



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DINIS MANUEL GONÇALVES ROMÃO

Licenciado em Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUIVAS PARA A INSPEÇÃO DE COMPONENTES PRODUZIDOS POR WAAM: ULTRASSONS E CORRENTES INDUZIDAS

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Universidade NOVA de Lisboa 2022



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUIVAS PARA A INSPEÇÃO DE COMPONENTES PRODUZIDOS POR WAAM: ULTRASSONS E CORRENTES INDUZIDAS

Dinis Manuel Gonçalves Romão
Licenciado em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Catedrático, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Doutor Miguel Araújo Machado,
Professora Auxiliar Convidado, FCT-NOVA
Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Professor Catedrático, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro 2022

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE ULTRASSONS E CORRENTES INDUZIDAS PARA A INSPEÇÃO DE WAAM

Copyright © Dinis Romão, 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 importantes apoios e incentivos, sem os quais esta não se teria tornado uma realidade e aos quais estou eternamente grato.

Quero agradecer ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos pelo acompanhamento dado ao longo de todo este trabalho, pelo entusiasmo que dedicou, pelo esclarecimento de todas as dúvidas, debates de ideias, críticas, correções e sugestões que permitiram a conclusão deste trabalho.

Um profundo agradecimento a todos os docentes, alunos de doutoramento e técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, nomeadamente da área de Tecnologia Industrial, pela constante disponibilidade, ajuda indispensável e partilha de conhecimentos.

A todos os meus amigos da faculdade por me terem acompanhado e tornado este percurso académico mais divertido e interessante.

Aos meus amigos já de algum tempo, por estarem lá para me distrair e tornar o estudo mais lento e desafiante.

Agradeço à minha amiga Inês Sabino que teve a paciência para ler e corrigir pormenores da minha tese, apesar de ter uma tese para fazer.

Um agradecimento especial a minha família, pelo seu apoio incondicional e incentivo que permitiram que esta tese fosse possível.

Agradeço à minha impecável namorada, Mariana Mendes, por ter tido a paciência de me aturar que não é tarefa fácil, e também por ter estado sempre lá para mim com palavras de incentivo que sempre me animaram.

Uma nota de agradecimento à Empresa CTS | Ferroperm™ Piezoceramics, pela gentileza da cedência de várias amostras de Piezoelétricos.

Agradeço o apoio financeiro concedido pelo European Institute of Innovation and Technology (EIT) RawMaterials, através do projeto Smart WAAM: Microstructural Engineering and Integrated Non-Destructive Testing. O EIT, enquanto organismo da União Europeia, recebe financiamento através do programa European Union's Horizon 2020 research and innovation.

RESUMO

. O *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é um processo de fabrico aditivo que tem suscitado interesse a nível da investigação. A implementação deste processo na indústria está dependente do sucesso da aplicação dos Ensaios não Destrutivos (END), algo que ainda acarreta algumas dificuldades. Os END são métodos que permitem identificar e avaliar defeitos em materiais sem danificar os componentes

O objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver sondas de Ultrassons e Correntes Induzidas para inspecionar componentes produzidos por WAAM inline.

Para tal, foram criadas sete sondas de ultrassons direitas, com sete piezoelétricos diferentes. Realizou-se uma caracterização para cada etapa de construção das sondas. Foi efetuada uma prova de conceito para cada sonda, bem como ensaios por contacto e por imersão em cordões de WAAM *hot-forging*. Procedeu-se à conceção e à caracterização de duas sondas de correntes induzidas absolutas, e à realização de ensaios com estas sondas em peças WAAM com defeitos.

Os resultados obtidos demonstraram que as sondas de ultrassons por contacto não permitiram a deteção de defeitos, enquanto nos ensaios por imersão isso foi possível. Com as correntes induzidas foram identificados defeitos fabricados que consistiam num furo de 2mm de diâmetro, embora com baixa relação sinal-ruído. Estes resultados mostram a necessidade de desenvolvimento de outras sondas, com um maior número de bobinas em diferentes direções.

PALAVRAS-CHAVE

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Ensaio Não Destrutivo (END)

Correntes Induzidas (CI)

Ultrassons (US)

Defeitos

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is an additive manufacturing process that has raised research interest. The implementation of this process in industry is dependent on the successful application of non-destructive testing (NDT), something that still entails some difficulties. NDT are methods that allow the identification and evaluation of defects in materials without damaging the components.

The objective of this work was to develop Ultrasonic and eddy Current probes to inspect components produced by inline WAAM.

To this end, seven straight ultrasonic probes were created, with seven different piezoelectrics. A characterization was performed for each stage of construction of the probes. A proof of concept was carried out for each probe, as well as contact and immersion tests on WAAM hot-forging strands. Two absolute eddy current probes were designed and characterized, and tests were performed with these probes on defective WAAM parts.

The results obtained showed that the contact ultrasonic probes did not allow the detection of defects, while in the immersion tests this was possible. With the eddy currents, fabricated defects consisting of a 2mm diameter hole were identified, although with a low signal-to-noise ratio. These results show the need for the development of other probes, with a larger number of coils in different directions.

KEY-WORDS

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Non-Destructive Testing (NDT)

Eddy Currents (EC)

Ultrasounds (US)

Defects

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
PALAVRAS-CHAVE	ix
ABSTRACT	xi
KEY-WORDS.....	xi
ÍNDICE.....	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ANEXOS	xviii
NOMENCLATURA	xix
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Estado da Arte e Motivação	1
1.2 – Objetivo	1
1.3 – Metodologia	1
1.4 – Estrutura da Dissertação	2
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 – Fabrico aditivo	3
2.2 – <i>Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)</i>	4
2.2.1 – Classificação do Processo WAAM.....	5
2.2.2 – Planeamento do processo WAAM.....	9
2.2.3 – Principais defeitos.....	10
2.3 – Ensaio Não Destrutivo.....	11
2.3.1 – Ultrassons	12
2.3.2 – Correntes Induzidas	16
2.4 – Síntese do Capítulo.....	21
3 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE US	23
3.1 – Introdução	23
3.2 – Componentes da Sondas.....	23
3.2.1 – Calço.....	23
3.2.2 – Piezoelétricos.....	26
3.2.3 – Chassi e isolante.....	29
3.2.4 – Amortecimento.....	30
3.3 – Produção das Sondas de US	31
3.3.1 – Produção do calço.....	31
3.3.2 – Colagem do calço	32
3.3.3 – Preparação dos Piezoelétricos.....	33

3.3.4 – Montar chassi e isolante	34
3.3.5 – Aplicar o amortecimento	35
3.3.6 – Sondas e cabo	36
3.4 – Conclusões e Caracterizações.....	37
3.4.1 - Comparação da caracterização de 2 piezoelétricos soldados com condições diferentes.....	37
3.4.2 – Comparação da caracterização dos piezoelétricos.....	38
3.4.3 – Comparação da sonda em cada etapa.....	39
4 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE CI.....	41
4.1 – Introdução	41
4.2 – Produção das Bobinas	41
5 – CRIAÇÃO DE PROVETES.....	45
5.1 – Defeitos no fabrico	45
5.2 – Defeitos na peça	46
6 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	49
6.1 – Introdução	49
6.2 – Resultados das Sondas de Ultrassons	49
6.2.1 - Caracterização das sondas no ar	49
6.2.2 - Caracterização das sondas em placas padrão de aço e de alumínio.....	51
6.2.3 - Inspeção de cordão WAAM <i>Hot Forging</i> por Contacto	53
6.2.4 - Inspeção de cordão WAAM <i>Hot Forging</i> por imersão.....	54
6.3 – Resultados das Sondas de Correntes Induzidas	58
6.3.1 Inspeção num cordão de WAAM com defeitos.....	59
7 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	63
7.1 – Introdução	63
7.2 – Conclusões.....	63
7.2.1 – Conclusões obtidas através dos ensaios de ultrassons	63
7.2.2 – Conclusões obtidas através dos ensaios de correntes induzidas	63
7.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros.....	64
7.3.1 – Desenvolvimentos futuros para o método de ultrassons no WAAM.....	64
7.3.2 – Desenvolvimentos futuros para o método de correntes induzidas no WAAM...	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	69
Anexo 1 – Informações dos piezoelétricos Pz27	70
Anexo 2 – Informações dos piezoelétricos Pz29.....	71
Anexo 3 – Informações dos piezoelétricos PIC255	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática de um sistema de banho de pó. Retirado de [2].	3
Figura 2.2 - a) Representação esquemática de um sistema de alimentação por pó. b) Representação esquemática de um sistema de alimentação por fio. Retirado de [2].	4
Figura 2.3 - Esquemática do processo WAAM [3]	5
Figura 2.4- a) Esquema do sistema WAAM GMAW-based [7]; b) Esquema do processo de soldadura GMAW.	6
Figura 2.5 - a) Esquema do sistema WAAM GTAW-based; b) Esquema do processo de soldadura GTAW [8].	6
Figura 2.6 - Esquema do processo de soldadura PAW [9].	7
Figura 2.7- Representação esquemática do set-up da variante CMT based WAAM [12].	8
Figura 2.8- Representação Esquemática da área forjada em cada passo. a) Perspetiva isométrica b) Vista de planta [13].	8
Figura 2.9 - Representação esquemática do processo DE-GMAW [14].	9
Figura 2.10 - a) Colapso lateral; b) Fio de alimentação não fundido. Retirado de [17]	10
Figura 2.11 - Distorção de uma peça produzida por WAAM [17].	11
Figura 2.12 - Sinal de ultrassons gerado pela técnica de eco pulsado [20].	12
Figura 2.13 - Transdutor de US [20].	13
Figura 2.14 - Esquema para testagem de US com a sonda debaixo do substrato [25].	15
Figura 2.15 - Princípio de operação do END de CI [26].	16
Figura 2.16 - Plano de impedância de CI [26].	16
Figura 2.17 - Influência da frequência na penetração das correntes [28].	17
Figura 2.18 - Efeito de bordo nas CI [31].	19
Figura 2.19 - Campo magnético de uma IONic Probe (à esquerda) com o de uma sonda convencional (à direita). [18].	19
Figura 2.20- Protótipo de uma IONic Probe adaptada à curvatura da peça produzida por WAAM. Vista frontal (a) e vista lateral (b). Retirado de [18].	20
Figura 2.21- Comparação entre os resultados obtidos com uma sonda comercial (linha preta) e uma IONic Probe (linha vermelha) a 1 mm de profundidade (a) e 2 mm de profundidade (b). Retirado de [18].	20
Figura 2.22- Resultados da influência do lift-off na capacidade da sonda customizada. Retirado de [18].	21
Figura 3.1 – Piezoelétricos selecionados para a produção das sondas.	29

Figura 3.2 - Chassi.	30
Figura 3.3 - Amortecimento.	31
Figura 3.4 – Pó de tungstênio.	31
Figura 3.5 - Produção do calço: a) torneamento do varão b) Maquinação da reentrância c) calço.	32
Figura 3.6 - Calço colado no piezoelétrico.	32
Figura 3.7 - Configuração de soldadura a) Local de soldadura b) Base de soldadura	33
Figura 3.8 - Soldadura do piezoelétrico a) piezoelétrico b) momento da soldadura c) lado 1 d) lado 2.	34
Figura 3.9 - Piezoelétricos soldados: a) Soldado a olho nu b) Soldado com a montagem.	34
Figura 3.10 - Isolante no calço	35
Figura 3.11 - Montagem chassi, calço, piezoelétrico e isolante.	35
Figura 3.12 - Aplicação do amortecimento.	36
Figura 3.13 - Sondas construídas no laboratório.	36
Figura 3.14 - Cabo utilizado nas sondas de US.	37
Figura 3.15 - Comparação da caracterização de 2 piezoelétricos soldados com condições diferentes.	38
Figura 3.16 - Comparação da caracterização dos diferentes piezoelétricos.	39
Figura 3.17 - Comparação da caracterização dos diferentes componentes da sonda.	40
Figura 4.1 – <i>Set up</i> para a produção de Bobinas: 1) número total de enrolamentos, 2) número de enrolamentos efetuados, 3) percentagem da velocidade aplicada pelo utilizador, 4) Pedais 1 e 2, dependendo do sentido de rotação desejado, 5) Seleção do driver.	42
Figura 4.2 - Planos de Impedância da Bobina de 50 espiras.	43
Figura 4.3 - Planos de Impedância da Bobina de 200 espiras.	43
Figura 5.1 - Produção de um provete WAAM com porosidades e vazios.	45
Figura 5.2 - Provete com um furo para inspeção por US.	46
Figura 5.3 - Provete com furos para a inspeção por CI.	46
Figura 5.4 - Provete de WAAM maquinado.	47
Figura 6.1 - Configuração ensaios de US por contacto.	49
Figura 6.2 - A-scan no ar: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.	50
Figura 6.3 - A-scan no alumínio: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz	

g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz	
j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.....	51
Figura 6.4 - A-scan no aço: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.	52
Figura 6.5 - A-scan no ar: a) Sonda 5 mm 10 MHz b) Sonda 6,35 mm 6 MHz	53
Figura 6.6 - A-scan no cordão de WAAM sem defeitos: a) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz b) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz c) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz d) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.....	54
Figura 6.7 - Configuração dos ensaios de US por imersão.	55
Figura 6.8 – Modelo do suporte sondas de US.....	55
Figura 6.9 - Placa padrão com defeito: a) defeito para cima b) defeito para baixo.....	56
Figura 6.10 - Sinal de inspeção da placa padrão: a) placa com o defeito virado para cima b) placa com o defeito virado para baixo.....	56
Figura 6.11 - Sinal do ensaio de US a um provete WAAM <i>Hot Forging</i> com um furo.	57
Figura 6.12 - Configuração ensaios de CI.....	58
Figura 6.13 - Modelo do suporte de sondas de CI.....	58
Figura 6.14 - Esquema dos ensaios de CI.	59
Figura 6.15 – Sinal do ensaio de CI com a sonda de 50 espiras.....	59
Figura 6.16 -Sinal dos ensaios de CI com a sonda de 200 espiras.	60
Figura 6.17- Sinal dos ensaios de CI com a sonda comercial.	60
Figura 7.1 - Esquema de ensaio com 3 bobinas.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação das diferentes técnicas WAAM. Adaptado de [6].....	7
Tabela 2.2- Profundidade de penetração de 36.8% e a gama de frequências passível de utilizar[29].....	18
Tabela 3.1 - Características comuns a todas as sondas desenvolvidas.....	23
Tabela 3.2 - Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 20 MHz e 5 mm de diâmetro.....	24
Tabela 3.3- Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 4 MHz e 10 mm de diâmetro.....	25

