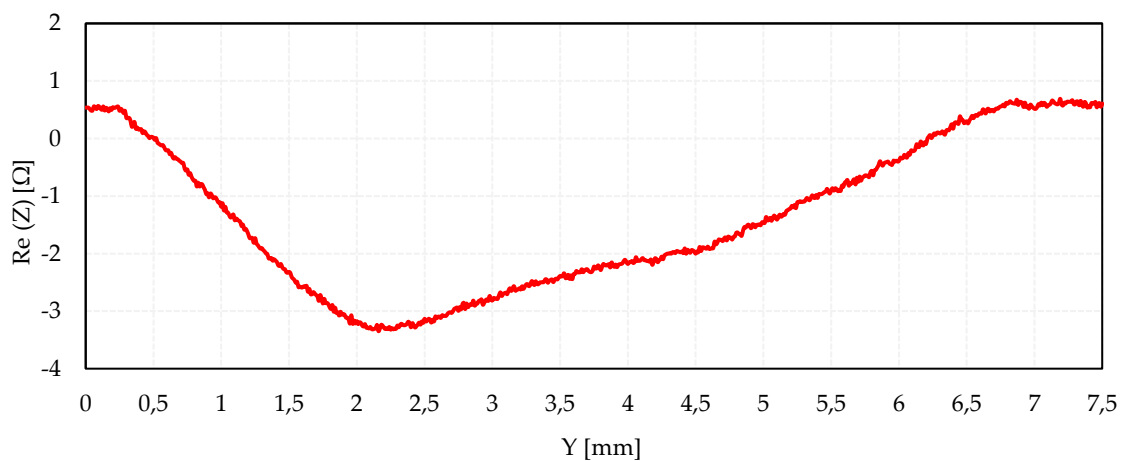


Figura A.13 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 2$ mm)

A.14 Ensaio de CI a 100 kHz com pino de $\varnothing 2$ mm

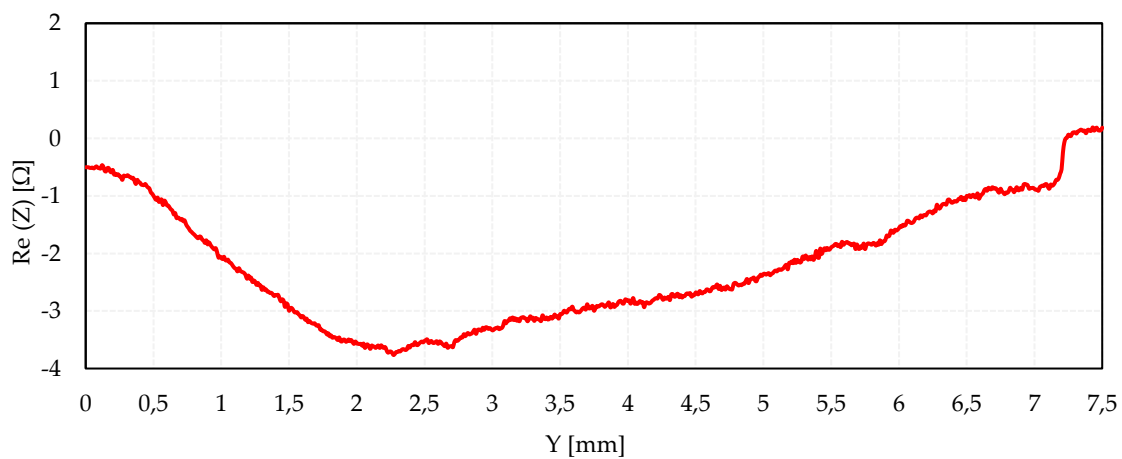


Figura A.14 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing 2$ mm)