Tabela 3.4- Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 10 MHz e 6,35 mm de diâmetro.....	25
Tabela 3.5 - Cálculo do campo próximo.....	26
Tabela 3.6 - Características do piezoelétricos.....	28
Tabela 3.7 - Material, frequência e diâmetro dos piezoelétricos selecionados.....	29
Tabela 4.1 - %IACS.....	42

LISTA DE ANEXOS

A 1 - Informações dos piezoelétricos Pz27[34].	70
A 2 - Informações dos piezoelétricos Pz29 [35].	71
A 3 - Informações dos piezoelétricos PIC255 [36].	72

NOMENCLATURA

\vec{Z}	Vetor impedância elétrica [Ω]
f	Frequência [Hz]
$Im(\vec{Z})$	Parte imaginária do vetor impedância elétrica [Ω]
$Re(\vec{Z})$	Parte real do vetor impedância elétrica [Ω]
X, x	Comprimento [m]
\varnothing	Diâmetro [m]
δ	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
σ	Condutividade elétrica [S·m ⁻¹] ou [% IACS]
CI	Correntes Induzidas
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EC	<i>Eddy Currents</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
H_p	Campo magnético primário
H_s	Campo magnético secundário
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US	Ultrassons

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Estado da Arte e Motivação

O *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é um processo de Fabrico Aditivo (FA) que apresenta elevadas taxas de deposição com uma eficiência elevada. À semelhança do que ocorre em outros processos de fabrico, é comum terem defeitos associados ao processo, sendo que podem estar incluídos na matéria-prima ou, então, ser formados nas fases de processamento e produção.

É importante detetar e conhecer os defeitos através de uma inspeção do processo que não comprometa a integridade dos mesmos, ou seja, através de Ensaio Não Destrutivo (END), como é o caso do método de correntes induzidas (CI) e dos Ultrassons (US).

A investigação e a implementação de sondas de END auxiliam o desenvolvimento da tecnologia e proporcionam uma maior implementação do processo de fabrico na indústria.

1.2 – Objetivo

O objetivo desta dissertação consiste em desenvolver sondas de CI e de US customizadas para aumentar a fiabilidade da inspeção de peças produzidas por WAAM, através de ensaios que não comprometam nem a integridade nem a funcionalidade do componente a examinar.

Desta forma, o objetivo encontra-se dividido em duas partes: uma de carácter tecnológico e outra de carácter mais científico. A primeira parte consiste na conceção, no desenvolvimento e na produção de sondas de correntes induzidas dedicadas à inspeção do componente produzido pela vertente convencional do WAAM, bem como sondas de ultrassons dedicadas à inspeção do componente produzido pela vertente *Hot-Forging* do WAAM. Ambas as sondas têm como objetivo detetar defeitos nos diferentes materiais resultantes do processo. O outro objetivo, de carácter mais científico, está relacionado com a descrição e a interpretação dos fenómenos envolvidos na inspeção do WAAM, a análise dos resultados, e a avaliação da fiabilidade das técnicas testadas.

1.3 – Metodologia

De forma a atingir os objetivos referidos, foi necessário recorrer a prototipagem e a testes experimentais, com o intuito de obter uma prova de conceito das sondas produzidas. Verificou-se, a partir de ensaios experimentais, se as mesmas permitem identificar defeitos sub superficiais e internos, como porosidades, falta de fusão, inclusões fissuras, salpicos, entre outros, num provete produzido por sucessivas deposições por WAAM.

Assim, foi concebida uma sonda de ultrassons do tipo eco pulsado para inspecionar peças resultantes do processo WAAM na vertente *Hot-Forging*. Outra sonda, esta de correntes induzidas, foi concebida para inspecionar as peças resultantes do processo WAAM. As sondas foram produzidas e testadas no laboratório de ensaios não destrutivos do DEMI na FCT-UNL.

1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, ao longo dos quais se faz referência às matérias abordadas.

-No capítulo 1, de carácter introdutório, é descrita a motivação, os objetivos e a metodologia do trabalho realizado.

-No capítulo 2 é apresentado o estado de arte de modo a perceber os desenvolvimentos nas áreas abordadas ao longo deste trabalho.

-No capítulo 3 são descritos os requisitos necessários e a metodologia utilizada na produção de sondas de Ultrassons.

-No capítulo 4 são descritos os requisitos necessários e a metodologia utilizada na produção de sondas de Correntes Induzidas.

-No capítulo 5 é descrita a metodologia utilizada na elaboração dos provetes e respetivos defeitos.

-No capítulo 6 são demonstrados os resultados obtidos experimentalmente através das diferentes técnicas de END avaliadas nesta dissertação.

-No capítulo 7 encontram-se as conclusões de todo o trabalho realizado, bem como propostas para desenvolvimentos futuros.

2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Fabrico aditivo

O Fabrico Aditivo (FA) é o processo de criar peças em três dimensões através da deposição sucessiva de material, camada a camada, seja este metal, plástico, compósito ou cerâmico [1]. Geralmente, o processo é realizado a partir de modelos tridimensionais desenhados em computador e, devido aos avanços tecnológicos que se tem observado nos últimos anos, tem ganho elevada relevância na indústria por permitir a criação rápida de peças únicas, *Rapid Prototyping*, de forma económica. No entanto, os fenómenos físicos que ocorrem durante o processo têm um grande impacto na qualidade do produto final produzido, devendo então ser tidos em conta durante o seu projeto.

Nos metais, os processos de FA podem ser divididos em termos de material de alimentação, fonte de energia, volume, entre outros. Assim, podem-se dividir em três amplas categorias: sistemas de banho de pó, alimentação por pó e alimentação por fio. Como nenhuma técnica concilia todas as vantagens em simultâneo, o tipo de processo de fabrico tem de ser escolhido com base na aplicação pretendida.

Os sistemas de banho de pó são utilizados na produção de volumes reduzidos, geralmente, não superiores a $0,03 \text{ m}^3$ [2]. Neste tipo de sistemas a fonte de energia fornece energia à superfície do banho de fusão ou origina a sinterização do pó para obter a forma desejada. Pó adicional é varrido ao longo da área de trabalho e o processo repete-se até formar o produto final.

Este tipo de sistemas tem como principais vantagens a capacidade de produzir formas complexas e de permitir um bom controlo dimensional. Na Figura 2.1, representa-se um esquema de um sistema deste género.

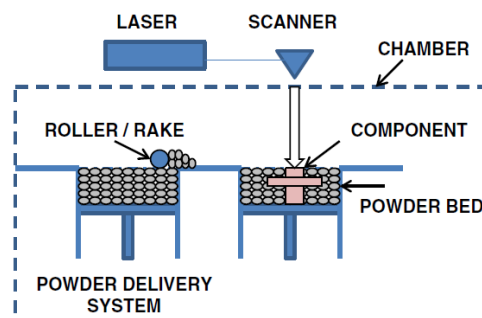


Figura 2.1 - Representação esquemática de um sistema de banho de pó. Retirado de [2].

Os sistemas de alimentação por pó, quando comparados com os de banho de pó, permitem a produção de volumes maiores. Nestes sistemas, o pó é transportado através de um bocal e um laser é utilizado para formar uma camada com a forma desejada, sendo este processo repetido sucessivamente até criar uma forma tridimensional.

As principais vantagens deste tipo de sistemas são, como referido anteriormente, a capacidade de produzir maiores volumes e o facto de permitir, não só criar novas peças, como também reparar componentes gastos ou danificados [2]. Na Figura 2.2 a), apresenta-se novamente um esquema de um sistema de alimentação por pó.

Os sistemas de alimentação por fio, também ilustrados na Figura 2.2 b), utilizam, como o nome indica, um fio como alimentação e a fonte de energia pode ser de variados tipos, nomeadamente, feixe de laser, feixe de eletrões ou arco elétrico. O processo consiste na deposição de uma camada de material inicial, seguida de sucessivas passagens até formar uma estrutura com três dimensões.

As principais vantagens deste tipo de sistemas incluem uma elevada taxa de deposição e a capacidade de produzir volumes de elevadas dimensões, no entanto, associados estas características, apresentam piores resultados a nível de acabamentos que as duas categorias mencionadas anteriormente.

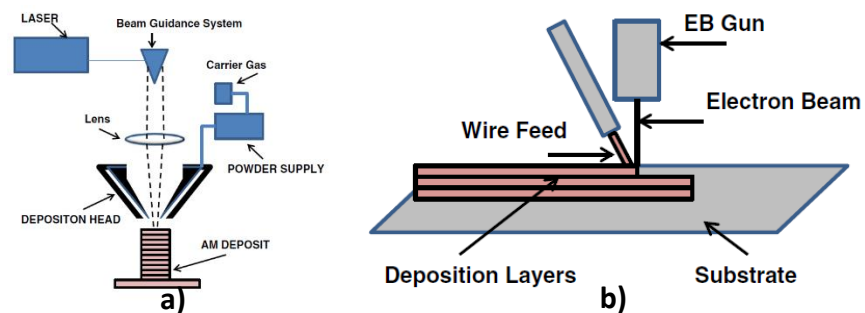


Figura 2.2 - a) Representação esquemática de um sistema de alimentação por pó. b) Representação esquemática de um sistema de alimentação por fio. Retirado de [2].

2.2 – Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

O processo de alimentação por fio em estudo neste trabalho será o WAAM. Este processo utiliza um arco elétrico como fonte de calor para depositar o material metálico camada a camada, conforme ilustrado na Figura 2.3[3].

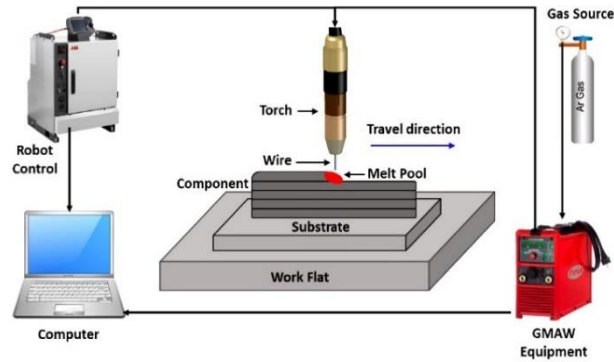


Figura 2.3 - Esquematização do processo WAAM [3]

Quando comparado com outros processos de FA de metais como o *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Laser Assisted Net Shaping* (LANS), que utilizam um laser para fundir o pó ou fio metálicos, ou o *Electron Beam Melting* (EBM), que utiliza um feixe de eletrões para o mesmo objetivo, observa-se que o WAAM apresenta elevadas taxas de deposição com uma eficiência elevada [4].

Apesar destas vantagens, quando comparando com os mesmos processos, notam-se algumas restrições a nível industrial, nomeadamente, na capacidade de produzir geometrias pequenas e complexas e o facto de apresentar piores acabamentos superficiais.

O processo WAAM apresenta taxas de arrefecimento mais baixas e, como já tinha sido referido anteriormente, elevadas taxas de deposição. Sendo isto benéfico para a maioria dos materiais comercializados [5], este processo torna-se ideal para a produção de estruturas de elevadas dimensões, sendo, por isso, muito interessante, por exemplo, a nível das indústrias Aeronáutica e Aeroespacial.

2.2.1 – Classificação do Processo WAAM

Com base na origem da fonte calor, é comum dividir-se o processo WAAM em três tipos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)-based, *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW)-based e *Plasma Arc Welding* (PAW)-based, isto é, recebendo o seu nome consoante a fonte de energia utilizada[6]. Cada uma destas categorias apresenta características específicas que se apresentam de seguida.

–*Gas Metal Arc Welding (GMAW)-based*

O GMAW, ou MIG, é um processo de soldadura onde o calor gerado resulta de um arco elétrico com um fio consumível protegido por um gás de proteção, fornecido externamente [7]. O processo WAAM baseado no GMAW, tipicamente, apresenta uma taxa de deposição relativamente elevada, mas uma menor estabilidade do arco elétrico que, conseqüentemente, leva a salpicos [6].

Um esquema deste tipo de processo pode ser observado na Figura 2.4.