A.15 Ensaio de CI a 500 kHz com pino de $\varnothing = 2$ mm

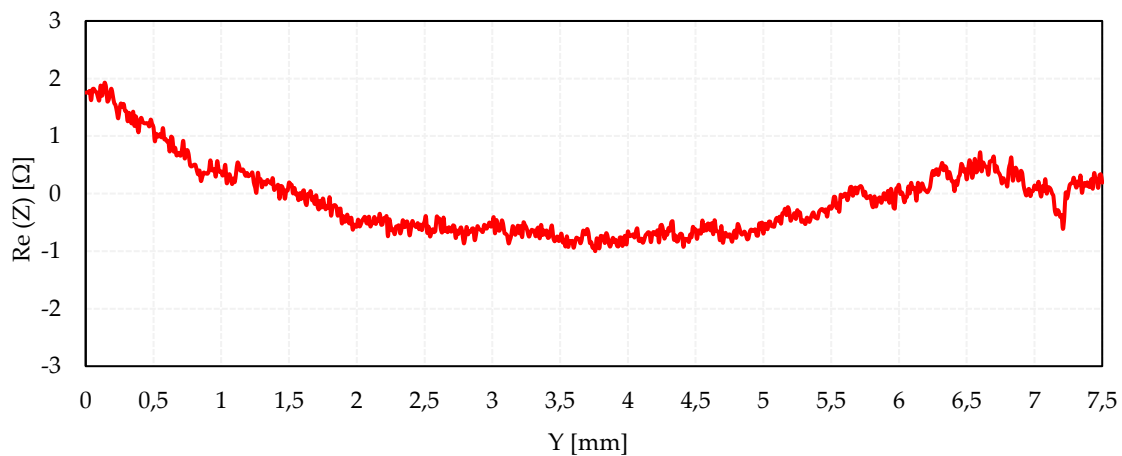


Figura A.15 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 2$ mm)

A.16 Ensaio de CI a 5 kHz com pino de $\varnothing = 1$ mm

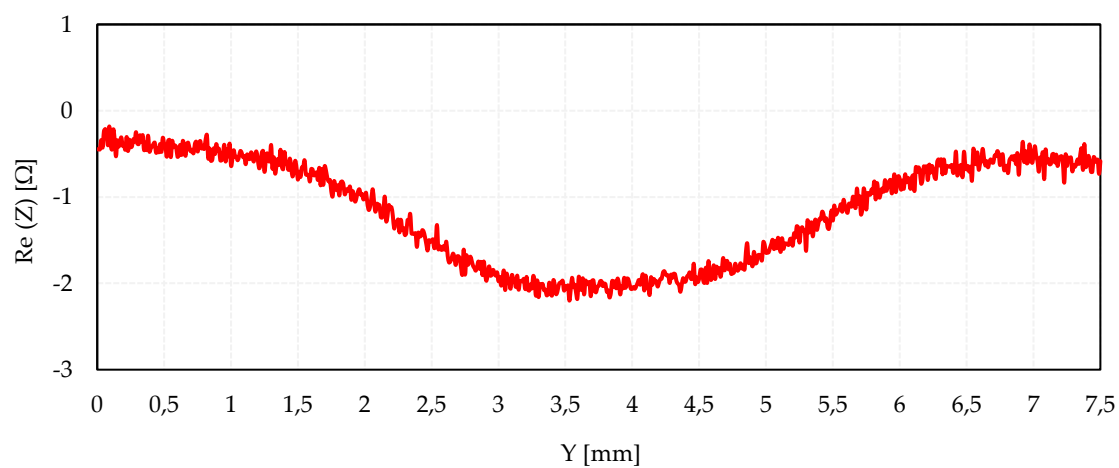


Figura A.16 - Ensaio de CI a 5 kHz ($\varnothing = 1$ mm)

A.17 Ensaio de CI a 50 kHz com pino de $\varnothing = 1$ mm

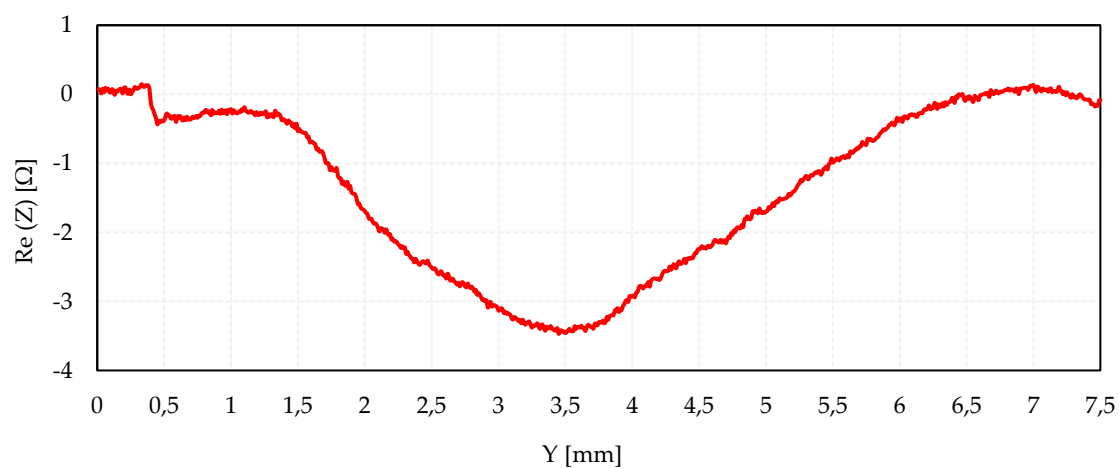


Figura A.17 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 1$ mm)

A.18 Ensaio de CI a 100 kHz com pino de $\varnothing = 1$ mm

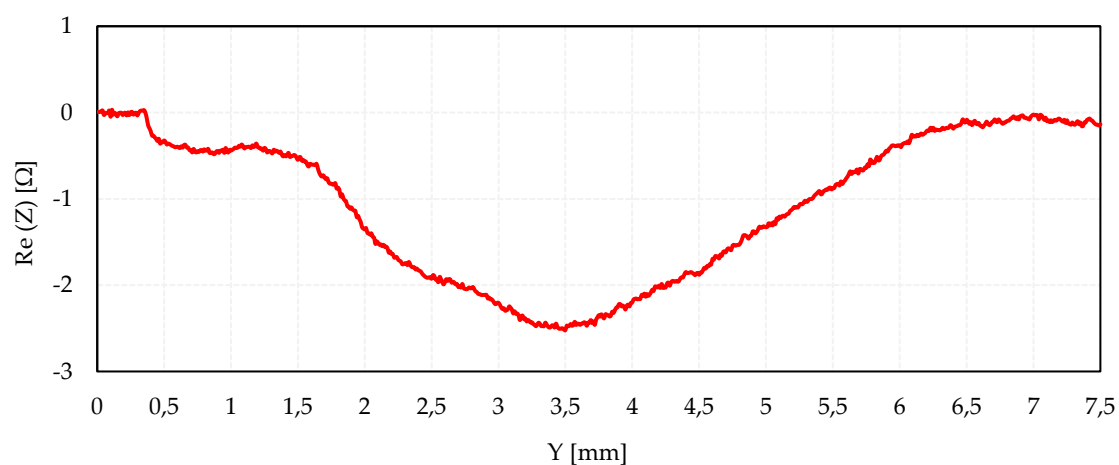


Figura A.18 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing = 1$ mm)