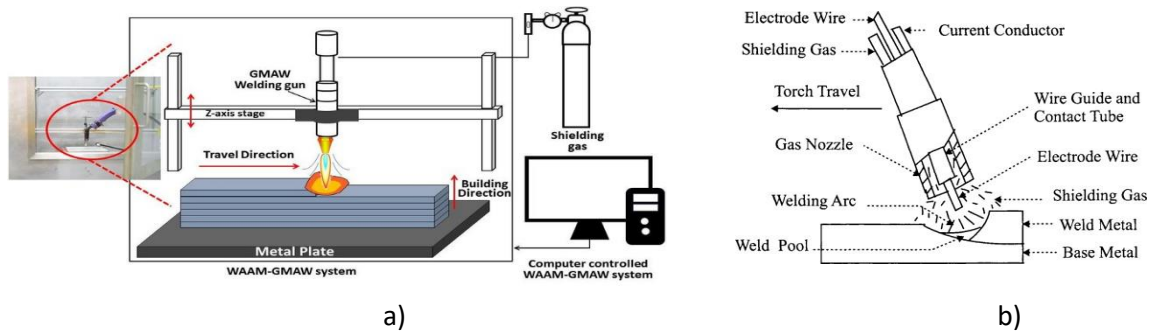


Figura 2.4- a) Esquema do sistema WAAM GMAW-based [7]; b) Esquema do processo de soldadura GMAW.

– *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)-based*

No GTAW, também chamado TIG, forma-se um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. Tal como no GMAW, é utilizado um gás inerte para proteger o banho de fusão. Esta variante do processo WAAM (Figura 2.5) apresenta menores taxas de deposição relativamente ao GMAW e a orientação do fio e da tocha necessitam de ser alteradas, sendo um método mais complexo. No entanto, novamente comparando com o tipo de processo anterior, cria menos fumos e apresenta melhor acabamento [8].

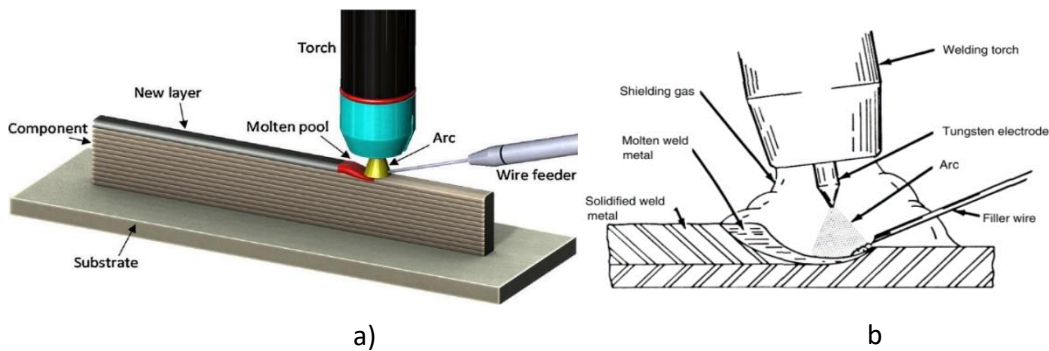


Figura 2.5 - a) Esquema do sistema WAAM GTAW-based; b) Esquema do processo de soldadura GTAW [8]

– *Plasma Arc Welding (PAW)-based*

Este processo deriva do processo *Gas Metal Arc Welding (GMAW)-based*, utilizando também um eletrodo não consumível de tungstênio. Utiliza uma tocha específica, que contém o eletrodo posicionado no centro, e é este eletrodo que irá gerar o arco elétrico. Sendo baseado no processo de soldadura anterior, apresenta características semelhantes [6][9].

Na Figura 2.6, apresenta-se, novamente, um esquema do processo de soldadura associado.

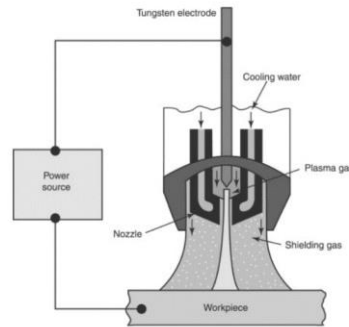


Figura 2.6 - Esquema do processo de soldadura PAW [9].

– Comparação entre os diferentes processos

A escolha da técnica a utilizar no WAAM influencia diretamente os parâmetros do processo. Na Tabela 2.1, apresenta-se um quadro resumo dos três tipos apresentados anteriormente.

Tabela 2.1 - Comparação das diferentes técnicas WAAM. Adaptado de [6]

WAAM	Fonte de Energia	Principais características
GMAW-based	GMAW	Elédrodo consumível Taxa de deposição: 3-4 kg/hora Arco elétrico pouco estável (salpicos)
GTAW-based	GTAW	Elédrodo não consumível Taxa de deposição: 1-2 kg/hora Rotação do fio e da tocha necessárias
PAW-based	Plasma	Elédrodo não consumível Taxa de deposição: 1-2 kg/hora Rotação do fio e da tocha necessárias

– Variantes do Processo WAAM

Com base nas três categorias apresentadas no capítulo anterior, surgem diferentes variantes do processo WAAM. De seguida apresentam-se, sucintamente, três variantes que demonstram a variedade de sistemas que já se encontram a ser desenvolvidos.

Cold Metal Transfer Based WAAM

Com base no processo GMAW, o *Cold Metal Transfer* (CMT) integra o movimento do fio de alimentação no processo de soldadura. Sempre que ocorre um curto-circuito, interrompe a fonte de energia e o fio retrai, ajudando assim na queda de gotas, podendo o metal ser depositado sem a ajuda de forças eletromagnéticas [10].

Como principais vantagens, este método apresenta baixa entrega térmica, arco estável que, conseqüentemente, leva a menos salpicos, reduzidos custos de equipamento ao mesmo tempo que apresenta elevadas taxas de deposição e boa precisão [11].

Na Figura 2.7, observa-se um esquema do *set-up* desta variante.

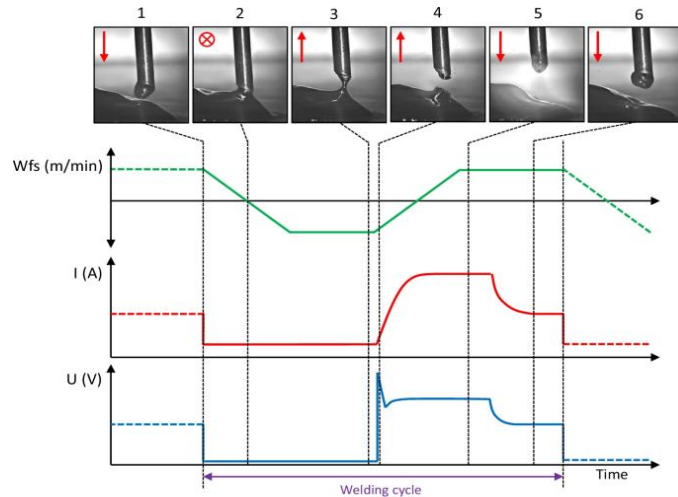


Figura 2.7- Representação esquemática do set-up da variante CMT based WAAM [12].

Hot Forging WAAM

O *Hot Forging WAAM* (HF-WAAM) é uma técnica que surge pela importância inerente de reduzir o tamanho de grão e a porosidade resultante do processo WAAM convencional. Uma maneira de responder a esta necessidade, já utilizada em outras aplicações, é aplicando pressão entre camadas depositadas. Assim, semelhante ao forjamento tradicional, o HF-WAAM utiliza um martelo dentro da tocha, como se pode verificar na Figura 2.8, ativado por um atuador eletromagnético ou mecânico, forjando a peça a temperaturas de cerca de 900 °C [13]. Este processo induz recristalização dinâmica do material e elimina poros que possam ter sido formados durante a deposição.

As vantagens desta técnica incluem forças de forjamento reduzidas e o refinamento da microestrutura da peça final, com melhoramentos a nível do comportamento mecânico do material.

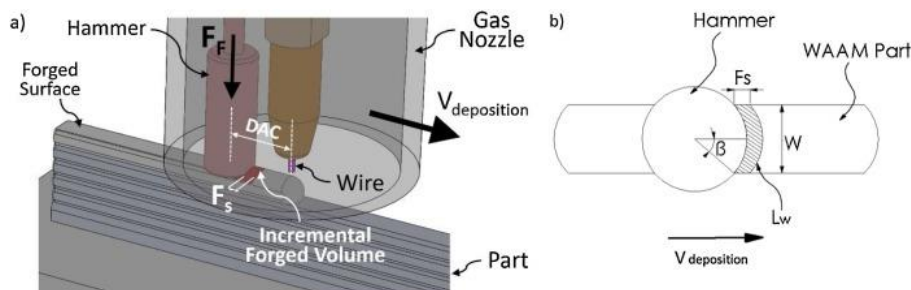


Figura 2.8- Representação Esquemática da área forjada em cada passo. a) Perspetiva isométrica b) Vista de planta [13].

Double Electrode GMAW

Com o intuito de aumentar a taxa de deposição, têm surgido várias tecnologias que têm por base o processo de soldadura GMAW, nomeadamente, o *Tandem* GMAW, que para este efeito utiliza dois fios de alimentação, e o *Variable-Polarity* GMAW, onde a polaridade do eléctrodo se altera periodicamente [14]. Tal como os processos anteriormente mencionados, também o *Double Electrode* GMAW (DE-GMAW) pretende aumentar a taxa de deposição sem aumentar a entrega térmica.

O DE-GMAW, ilustrado na Figura 2.9, consiste na existência de uma tocha de *bypass* que fornece um eléctrodo adicional para formar o arco de *bypass*. Num processo convencional, para aumentar a taxa de deposição, aumenta-se a corrente no eléctrodo e, sendo o arco formado apenas entre o eléctrodo e a peça, a entrega térmica aumenta também devido ao aumento de corrente na peça. Com a adição do arco de *bypass*, consegue-se que este aumento de corrente não seja proporcional à entrega térmica, obtendo assim, para as mesmas taxas de deposição, menores entregas térmicas.

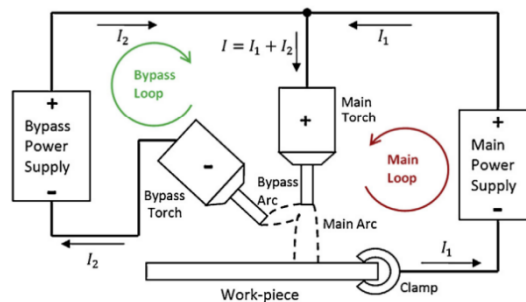


Figura 2.9 - Representação esquemática do processo DE-GMAW [14].

2.2.2 – Planeamento do processo WAAM

As peças produzidas através do processo WAAM, geralmente, apresentam uma geometria muito próxima da geometria final pretendida para a sua aplicação. No entanto, os acabamentos superficiais não são de elevada qualidade sendo muitas vezes necessária ainda uma maquinaria da peça. É importante então realizar um bom planeamento, de forma a colmatar ao máximo possíveis deficiências do processo, melhorando a qualidade final.

– Parâmetros de operação

Concluídas as etapas de modelação 3D e *slicing* e definida a trajetória da ferramenta, deve-se ter em atenção, tal como num processo de soldadura convencional, os diferentes parâmetros de operação a serem definidos. Para além de todos os parâmetros inerentes ao tipo de processo WAAM escolhido, como por exemplo, a fonte de energia, o tipo de arco elétrico, a utilização ou não de material de adição e/ou de gás de proteção, entre outros, devem ser definidos [4],[15],[16]:

- Diferença de potencial do arco [V] – determina o estado da zona de fusão. Obtém-se a profundidade de penetração ideal à d.d.p. ideal;
- Intensidade de corrente [A] – maior corrente, maior a profundidade de penetração da soldadura;
- Taxa de alimentação do fio [mm/min]
- Velocidade de avanço [mm/min] – maior a velocidade de avanço, menor taxa de deposição de material;
- Distância do fio à ponta de contacto [mm] – grandes distâncias originam más formas e pouca penetração. Deve manter-se constante;

2.2.3 – Principais defeitos

O processo WAAM, sendo similar ao processo de soldadura convencional, apresenta defeitos comuns como porosidades, falta de fusão, inclusões fissuras, salpicos, entre outros. Estes defeitos são mais frequentes quando existe um planeamento de processo inadequado, entrega térmica excessiva que leva a tensões residuais, contaminação por gás ou defeitos no fio de alimentação [17].

Sendo o WAAM um processo de fabrico aditivo, é expectável que também se encontrem defeitos na fusão entre camadas. Um defeito geralmente encontrado é o colapso lateral, representado na Figura 2.10 a), que ocorre por entrega térmica excessiva no início das camadas e devido à baixa dissipação de calor que existe no final de cada camada. Outro defeito, Figura 2.10 b), ocorre quando porções de fio não fundidas ficam presas à peça final.

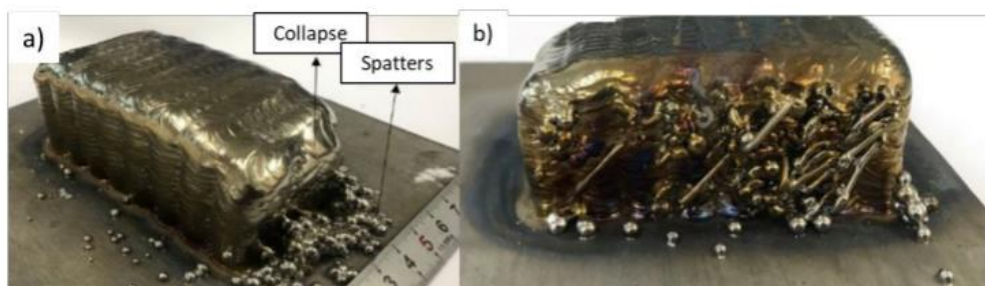


Figura 2.10 - a) Colapso lateral; b) Fio de alimentação não fundido. Retirado de [17] .

Para além destes dois, ainda podem surgir distorções após soltar a peça produzida devido à existência de gradientes térmicos durante o fabrico, conforme representado na Figura 2.11[17].

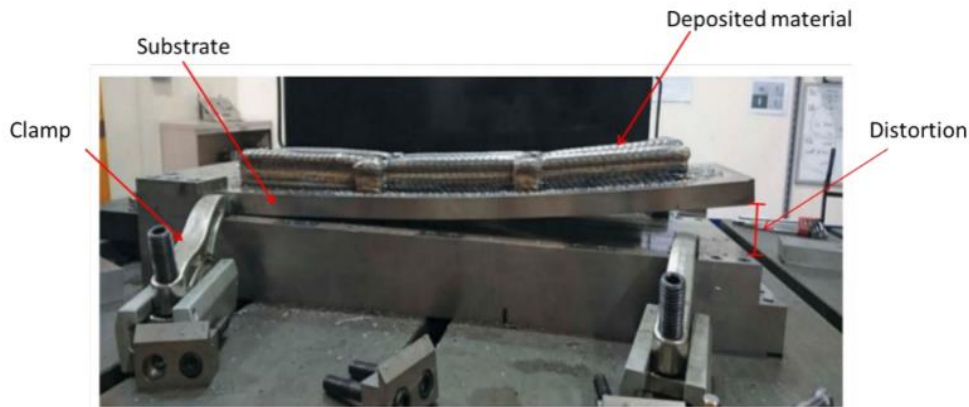


Figura 2.11 - Distorção de uma peça produzida por WAAM [17].

Sendo o WAAM uma tecnologia que, no passado recente, tem ganho uma enorme relevância na indústria, a importância de detectar defeitos é crucial para continuar esta tendência. Assim, é necessário o desenvolvimento de técnicas de Ensaios Não Destrutivos eficazes para garantir a integridade das peças produzidas.

2.3 – Ensaios Não Destrutivos

Ensaios não destrutivos (END) são métodos que envolvem a detecção e caracterização de defeitos, quer na superfície quer no interior de um componente, sem danificar de modo algum a componente física, química e mecânica do material em estudo. Os END fornecem um método de controle de qualidade de uma maneira mais viável economicamente uma vez que não é necessário danificar as peças.

Existem seis métodos de END distintos e várias técnicas de END diferentes, enquanto variantes tecnológicas de cada método. Estas podem ser usados em diversos materiais (metais, polímeros, compósitos, cerâmicos) e permitem identificar diferentes tipos de defeitos. Em muitos casos para detectar defeitos é necessário usar mais do que uma técnica de END, ou uma combinação de vários métodos. É, portanto, de extrema importância que se conheça os vários END, as suas aplicações, vantagens e desvantagens.

Um passo crucial para a garantia de qualidade das peças WAAM será o desenvolvimento de sistemas de Ensaios Não Destrutivos (END) confiáveis e que ocorram durante o processo capazes de identificar defeitos nas peças, que geralmente são causados por porosidade ou falta de fusão entre as camadas. A inspeção em tempo real das camadas depositadas é uma abordagem desejável para verificar a qualidade de cada camada e, quando uma camada não cumprir os requisitos, a eliminação imediata dos defeitos localizados pode ser organizada por um processo subtrativo complementar [18].

2.3.1 – Ultrassons

–Princípio de funcionamento

O END por Ultrassons (US) consiste na transmissão de ondas sonoras de elevada frequência (entre 1 e 50 MHz), quando estas ondas sonoras mudam de meio, uma percentagem da energia do sinal é transmitida enquanto outra parte é refletida [19]. É possível calcular essas percentagens tendo em conta a impedância acústica Z [$10^6 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$], a velocidade do som C [m/s] e a densidade ρ [Kg/m^3] utilizando as fórmulas (2.1) (2.2) (2.3).

$$Z = \rho \times C \quad 2.1$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad 2.2$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad 2.3$$

A técnica de eco pulsado consiste em contar o tempo desde que o pulso de ultrassom é gerado até quando ocorre a deteção do pulso ecoado.

É medida a diferença de tempo de chegada (Time Difference Of Arrival). Multiplicando o TDOA pela velocidade do som no dado material conhecido, calcula-se a distância total percorrida pela onda do ultrassom, que é o dobro da espessura do material. O pulso de ultrassom irá ecoar repetidamente no material até que a amplitude seja atenuada, conforme ilustrado na Figura 2.12.

O TDOA entre os ecos pode ser medido e calculado para obter uma leitura média da espessura do material. Na Figura 2.12 pode se observar um sinal de ultrassons gerado pela técnica de eco pulsado [20].

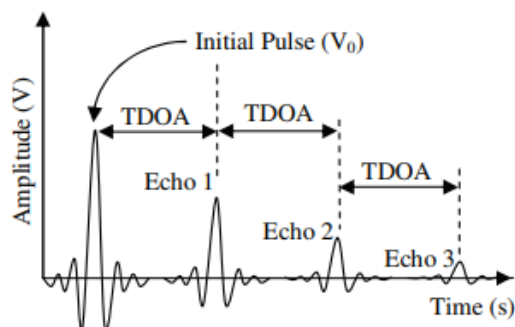


Figura 2.12 - Sinal de ultrassons gerado pela técnica de eco pulsado [20].

As ondas sonoras de elevada frequência são geradas quando o Piezoelétrico é excitado através da aplicação de uma tensão elétrica alternada, este vai expandir e comprimir, como dita a lei da piezoelectricidade, o que vai causar a vibração do elemento Piezoelétrico à frequência de ressonância designada [21].

A espessura do transdutor Piezoelétrico T_t [m] e a velocidade do som no transdutor Piezoelétrico C_t [m/s] determinam a frequência ressonante do transdutor f [s^{-1}], conforme descrito pela equação 2.4.

$$f = \frac{C_t}{2T_t} \quad 2.4$$

O material Piezoelétrico é polarizado pelo fabricante durante o processo de produção, de modo que os polos positivo e negativo são revestidos electrostaticamente com uma fina camada de prata para facilitar as conexões elétricas, para além disso, um material de amortecimento, ou material de apoio, são aplicadas na parte de trás do elemento Piezoelétrico para reduzir o número de ciclos ressonantes produzidos [20]. O material de apoio, no entanto, também amortece a amplitude do sinal da onda de ultrassom gerada, o que é um resultado indesejado. Com um amortecimento adequado, ou um número menor de ciclos produzidos, podemos alcançar uma resolução de medição mais alta para testar um material mais fino ou distinguir detalhes mais finos do material em teste [20].

Para proteger a superfície exposta do Piezoelétrico de danos físicos prolongados, uma placa de desgaste (calço) é conectada à face frontal do Piezoelétrico. Além disso, o calço tem um papel importante em atuar como uma camada de combinação entre o material Piezoelétrico e o material em teste [20]. Na Figura 2.13 pode se observar a constituição de um transdutor.

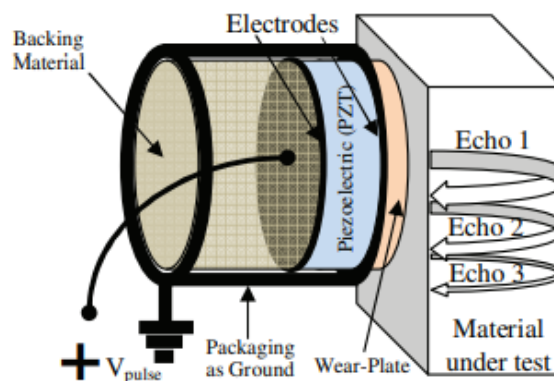


Figura 2.13 - Transdutor de US [20].

Tem uma impedância acústica Z_w [10^6 Kg/m² s] ótima, que se encontra entre a impedância acústica do transdutor Z_t [10^6 Kg/m² s] e a impedância acústica do material sob teste Z_m [10^6 Kg/m² s], conforme descrito na equação 2.5.

$$Z_w = \sqrt{Z_t Z_m} \quad 2.5$$

O comprimento de onda λ [m] do sinal de ultrassom é inversamente proporcional à frequência ressonante f [s^{-1}], e dependente da velocidade do som no material em teste C [m/s], conforme mostrado na equação 2.6.

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad 2.6$$

A energia de ultrassons gerada vai ser transferida do Piezoelétrico para o meio circundante. Normalmente são usadas ondas longitudinais ou ondas transversais, nos dois casos os defeitos são detetados se houver uma mudança na impedância acústica na direção da onda sonora. Uma falha com ar tem uma impedância acústica muito baixa por isso reflete a maior parte da energia acústica incidente. Consegue ser detetada ou por um aumento no sinal refletido ou por uma redução no sinal transmitido. E desde que a velocidade do som seja conhecida, o tempo de reflexão do sinal permite descobrir a localização da falha [22].

– Limitações

Uma das grandes desvantagens dos US é que é essencialmente um método pontual, sendo a área inspecionada limitada à região imediatamente ao redor do transdutor. A inspeção pode ser automatizada, o que requer grande investimento para grandes estruturas serem inspecionadas, no entanto há vantagem de que se obtém um registro permanente da inspeção. Alternativamente, a inspeção pode ser realizada manualmente, no entanto passa a depender da habilidade e prática do operador para garantir que ele inspecionou tudo o que é necessário.

Uma outra desvantagem da inspeção por ultrassons é que geralmente é necessário empregar um fluido de acoplamento entre o transdutor e a peça de teste. Isso ocorre devido à grande incompatibilidade de impedância entre um material sólido e o ar, que é o que torna os defeitos que consistem em vazios fáceis de detetar, também significa que há muito pouca transmissão na interface entre um transdutor e o ar, ou entre o ar e a peça de teste. O acoplamento inadequado é uma causa comum de maus resultados.

Outra dificuldade com a inspeção por ultrassons é a necessidade de manter o alinhamento correto do feixe ultrassônico. Esta é uma dificuldade particular em partes curvas. Os ecos também se tornam difíceis de interpretar em regiões de geometria complexa [22], [23]. Uma complicação adicional está associada aos efeitos da refração nas interfaces e ao foco ou desfocagem que ocorre se essas interfaces não forem planas. É importante que as peças tenham geometrias controladas, uma vez que as alterações geométricas podem ser mal interpretadas como alterações induzidas por falhas [24].

– Implementação no WAAM

As maiores dificuldades de implementação no WAAM são o facto de as sondas de ultrassons do tipo eco pulsado, não seriam aplicáveis numa geometria arredondada como é por norma a parte superior de um cordão produzido por WAAM. Sabe-se também que as técnicas Eco pulsado e Phased Array convencionais precisam de acoplantes, enquanto EMAT e US por laser têm menos limitação e pode ser uma boa abordagem [25].

No entanto, começam a surgir outros métodos para que seja possível esta implementação como é o caso da técnica US por laser, onde se usa um laser pulsado para gerar ondas acústicas em amostras de referência fabricadas por *Laser Melt Deposition* (LMD) e um sistema com um laser interferométrico para detetá-los. O uso de laser de inspeção que é transmissor e recetor e a interação da onda ultrassônica incidente com defeitos subsuperficiais e superficiais também têm sido amplamente investigados. As amostras de referência foram analisadas e defeitos com tamanhos variando de 100 μm e profundidade até 700 μm foram detetados com sucesso. Nos casos de deposição de alimentação de pó (PF), a probabilidade de detecção (POD) de falhas subsuperficiais de uma única camada de Inconel examinada por laser ultra-sónico (com base em amostras de referência e duas amostras de PF) encontrou um 90% POD para defeitos de superfície de 0,1 mm de diâmetro e 0,9 mm a 1 mm profundidade [25].

Surgiu também outra alternativa que é na vertente normal do WAAM usar a sonda colocada na parte debaixo do substrato (Figura 2.14). Esta possibilidade já foi estudada e obteve bons resultados, consultar [25] para informação mais detalhada.

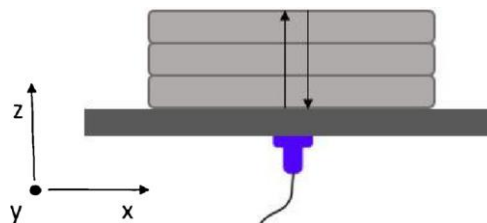


Figura 2.14 - Esquema para testagem de US com a sonda debaixo do substrato [25].

Uma hipótese que seria interessante estudar é usar uma sonda US por eco pulsado na vertente do WAAM *Hot-forging* para conseguir fazer o teste ao processo tendo em conta a geometria, pois nesta vertente a parte superior fica com uma geometria plana.

2.3.2 – Correntes Induzidas

– Princípio físico

O teste de correntes induzidas (CI) tem sido amplamente aplicado na inspeção e caracterização de peças metálicas. O método permite medir propriedades como condutividade elétrica do material, e é particularmente adequado para a detecção de imperfeições localizadas na superfície ou subsuperfície da peça [23].

As correntes induzidas são criadas através de um fenômeno chamado indução eletromagnética. Quando uma corrente alternada é aplicada a uma bobina, é formado um campo magnético primário (H_p) paralelo ao eixo da bobina. Se um material condutor for colocado na proximidade deste campo magnético, será induzida uma corrente no material condutor. Que por sua vez cria um campo magnético secundário (H_s), com o sentido oposto ao primário, logo causa uma variação na impedância da bobina [21][22]. Este processo pode ser observado na Figura 2.15.

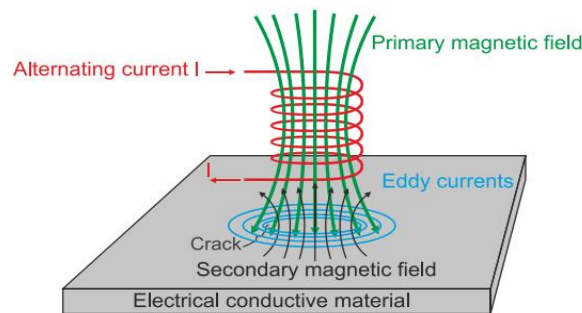


Figura 2.15 - Princípio de operação do END de CI [26].