A.19 Ensaio de CI a 500 kHz com pino de $\varnothing = 1$ mm

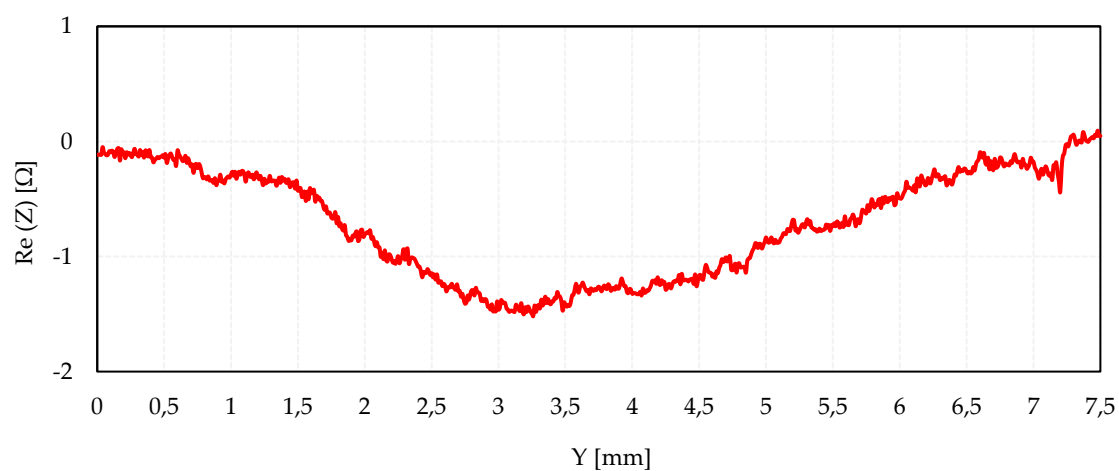


Figura A.19 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 1$ mm)

A.20 Ensaio de CI a 50 kHz com pino de $\varnothing = 0.5$ mm

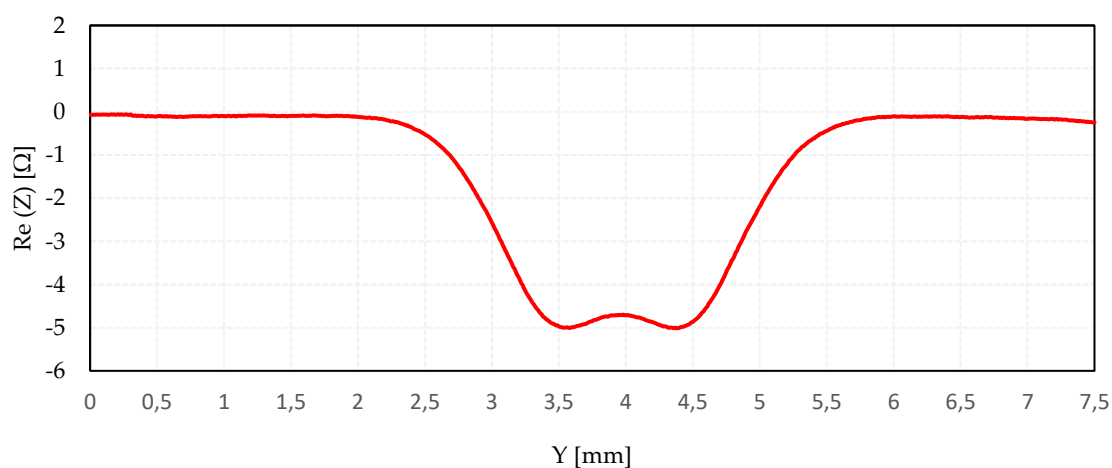


Figura A.20 - Ensaio de CI a 50 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm)

A.21 Ensaio de CI a 100 kHz com pino de $\varnothing = 0.5$ mm

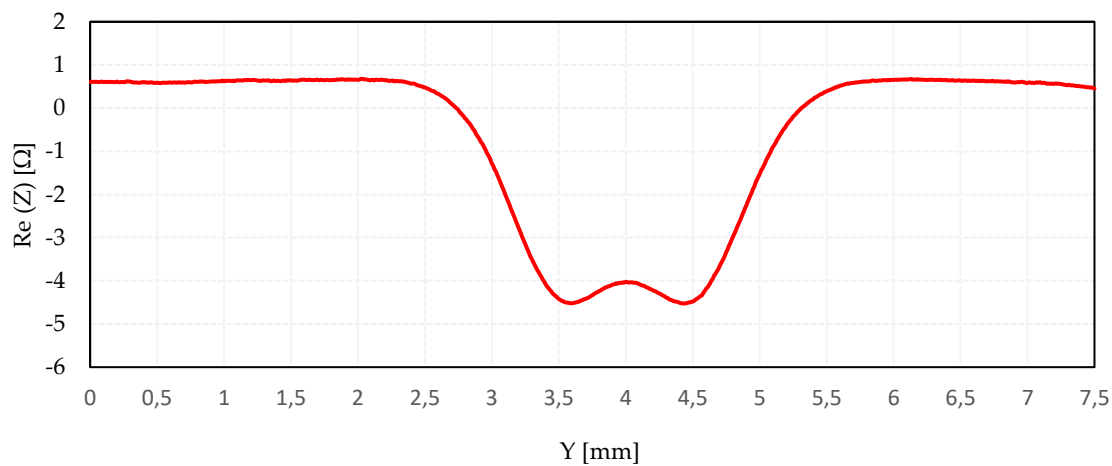


Figura A.21 - Ensaio de CI a 100 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm)

A.22 Ensaio de CI a 500 kHz com pino de $\varnothing = 0.5$ mm

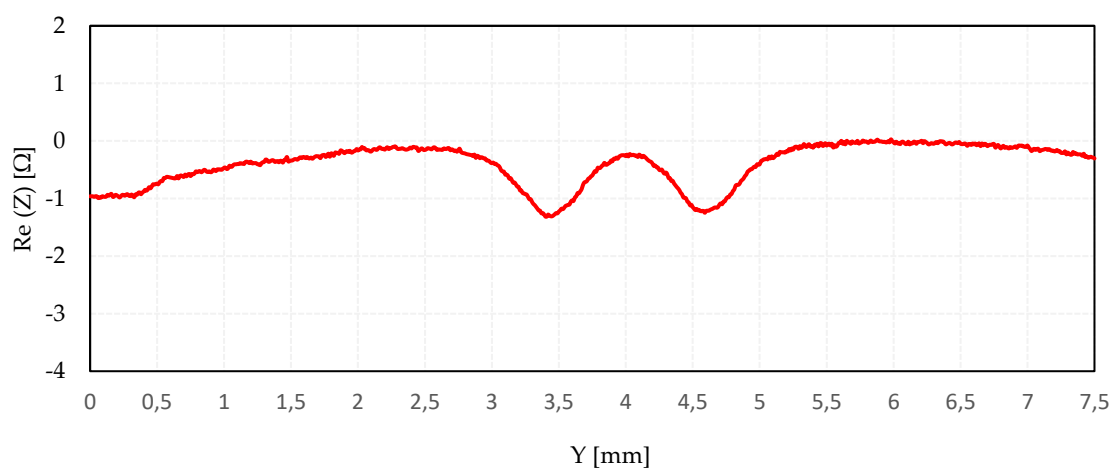


Figura A.22 - Ensaio de CI a 500 kHz ($\varnothing = 0.5$ mm)