Essas correntes são influenciadas pela natureza do material, como vazios, fissuras, mudanças no tamanho do grão, bem como a distância física entre a bobina e o material, causando uma variação na impedância devido à diminuição da intensidade do campo magnético secundário, que, conseqüentemente, leva a uma variação do campo magnético primário.

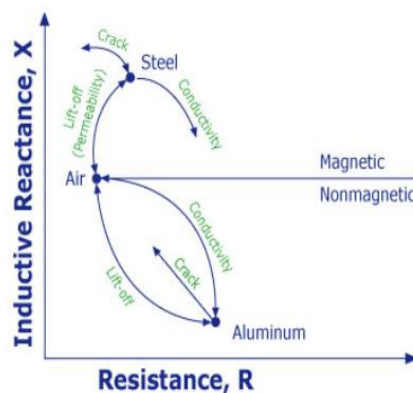


Figura 2.16 - Plano de impedância de CI [26].

A profundidade de detecção depende da densidade de CI no material, sendo que a capacidade de detecção diminui exponencialmente com o aumento da profundidade. Este fenómeno é designado por efeito de pele. A equação 2.7 expõe a relação exponencial da densidade de correntes em profundidade, em que δ [m] corresponde à profundidade, I_0 [$A \cdot m^2$] corresponde à densidade de correntes à superfície do material, f [s^{-1}] corresponde à frequência, μ [$H \cdot m^{-1}$] corresponde à permeabilidade magnética e σ [$S \cdot m^{-1}$] corresponde à condutividade elétrica do material.

$$I_\delta = I_0 \times e^{\delta \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad 2.7$$

A profundidade de penetração padrão é a profundidade na qual a densidade de correntes induzidas diminui para um nível de cerca de 37% do seu valor de superfície, e depende da condutividade elétrica, da permeabilidade magnética do material de teste e da frequência.

A profundidade de penetração padrão é menor à medida que a condutividade, a permeabilidade ou a frequência de inspeção aumentam como se pode observar na equação 2.8 [27].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad 2.8$$

A frequência tem uma influência importante nos resultados, pois determina a densidade em profundidade das correntes induzidas [23]. Através da Figura 2.17 é possível observar que a altas frequências, as correntes induzidas concentram-se essencialmente à superfície, enquanto a baixas frequências é possível alcançar defeitos em regiões mais profundas.

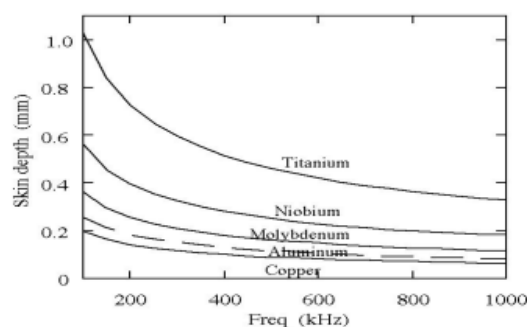


Figura 2.17 - Influência da frequência na penetração das correntes [28].

Tabela 2.2- Profundidade de penetração de 36.8% e a gama de frequências passível de utilizar[29].

Metal	%IACS	1 kHz	4 kHz	16 kHz	64 kHz	256 kHz	1 MHz
Copper	100	0.082	0.041	0.021	0.010	0.005	0.0026
6061 T-6	42	0.126	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004
7075 T-6	32	0.144	0.072	0.036	0.018	0.009	0.0046
Magnesium	37	0.134	0.067	0.034	0.017	0.008	0.0042
Lead	7.8	0.292	0.146	0.073	0.37	0.018	0.0092
Uranium	6.0	0.334	0.167	0.084	0.042	0.021	0.0106
Zirconium	3.4	0.516	0.258	0.129	0.065	0.032	0.0164
Steel	2.9	0.019	0.0095	0.0048	0.0024	0.0012	0.0006
Cast steel	10.7	0.018	0.0089	0.0044	0.0022	0.0011	0.0006

A permeabilidade magnética μ é um número que quantifica a quantidade de indução magnética B dos materiais quando um campo magnético H é aplicado. Os materiais que possuem permeabilidades magnéticas relativas muito superiores a 1, como é o caso dos materiais ferrosos, permitem uma penetração de correntes inferior, face aos materiais que apresentam permeabilidades magnéticas relativas de aproximadamente 1, como é o caso dos materiais não ferrosos. A alta permeabilidade magnética faz com que a profundidade de penetração padrão diminua. Para compensar esse efeito e explorar o material internamente, os materiais ferromagnéticos são inspecionados em frequências mais baixas do que os não ferromagnéticos [27].

– Limitações

Uma das limitações das CI é que este método é sensível ao *lift-off* (a distância entre a bobina e a superfície da peça de teste) devido ao efeito de pele, flutuações do *lift-off* causadas pela rugosidade da superfície de as peças WAAM, o que torna difícil detetar as variações de sinal provenientes de defeitos, uma vez que há uma variação significativa na amplitude do sinal devido à alteração de posição do *lift-off* [22], [28].

Outra limitação é só ser aplicável a materiais que são condutores. Para além disso, devido ao efeito de pele, é limitada a defeitos à superfície ou subsuperfície, não sendo possível detetar defeitos em profundidade.

Para além dos já referidos há o problema que nem todos os defeitos são possíveis de ser detetados de forma eficaz na CI. Se os defeitos estiverem posicionados paralelamente às correntes induzidas, a variação de impedância é muito reduzida, sendo assim o efeito de difícil deteção.

Outro desafio a superar é o efeito de bordo, que tal como os defeitos no bordo do material distorcerão as correntes induzidas, levando a uma resposta sobreposta. Estes defeitos que se desenvolvem a partir do bordo do material devido a concentrações de tensão, comparado com

defeitos longe dos bordos, uma vez que a tensão nos defeitos de bordo é mais concentrada, os defeitos de bordo são mais fáceis de expandir e trazem maiores riscos de segurança, podendo até mesmo causar acidentes. No entanto, é um desafio identificar e caracterizar defeitos de bordo devido ao efeito de bordo [30]. Este efeito é possível ser observado na Figura 2.18.



Figura 2.18 - Efeito de bordo nas CI [31].

– Implementação no WAAM

Existe a necessidade de ter um sistema capaz de analisar os produtos obtido pelo WAAM, que as correntes induzidas conseguem satisfazer, estas aparentam ainda ter alguns benefícios como a capacidade de inspecionar tanto materiais ferromagnéticos como não-ferromagnéticos [18].

No entanto, tendo em conta a essência do processo, surgem as dificuldades para a implementação das CI, por exemplo, a rugosidade superficial da peça final. A rugosidade pode variar entre 180 e 400 μm [18] o que faz com que a sonda, ao percorrer a superfície, capte ruído que não permitiria obter resultados viáveis.

Outra limitação será a do facto de cada camada depositada por WAAM ter, pelo menos, 2 mm de altura e, por isso, é preciso que o efeito de pele chegue até profundidades desta dimensão para assegurar que os defeitos internos de uma camada são detetados.

De forma a responder a estas principais limitações que surgem na aplicação ao WAAM, encontra-se na literatura [18] o desenvolvimento de uma *IONic Probe*, uma sonda constituída por uma bobina excitadora toroidal, que induz CI em diversas direções do material, como se pode observar na Figura 2.19, reduzindo o ruído resultante do *lift-off* e dos efeitos das superfícies irregulares.

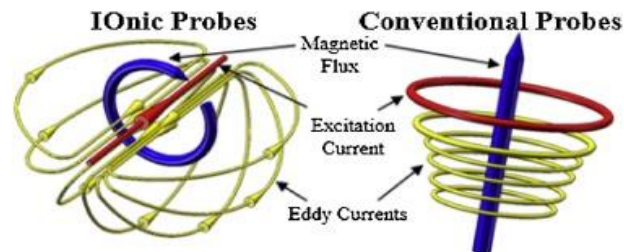


Figura 2.19 - Campo magnético de uma IONic Probe (à esquerda) com o de uma sonda convencional (à direita). [18].

Com especial ênfase no processo WAAM, foi desenvolvida uma sonda, Figura 2.20, que acomoda a curvatura da peça final produzida, como se pode observar na Figura 2.20 b).

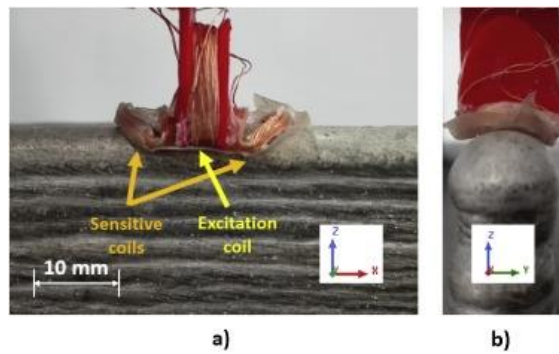


Figura 2.20- Protótipo de uma IONic Probe adaptada à curvatura da peça produzida por WAAM. Vista frontal (a) e vista lateral (b). Retirado de [18].

Quando comparando com uma sonda convencional, a *IONic Probe* obteve melhores resultados. Na Figura 2.21 a), a título de exemplo, mostram-se os resultados obtidos na inspeção de um defeito numa barra de AA 6082-T6 que consistia num furo com 3 mm de diâmetro a 1 mm de profundidade e, na Figura 2.21 b), as mesmas condições à exceção da profundidade que se alterou para 2 mm.

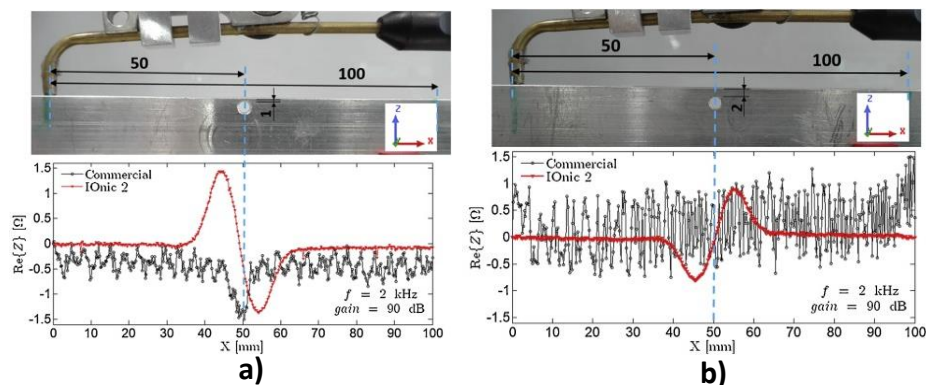


Figura 2.21- Comparação entre os resultados obtidos com uma sonda comercial (linha preta) e uma IONic Probe (linha vermelha) a 1 mm de profundidade (a) e 2 mm de profundidade (b). Retirado de [18].

Pode-se ver que, no defeito mais superficial, a sonda convencional ainda apresentou um resultado satisfatório, no entanto, a maiores profundidades, o resultado obtido foi apenas ruído. Pela análise de resultados em barras de AA 6082-T6, concluiu-se que a sonda era capaz de detetar defeitos com precisão até 5 mm de profundidade.

A influência do *lift-off* também foi analisada. Para a mesma barra de alumínio (AA 6028-T6), com um furo de diâmetro de 3 mm, a 2 mm de profundidade, foram-se mantendo todos os parâmetros constantes, à exceção do *lift-off*. Na Figura 2.22, observar-se os resultados obtidos.

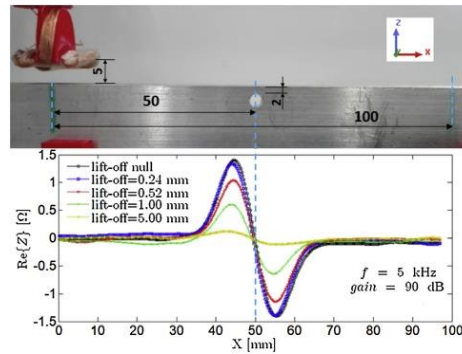


Figura 2.22-Resultados da influência do lift-off na capacidade da sonda customizada. Retirado de [18].

A partir destes resultados, pode-se concluir que a sonda customizada foi capaz de detetar defeitos a profundidades suficientes para implementação no WAAM, bem como a possibilidade de utilizar a sonda com um *lift-off* suficiente para que esta pudesse contornar o obstáculo das elevadas temperaturas do processo de deposição.

2.4 – Síntese do Capítulo

Através deste capítulo foi possível perceber como o WAAM funciona, mais especificamente, os três tipos mais comuns, as suas vantagens e desvantagens, bem como os principais defeitos das peças produzidas por WAAM, permitindo assim perceber a importância dos ensaios não destrutivos para permitir a industrialização deste método, com destaque para as correntes induzidas e os ultrassons. Para cada um destes métodos foi visto como funcionavam e como poderiam ser implementados no WAAM.

Nos Ultrassons depois de uma breve introdução teórica do processo, bem como das suas limitações, testou-se a possível implementação no WAAM. Já se obteve bons resultados através da colocação da sonda por baixo do substrato e também utilizando a variação de US por *laser*. Para além disso, foram propostas possibilidades para testar no futuro. A inspeção ultrassónica já provou a capacidade de detetar e dimensionar defeitos em WAAM, com limitações quanto à necessidade de bom acabamento superficial [25].

Nas Correntes induzidas foi também realizada uma breve introdução teórica do processo, bem como das suas limitações. Em relação a implementação no WAAM através do desenvolvimento de uma sonda, a *Ionic Probe*, que reduz o ruído resultante do *lift-off* e dos efeitos das superfícies irregulares, permitindo uma análise mais viável das peças.