A.23 Frequência obtidas para ensaios de ultra-sons

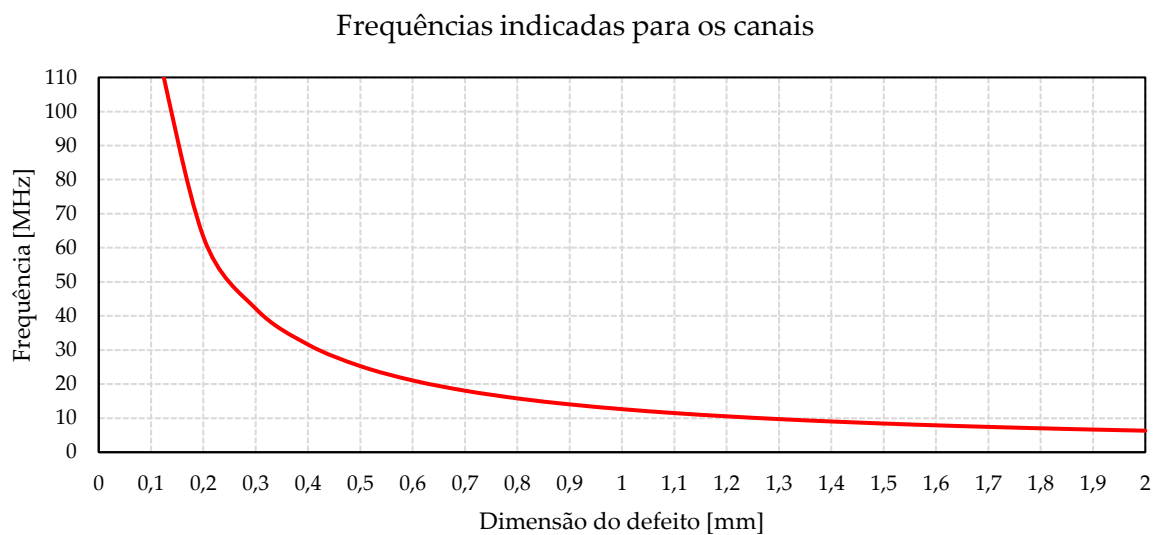


Figura A.23 - Gráfico das frequências obtidas (US)

A.24 Dados para cálculo da distância à parede inferior

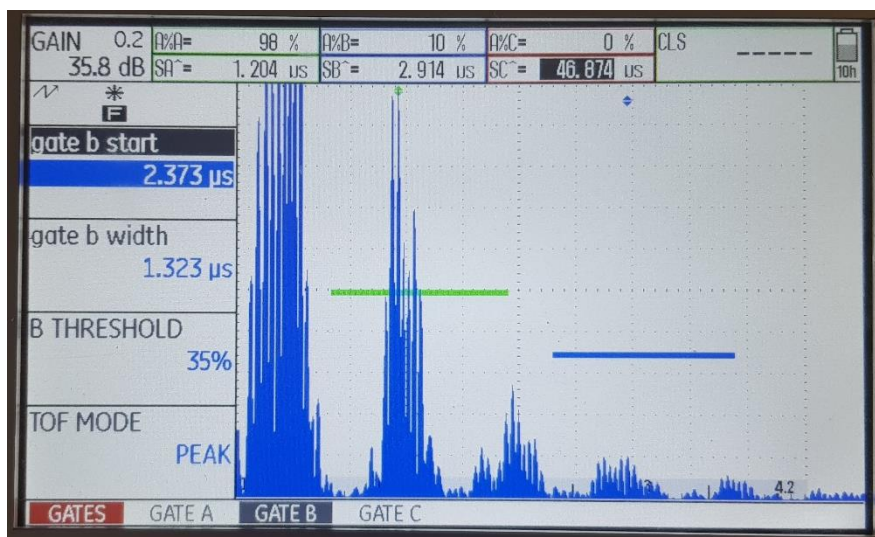


Figura A.24 - Dados para cálculo da distância à parede inferior

A.25 Dados para cálculo da distância à parede superior

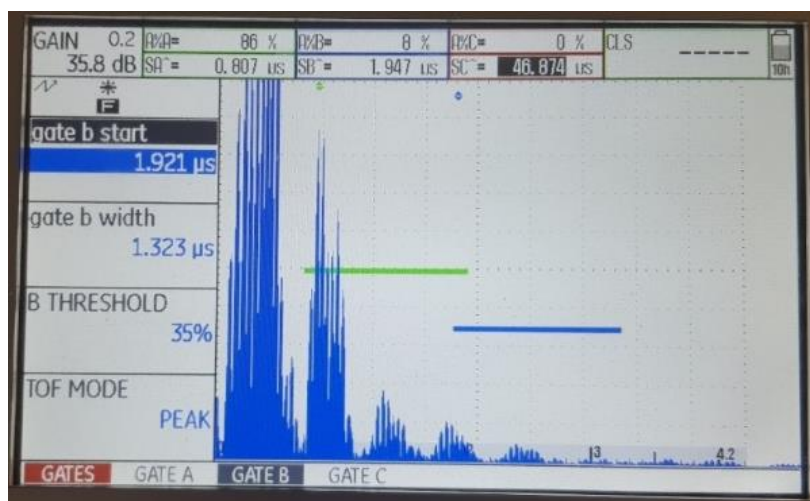


Figura A.25 - Dados para cálculo da distância à parede superior

A.26 Campo próximo $\varnothing = 2$ mm

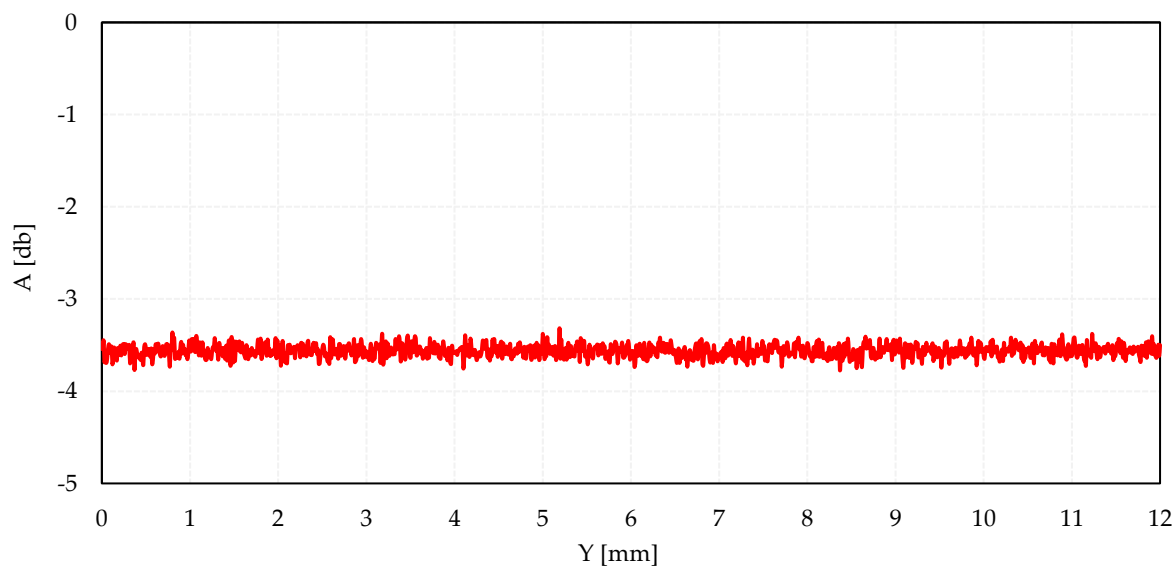