3 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE US

3.1 – Introdução

Atualmente existe uma vasta variedade de sondas de Ultrassons disponíveis com soluções construtivas ajustadas aos respetivos objetivos. Contudo, no contexto do presente trabalho, optou-se por desenvolver sondas diretas. Estas apresentam as seguintes características, comuns a todas as sondas desenvolvidas (Tabela 3.1):

Tabela 3.1 - Características comuns a todas as sondas desenvolvidas

Característica	Especificação
Ângulo	Direta (0°)
Emissão/Receção	Piezoelétrico único
Tipo de onda	Transversal
Tipo de amortecimento	Normalmente amortecida
Forma de acoplamento	Contacto
Focalização	Não focalizada
Tipo de Controlo	Manual

3.2 – Componentes da Sondas

Neste subcapítulo descreve-se os vários componentes constituintes de uma sonda de ultrassons e quais os fatores a considerar para escolha de cada um deles.

3.2.1 – Calço

O calço tem como objetivos:

- a) Suportar o piezoelétrico;
- b) Propagar o som desde o piezoelétrico até ao material;
- c) Proteger o piezoelétrico do desgaste.

De forma a alcançar os objetivos referidos, foi necessário escolher o material adequado. Assim, foi realizada uma breve caracterização de diversos materiais, de modo a comparar e a perceber qual dos materiais possui as melhores propriedades para servir como calço numa sonda de ultrassons. De entre os critérios a considerar para esta escolha, o coeficiente de atenuação acústica do material é o que tem o maior peso.

O coeficiente de atenuação (α) varia em cada material, e depende da frequência, da temperatura e do tipo de onda considerados. A atenuação pode ser medida através de múltiplas reflexões ao longo da espessura de um material. O coeficiente de atenuação, α [dB/m], depende do U_t [dB/s] e a velocidade do som C [m/s] (equação 3.3). Por sua vez, o U_t depende do número de decibéis entre dois sinais adjacentes [Δ dB] e do intervalo de tempo [Δt] (equação 3.1). O C varia conforme a distância percorrida, d [m] e tempo, t [s] (equação 3.2).

$$U_t = \frac{\Delta \text{dB}}{\Delta t} \quad 3.1$$

$$C = \frac{d}{t} \quad 3.2$$

$$\alpha = \frac{U_t}{C} \quad 3.3$$

De acordo com as circunstâncias pretendidas para o projeto, é necessário fornecer um ganho superior ao piezoelétrico, o que, no entanto, tem como consequência aumentar o ruído. Alternativamente, pode-se diminuir a frequência, mas tal implica a perda de sensibilidade. Por conseguinte, o coeficiente de atenuação do material do calço deverá ser o menor possível. Foram realizados os cálculos de modo a obter o coeficiente de atenuação para os diversos materiais, e com 3 sondas diferentes: uma de 4 MHz de frequência e 10 mm de diâmetro, outra de 10 MHz de frequência e 6,35 mm de diâmetro e outra de 20 MHz de frequência e 5 mm de diâmetro. Os resultados podem ser observados na Tabela 3.2, na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4.

Tabela 3.2 - Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 20 MHz e 5 mm de diâmetro

Material	Eco	Distancia percorrida (mm)	Tempo (μ s)	Decibeis (dB)	Δt entre picos (μ s)	Δ dB entre picos (dB)	U_t (dB/s)	C (m/s)	α (dB/m)	Campo Próximo (mm)
Rexolite	1°	60	25,89	49						
	2°	120	51,57	75	25,68	26	1012461	2327	435	53,72
	3°	180	77,32	88	25,75	13	504854	2328	217	53,70
	Média								326	53,71
Acrilico	1°	24	8,657	48						
	2°	48	17,09	74	8,43	26	3084955	2809	1098	44,50
	3°	72	25,92	90	8,84	16	1810569	2778	652	45,00
									875	44,75

Tabela 3.3- Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 4 MHz e 10 mm de diâmetro

Material	Eco	Distancia percorrida (mm)	Tempo (µs)	Decibeis (dB)	Δt entre picos (µs)	ΔdB entre picos (dB)	Ut (dB/s)	C (m/s)	α (dB/m)	Campo Próximo (mm)
Rexolite	1°	60	26,75	16						
	2°	120	52,30	31	25,55	15	586992	2294	256	43,59
	3°	180	78,60	46	26,29	15	570472	2290	249	43,67
	4°	240	104,14	58	25,54	12	469833	2305	204	43,39
	Média							2296	236	43,55
Peek	1°	13,4	6,30	16						
	2°	26,8	11,44	28	5,13	12	2337359	2343	998	42,68
	3°	40,2	16,70	41	5,27	13	2468667	2407	1026	41,55
	4°	53,6	22,28	51	5,57	10	1794044	2406	746	41,56
	Média							2385	923	41,93
Acrilico	1°	24	9,39	18						
	2°	48	17,83	39	8,45	21	2486090	2692	924	37,15
	3°	72	26,63	56	8,80	17	1931818	2704	715	36,99
	4°	96	35,10	71	8,47	15	1771584	2735	648	36,56
	Média							2710	762	36,90
Teflon	1°	6,6	5,49	38						
	2°	13,2	9,92	68	4,43	30	6770481	1331	5087	75,14
	3°	19,8	14,66	94	4,75	26	5479452	1350	4058	74,06
	Média								4572	74,60

Tabela 3.4- Coeficientes de atenuação acústica medidos com uma sonda de 10 MHz e 6,35 mm de diâmetro

Material	Eco	Distancia percorrida (mm)	Tempo (µs)	Decibeis (dB)	Δt entre picos (µs)	ΔdB entre picos (dB)	Ut (dB/s)	C (m/s)	α (dB/m)	Campo Próximo (mm)
Rexolite	1°	60	26,04	33						
	2°	120	51,73	57	25,69	24	934107	2320	403	43,46
	3°	180	77,43	79	25,70	22	856131	2325	368	43,36
	4°	240	103,13	100	25,70	21	817121	2327	351	43,32
	Média							2324	374	43,38
Acrilico	1°	24	8,94	37						
	2°	48	17,59	64	8,66	27	3119224	2728	1143	36,95
	3°	72	26,27	87	8,67	23	2652520	2741	968	36,77
	4°	96	34,93	105	8,66	18	2078042	2749	756	36,68
	Média							2739	956	36,80

Analisando as tabelas apresentadas, conclui-se que o material com um coeficiente de atenuação mais baixo, logo o que será o mais indicado para servir de calço é o Rexolite.

De modo a averiguar qual a altura que o calço deveria ter, calculou-se o campo próximo recorrendo ao diâmetro (D), à frequência (f) e à média das velocidades médias do som no Rexolite, através da equação 3.4. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

$$Campo\ próximo = \frac{D^2 \times f}{4 \times C} \quad 3.4$$

Tabela 3.5 - Cálculo do campo próximo

C (m/s)	f (MHz)	Ø (mm)	Campo Próximo (mm)
2314	8	3	7,777
2314	8	3,5	10,586
2314	6	6,35	26,134
2314	10	5	27,005
2314	7,6	5,334	23,357
2314	8	5	21,604
2314	8	6,5	36,511

De modo a que a análise dos provetes fosse mais eficaz, o ideal seria que o calço tivesse o comprimento do campo próximo. No entanto, na realização dos ensaios, seria muito pouco prático utilizar calços com uma altura perto dos 30 mm. Logo optou-se por produzir calços que possuísem, no máximo, 10 mm.

É preciso, ainda, ter em atenção que o calço da sonda direita apresenta um fenómeno que deve ser evitado: trata-se da refração da onda longitudinal proveniente do calço. De facto, se as superfícies superior e inferior do calço não forem perfeitamente paralelas entre si, então a onda longitudinal proveniente do calço não incidirá perpendicularmente no aço. Consequentemente, irão surgir ondas longitudinais e transversais (com velocidades diferentes) no aço, o que complica o sinal recebido no piezoelétrico.

3.2.2 – Piezoelétricos

A escolha do piezoelétrico para as sondas é ditada por um conjunto de critérios que visam adequar as suas propriedades às funções desejadas:

1) Frequência de ressonância: Constitui a principal característica do piezoelétrico e, consequentemente, da sonda de ultrassons. Tal deve-se ao facto de ser um dos parâmetros de projeto que, de forma mais decisiva, afeta um vasto conjunto de propriedades da sonda de ultrassons, entre as quais:

a. Sensibilidade: Quanto maior for a frequência, maior será a capacidade de detetar fendas de reduzidas dimensões, pois menor é o comprimento da onda sonora, logo menor será a dimensão do obstáculo onde a onda pode refletir;

b. Penetração: Quanto menor for a frequência, maior será a capacidade de detetar defeitos a uma elevada profundidade, visto que, quanto mais rápidas forem as oscilações, mais energia se perde, e por isso maior é a absorção da energia sonora;

c. Campo próximo: Quanto menor for a frequência, menor será o comprimento do campo próximo, o que é vantajoso pois as variações de pressão que aí ocorrem dificultam uma correta avaliação dos defeitos;

d. Zona morta: Quanto maior for a frequência, menor será o comprimento da zona morta, e, por conseguinte, a profundidade da peça na qual não é possível detetar descontinuidades por reflexão total será menor. Conclui-se, assim, que a frequência é um outro parâmetro de projeto que influencia as propriedades da inspeção por ultrassons de forma antagónica.

Tendo em conta os parâmetros referidos, e como não se tenciona inspecionar defeitos a grandes profundidades, optou-se por uma frequência de ressonância relativamente elevada entre 6 MHz e 10 MHz.

2) Diâmetro do disco: Esta dimensão afeta sobretudo as propriedades do feixe sonoro, pois quanto maior for o seu valor, maior será o comprimento do campo sonoro, mas menor é a divergência do campo afastado. No entanto, uma vez que o objetivo é inspecionar cordões de WAAM que possuem uma espessura entre 3 a 7 mm, o tamanho dos piezoelétricos selecionados também varia entre 3 e 7mm.

3) Tipo de material: Foram selecionados piezoelétricos de materiais cerâmicos à base de titanato de zirconato de chumbo modificado (PZT). A nível internacional, é usual dividi-los em dois grupos:

- PZTs duros: Possuem um elevado fator-Q e uma baixa perda dielétrica, o que os torna adequados para aplicações onde seja necessário transmitir a maior potência possível. No entanto, a sensibilidade destes materiais é bastante reduzida [33].

- PZTs macios: Têm uma elevada sensibilidade e um baixo fator-Q, o que os torna adequados para aplicações em sondas de ultrassons. A elevada perda dielétrica não os torna capazes de transmitir grandes potências sem que ocorram problemas de sobreaquecimento ou despolarização [33].

De entre os PZTs macios, foram selecionados o Pz27, o Pz29 e o PIC255, por serem um material comum e que é adequado para a grande maioria das sondas de ultrassons.

Na Tabela 3.6, é possível observar as características de cada um dos diferentes tipos de piezoelétricos. Mais informações sobre os piezoelétricos podem ser encontradas nos anexos A 1, A 2, A 3.

Tabela 3.6 - Características do piezoelétricos.

Material	Fator de qualidade mecânico	Coefficiente de carga piezoelétrica (pC/N)	Densidade (g/cm ³)	Temperatura de curie (°C)	Fator de perdas dielétricas
Pz27	80	500	7.70	350	17
Pz29	90	575	7.45	235	19
PIC255	80	550	7.80	350	20

4) Tipo de elétrodo: Existe uma elevada variedade de processos para a deposição do elétrodo na superfície dos piezoelétricos. Cada processo apresenta diferentes características, o que faz com que a escolha do elétrodo dependa unicamente da sua aplicação. No caso das sondas de ultrassons para controlo não destrutivo, os elétrodos de prata depositados por impressão em tela são a melhor escolha, pois possuem uma boa soldabilidade, uma excelente adesão ao piezoelétrico e, ainda, um baixo custo. Têm como principal desvantagem o facto de serem algo espessos, o que constringe ligeiramente a vibração dos piezoelétricos [33].

5) Fator-Q: Representa o aumento da amplitude de vibração na ressonância e, em simultâneo, o intervalo dos valores de frequência de ressonância onde o transdutor piezoelétrico é igualmente sensível (largura de banda). Um fator-Q elevado significa uma elevada amplitude de vibração, mas uma baixa largura de banda. Normalmente, dever-se-ia pretender um fator-Q elevado, para que a amplitude de vibração na ressonância fosse também elevada, o que permitiria obter uma grande penetração. Contudo, um fator-Q elevado significa, também, uma pequena largura de banda. Ou seja, para se obter as elevadas amplitudes de vibração, seria necessário que a frequência de funcionamento do piezoelétrico fosse muitíssimo próxima da frequência de ressonância. Embora o processo de fabrico de um determinado tipo de piezoelétrico seja o mesmo, estes, na prática, possuem frequências de ressonância que variam de acordo com o piezoelétrico. Logo, seria necessário ajustar a frequência de excitação sempre que se pretendesse mudar de sonda. Uma vez que esta situação é impraticável, as sondas de ultrassons recorrem a piezoelétricos com um fator-Q baixo, o que permite larguras de banda elevadas. No caso dos piezoelétricos seleccionados, como se pode observar na Tabela 3.7, o fator-Q varia entre um valor de 80 e de 90, o que é significativamente abaixo dos 1000 que os piezoelétricos com um elevado fator-Q apresentam.

Tendo em conta as características que influenciam a escolha dos piezoelétricos foram seleccionados os piezoelétricos com as características apresentadas na Tabela 3.7:

Tabela 3.7 - Material, frequência e diâmetro dos piezoelétricos selecionados.