Figura A.26 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 2$ mm

A.27 Campo próximo $\varnothing = 1$ mm

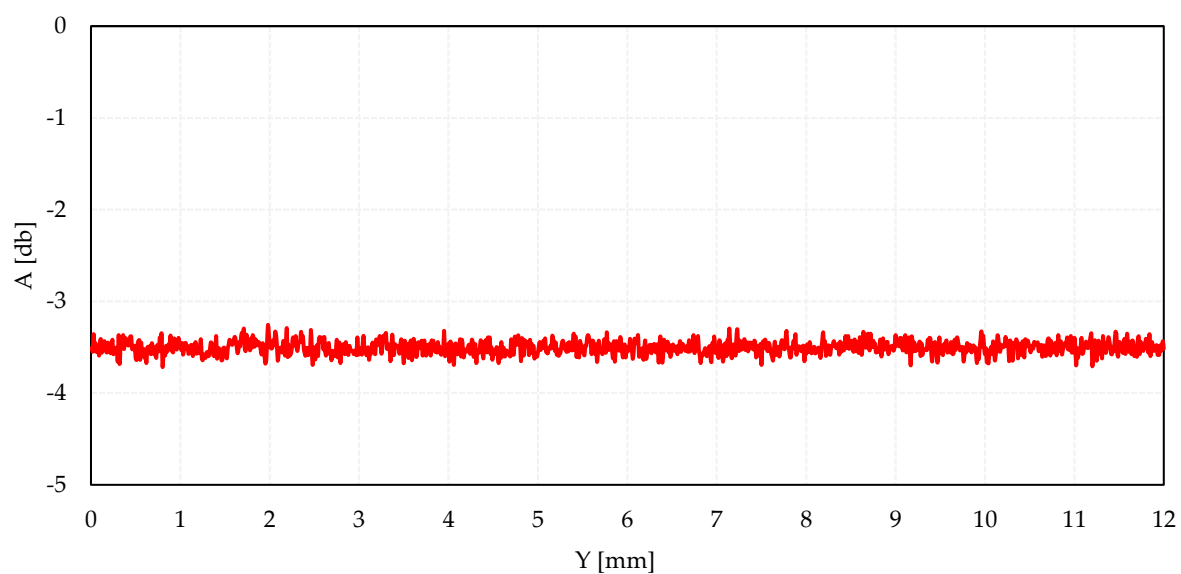


Figura A.27 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 1$ mm

A.28 Campo próximo $\varnothing = 0.5$ mm

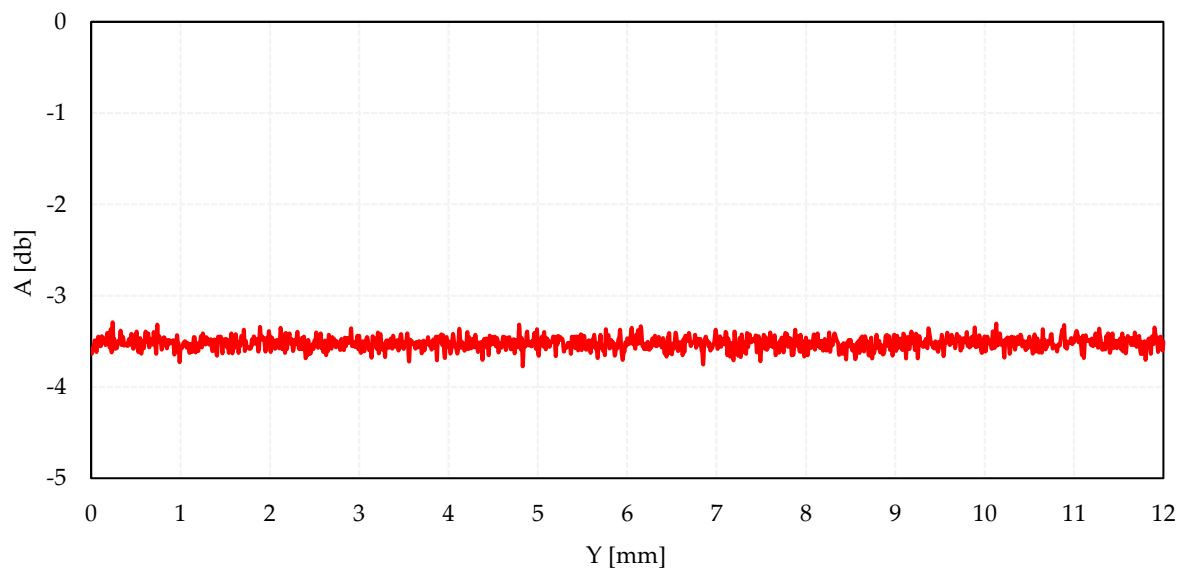


Figura A.28 - Resultado do canal com pino de $\varnothing = 0.5$ mm