Material	Frequência (MHZ)	Diâmetro (mm)
Pz27	7,6	5,334
Pz29	8	3,5
Pz27	8	3
Pz29	10	5
Pz27	6	6,35
PIC255	8	6,5
PIC255	8	5

Na Figura 3.1, é possível observar o aspeto dos piezoelétricos selecionados. Estes encontram-se apresentados pela mesma ordem da Tabela 3.7, sendo que a interpretação desta figura deve ser realizada no sentido da esquerda para a direita.

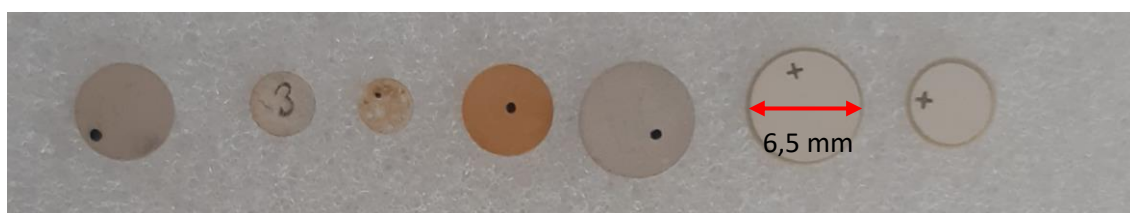


Figura 3.1 – Piezoelétricos selecionados para a produção das sondas.

3.2.3 – Chassi e isolante

O chassi tem duas funções:

- a) Suportar as cargas;
- b) Proteger todos os elementos interiores.

Uma vez que as sondas não estão sujeitas a cargas elevadas, não é necessário fazer simulações, pois a estrutura não irá estar sujeita a esforços consideráveis. Neste caso, utilizou-se um tubo de alumínio com um diâmetro interior de 8 mm e com uma espessura de 1 mm (Figura 3.2).

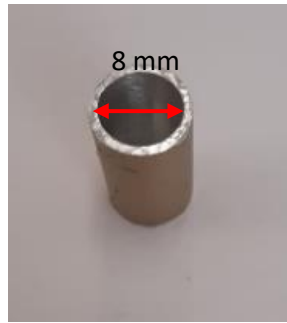


Figura 3.2 - Chassi.

Relativamente ao isolante, o seu propósito é:

- a) Isolar acusticamente os elementos do exterior;
- b) Assegurar a fixação do calço ao chassis por aperto.

Utilizou-se fita-cola isoladora, que isola de forma acústica e elétrica, sendo, também, mais prática. A espessura da fita-cola é de 0,5 mm, o que garante que há um aperto que permite a fixação do calço no chassi.

3.2.4 – Amortecimento

O amortecimento tem três objetivos fundamentais:

- a) Absorver o som (emitido pelo piezoelétrico na face oposta ao calço, e ecos parasitas);
- b) Contribuir para a rápida paralisação das vibrações do piezoelétrico após a emissão dos ecos pulsados (desta forma, o piezoelétrico já se encontra em repouso quando receber o eco das ondas emitidas);
- c) Servir como cola e manter os componentes fixos.

Por conseguinte, será a impedância acústica do amortecedor que determina a percentagem de som absorvido, a qual terá influência no comportamento e na qualidade do sinal elétrico final.

Visto que a absorção do som que vai para a face oposta ao calço é um critério fundamental para evitar o aparecimento de ecos parasitas no sinal, o amortecimento tem que possuir uma impedância acústica suficientemente elevada, de forma a que a mesma se aproxime da impedância acústica do piezoelétrico. No entanto, tem de se ter em consideração que uma impedância demasiado elevada reduz drasticamente a capacidade de deteção de fendas de reduzidas dimensões e a profundidade de deteção dos defeitos.

Utilizou-se para o amortecimento (Figura 3.4) uma mistura de cola epóxi (do tipo Araldite®) com pó de tungsténio (W) (Figura 3.3). A resina epóxi apresenta propriedades mecânicas indicadas para a criação do efeito de paralisação do calço. Por outro lado, a adição de pó de tungsténio aumenta a impedância acústica da mistura, o que permite absorver o som. Esta impedância – e, portanto, a capacidade para absorver som – será proporcional à percentagem de pó adicionado à mistura. O pó apresenta, ainda, a função de aumentar a dispersão do feixe de ondas sonoras, o que significa que, para a mesma percentagem de pó na mistura, e, logo, para a mesma impedância acústica, é necessária uma menor espessura de amortecimento para que o som seja totalmente absorvido.



Figura 3.4 – Pó de tungsténio.



Figura 3.3 - Amortecimento.

3.3 – Produção das Sondas de US

Neste subcapítulo descreve-se detalhadamente o processo de construção das sondas de Ultrassons.

3.3.1 – Produção do calço

O calço é feito a partir de um varão de Rexolite de 8 mm de diâmetro e de 1 m de comprimento. Uma vez que os calços só terão no máximo 10 mm, o primeiro passo consistiu em reduzir o comprimento do varão. De seguida, e considerando que o chassi tem um diâmetro interno de 8mm, torneou-se o varão (Figura 3.5 a)) com o intuito de reduzir o diâmetro de 8 mm para 7 mm. Ainda no torno, foi deito o facejamento e sangramento de modo a garantir que as duas faces do calço ficavam paralelas.

Para que o calço ficasse completo, foi necessário realizar uma reentrância (Figura 3.5 b)). Assim, quando se procedeu à colagem do calço ao piezoelétrico, a solda localizada na sua face ficou acomodada na reentrância.

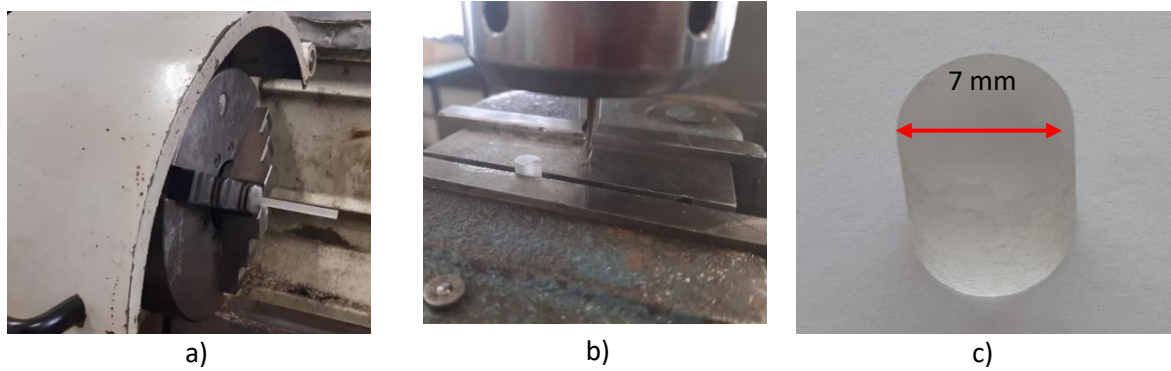


Figura 3.5 - Produção do calço: a) torneamento do varão b) Maquinação da reentrância c) calço.

No final do processo, os calços apresentaram uma altura de 8 mm ou 10 mm, um diâmetro de 7 mm, e uma reentrância com 1mm de profundidade e 1 mm de comprimento.

3.3.2 – Colagem do calço

A ligação entre o calço e o piezoelétrico foi efetuada através de colagem (Figura 3.6). No entanto, é importante ter em atenção vários detalhes, para que o piezoelétrico fique exatamente paralelo e junto a superfície do calço, sendo estes:

- a) Quantidade de supercola a aplicar: se esta for em excesso, o piezoelétrico pode não ficar junto ao calço, ou então ligeiramente inclinado;
- b) Encaixar no calço: o calço tem uma reentrância para acomodar a solda que está no piezoelétrico, permitindo, desta forma, que este fique direito. No entanto, é importante que a solda fique o mais encostada possível na reentrância, de forma a que a maior parte do piezoelétrico esteja junto da parte superior do calço;

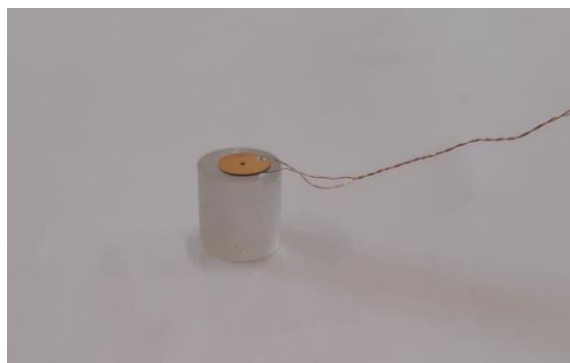


Figura 3.6 - Calço colado no piezoelétrico

3.3.3 – Preparação dos Piezoelétricos

Para o funcionamento das sondas de ultrassons, foi necessário soldar os piezoelétricos a um fio, de modo a que este seja, depois, ligado a uma fonte de alimentação. No entanto, deve-se ter em atenção determinados cuidados:

- a) Temperatura: se os piezoelétricos ficarem expostos a temperaturas superiores a 150 °C durante algum tempo, perdem algumas das suas capacidades;
- b) Quantidade de material de solda: os piezoelétricos devem ser soldados com uma quantidade reduzida de solda, apenas o suficiente para unir os componentes, uma vez que, se possuírem excesso de material soldado, a sua vibração será atenuada. Para além disso, é necessário colar os piezoelétricos aos calços de forma a que as suas superfícies fiquem estritamente paralelas. Para tal, é necessário que a solda ocupe a menor área possível.

Considerando as razões enunciadas, a soldadura deverá ser efetuada no menor tempo possível e com uma quantidade mínima de solda.

Foi realizada uma primeira tentativa de soldar um piezoelétrico de reduzidas dimensões a olho nu. No entanto, os resultados não foram os pretendidos, uma vez que este possuiu solda em excesso. Preparou-se, então, uma base para prender o piezoelétrico, o ferro de soldar foi afiado, e a soldadura passou a ser realizada com o auxílio de uma lupa digital. Esta montagem pode ser observada na Figura 3.7, e a soldadura do piezoelétrico na Figura 3.8.

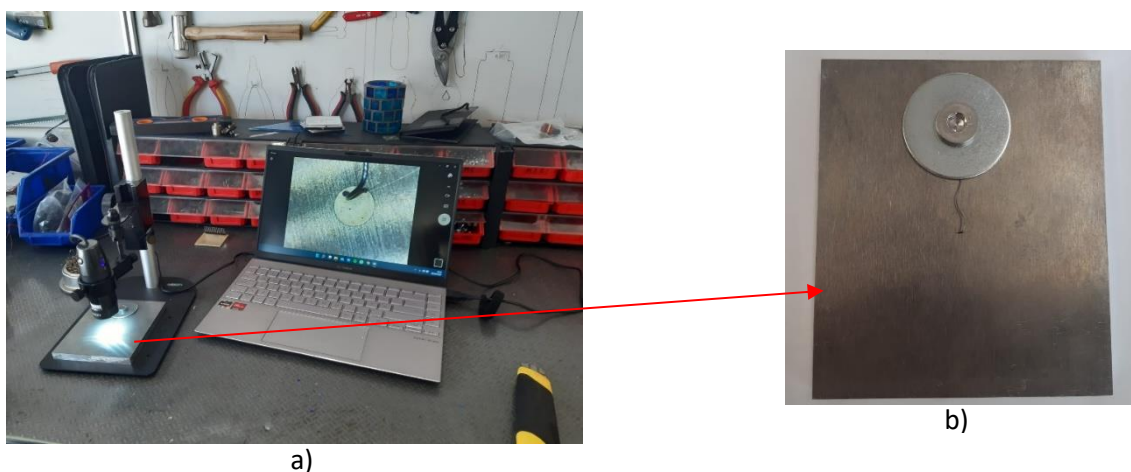


Figura 3.7 - Configuração de soldadura a) Local de soldadura b) Base de soldadura

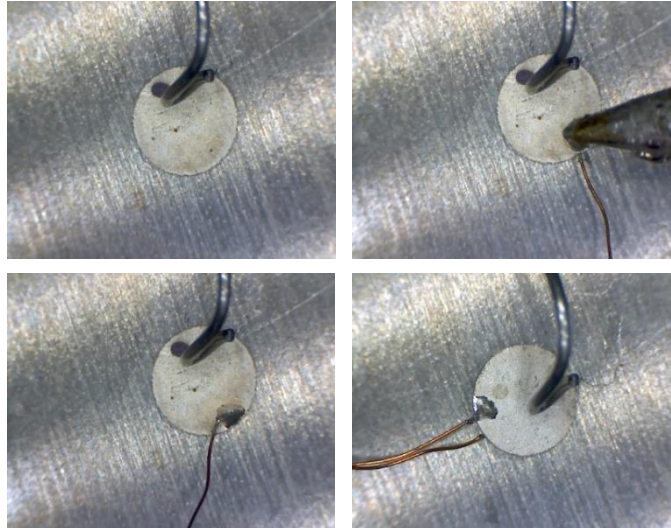


Figura 3.8 - Soldadura do piezoelétrico a) piezoelétrico b) momento da soldadura c) lado 1 d) lado 2

Relativamente ao seu aspeto, é possível verificar, na Figura 3.9, que o piezoelétrico que foi soldado anteriormente às condições de montagem necessárias obteve uma massa de material de solda superior, quando comparado com o piezoelétrico soldado com estas condições.

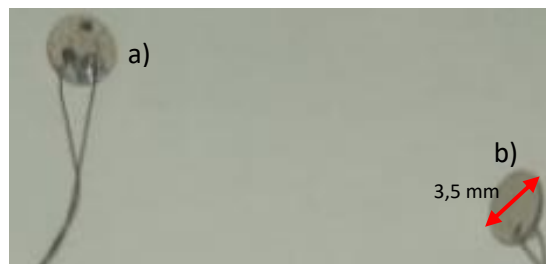


Figura 3.9 - Piezoelétricos soldados: a) Soldado a olho nu b) Soldado com a montagem.

3.3.4– Montar chassi e isolante

– Isolante

Ao aplicar o isolante, deve-se garantir que este tem uma espessura suficiente para que ocorra aperto, ou seja, para que o calço fique bem fixo no chassi. Neste caso, uma vez que o chassi tinha um diâmetro interior de 8 mm e o calço possuía um diâmetro de 7 mm, optou-se por colocar um isolante com uma espessura de 1 mm. Assim, foram necessárias duas camadas da fita cola isolante (Figura 3.10).

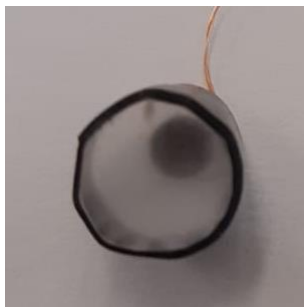


Figura 3.10 - Isolante no calço

– Chassi

O chassi foi produzido através de um tubo de alumínio com 8 mm de diâmetro interno. Foi, necessário limar as pontas do tubo para garantir que não existiam limalhas que pudessem danificar o calço ou o piezoelétrico.

– Montagem no chassi

A montagem do calço, com o piezoelétrico colado e o isolante colocado no chassi (Figura 3.11), foi realizada através da aplicação de pressão. Desta forma, como a medida do interior do chassi é semelhante à medida do exterior do calço com o isolante, após a montagem, os componentes mantiveram-se no sítio devido ao aperto. No entanto, revelou-se importante que esta montagem fosse efetuada com cuidado para não danificar nem a solda do piezoelétrico, nem o isolante. Foi, ainda, necessário efetuar um ajuste do tamanho dos fios soldados ao piezoelétrico, devido às dimensões demasiado elevadas que apresentavam, e que impediam que estes ficassem acomodados dentro do chassi.



Figura 3.11 - Montagem chassi, calço, piezoelétrico e isolante.

3.3.5– Aplicar o amortecimento

Anteriormente à aplicação do amortecimento (Figura 3.12), deve-se garantir que o calço e que os fios de ligação se encontram devidamente colocados, uma vez que o amortecimento também funciona como cola. É importante, também, ter em atenção que a mistura deve ser realizada com

as quantidades certas. Para tal, o pó de tungsténio deve corresponder a 5 % da massa da cola epóxico, pois só assim o amortecimento possuirá as propriedades pretendidas.

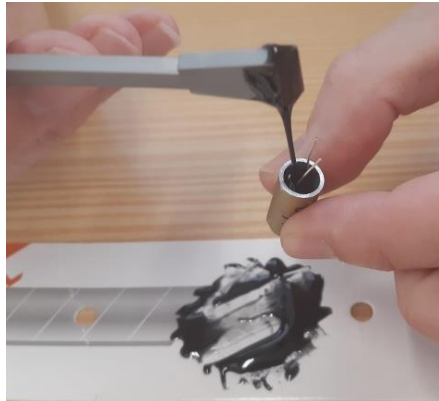


Figura 3.12 - Aplicação do amortecimento.

3.3.6– Sondas e cabo

No final foram produzidas sete sondas com sete piezoelétricos diferentes, sendo estes referidos no capítulo 3.1.2. A aparência das sondas pode ser observada na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Sondas construídas no laboratório.

Após a conclusão do processo de construção das sondas, foi necessário adequar um cabo (Figura 3.14), para que fosse possível ligar as sondas ao *Krautkramer* USM 36. Este aparelho permite ler o tempo [s] ou o espaço percorrido [mm] das ondas sonoras em função do ganho [dB] ajustado pelo utilizador. Este cabo foi adequado de modo a que pudesse ser utilizado em todas as sondas, e que fosse possível mudar de sonda com facilidade. Teve-se, ainda, em atenção que o cabo afeta o sinal da sonda. Assim, uma vez que este esteve presente em todos os ensaios realizados com as sondas, considerou-se o cabo como um componente da sonda.



Figura 3.14 - Cabo utilizado nas sondas de US.

3.4 – Conclusões e Caracterizações

Ao longo das várias etapas da produção das sondas de ultrassons, foram realizadas várias caracterizações da amplitude e da fase da impedância, sendo que estas variam conforme a frequência. Estas caracterizações foram feitas usando o Digilent WaveForms Analog Discovery 2. Esta caracterização auxilia na compreensão de como cada peça da sonda influencia a impedância, a fase e a frequência de ressonância. Estas caracterizações permitiram, também, comparar as sondas entre si.

3.4.1 - Comparação da caracterização de 2 piezoelétricos soldados com condições diferentes

Ao comparar a caracterização e a aparência dos dois piezoelétricos Pz29 3,5 mm 8 MHz soldados em condições diferentes, antes e depois de ser preparado um espaço mais adequado a soldadura de objetos de pequenas dimensões, é possível verificar que o piezoelétrico soldado com as condições certas obteve um sinal melhor, pois o piezoelétrico soldado a olho nu ficou com mais massa de solda, o que fez com que a vibração fosse mais amortecida e irregular (Figura 3.15).

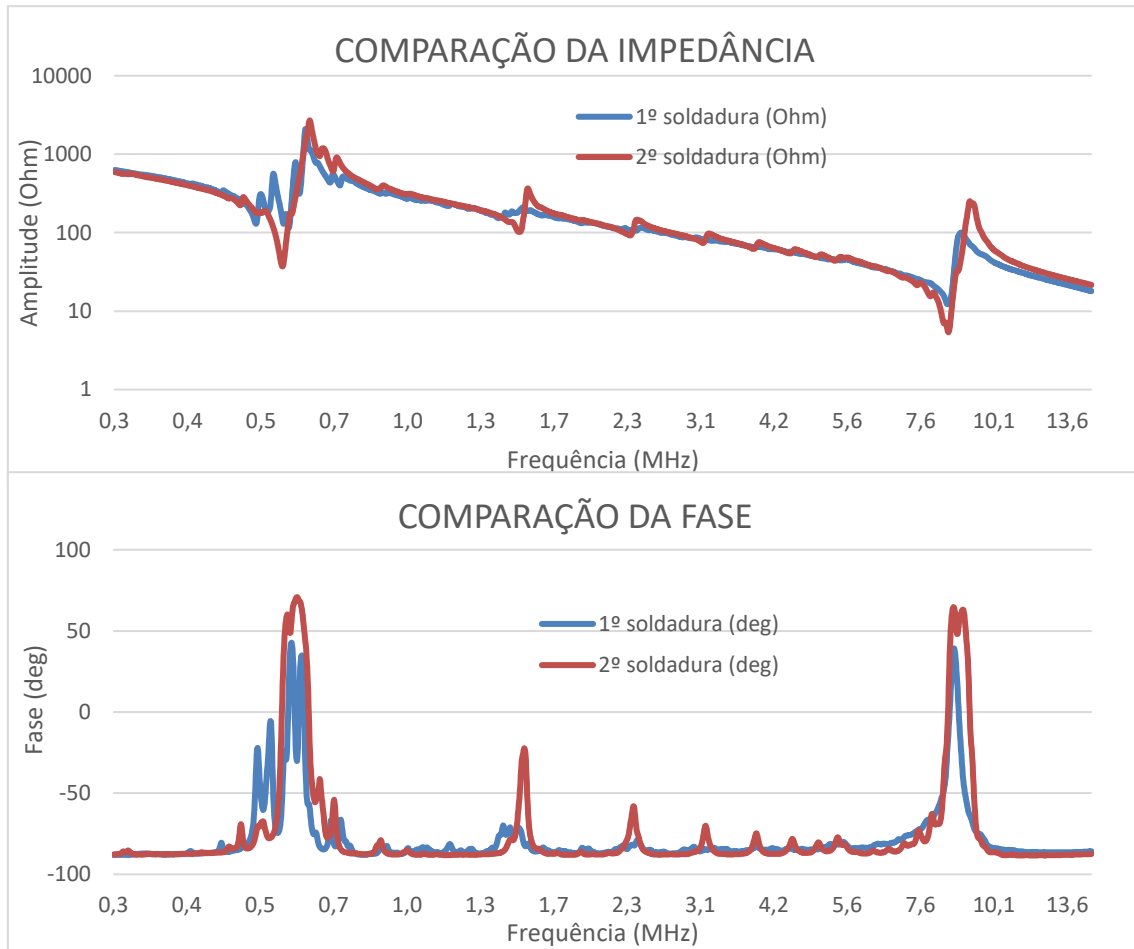


Figura 3.15 - Comparação da caracterização de 2 piezoelétricos soldados com condições diferentes.

3.4.2 – Comparação da caracterização dos piezoelétricos

Após a preparação, em condições iguais, de sete piezoelétricos com características diferentes, realizou-se uma caracterização da amplitude e da fase que variam conforme a frequência, de forma a confirmar se a frequência de ressonância correspondia ao valor indicado. Na Figura 3.16, é possível observar esta caracterização.

Nesta primeira etapa, procedeu-se à caracterização dos piezoelétricos no ar, isto é, com o piezoelétrico apenas soldado ao fio.

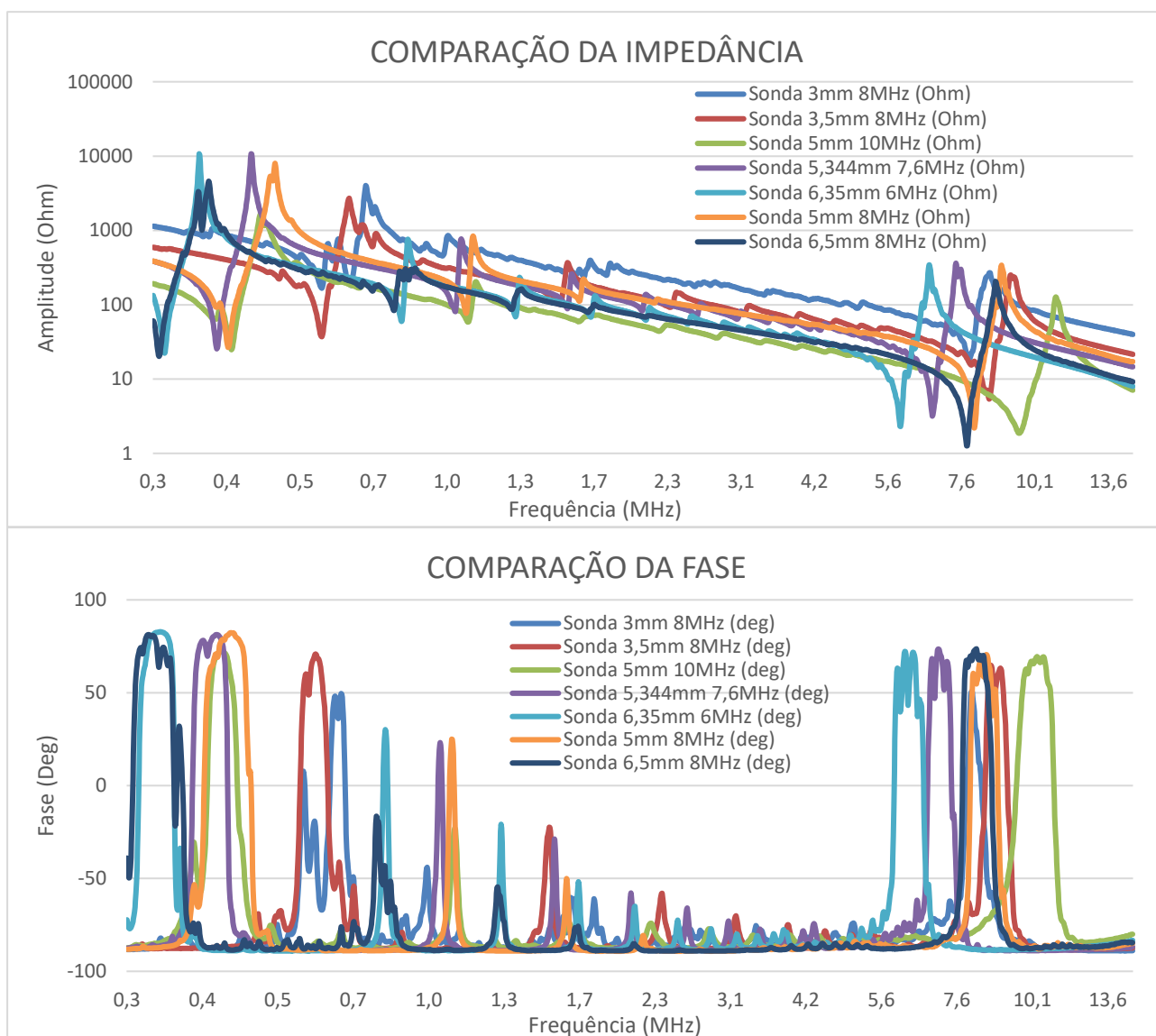


Figura 3.16 - Comparação da caracterização dos diferentes piezoelétricos.

Como é possível observar na Figura 3.16, a frequência de ressonância experimental de todos os piezoelétricos corresponde à frequência de ressonância teórica, com apenas ligeiros desvios com no máximo 0,4 MHz de diferença. Estes desvios devem-se à influência que a soldadura teve nos piezoelétricos.

3.4.3 – Comparação da sonda em cada etapa

Durante o fabrico das sondas, foi feita uma comparação das caracterizações dos componentes (Figura 3.17), para entender como é que cada componente afeta o sinal, para esta caracterização foram usadas peças da sonda cujo piezoelétrico é o Pz29 5 mm 10 MHz.

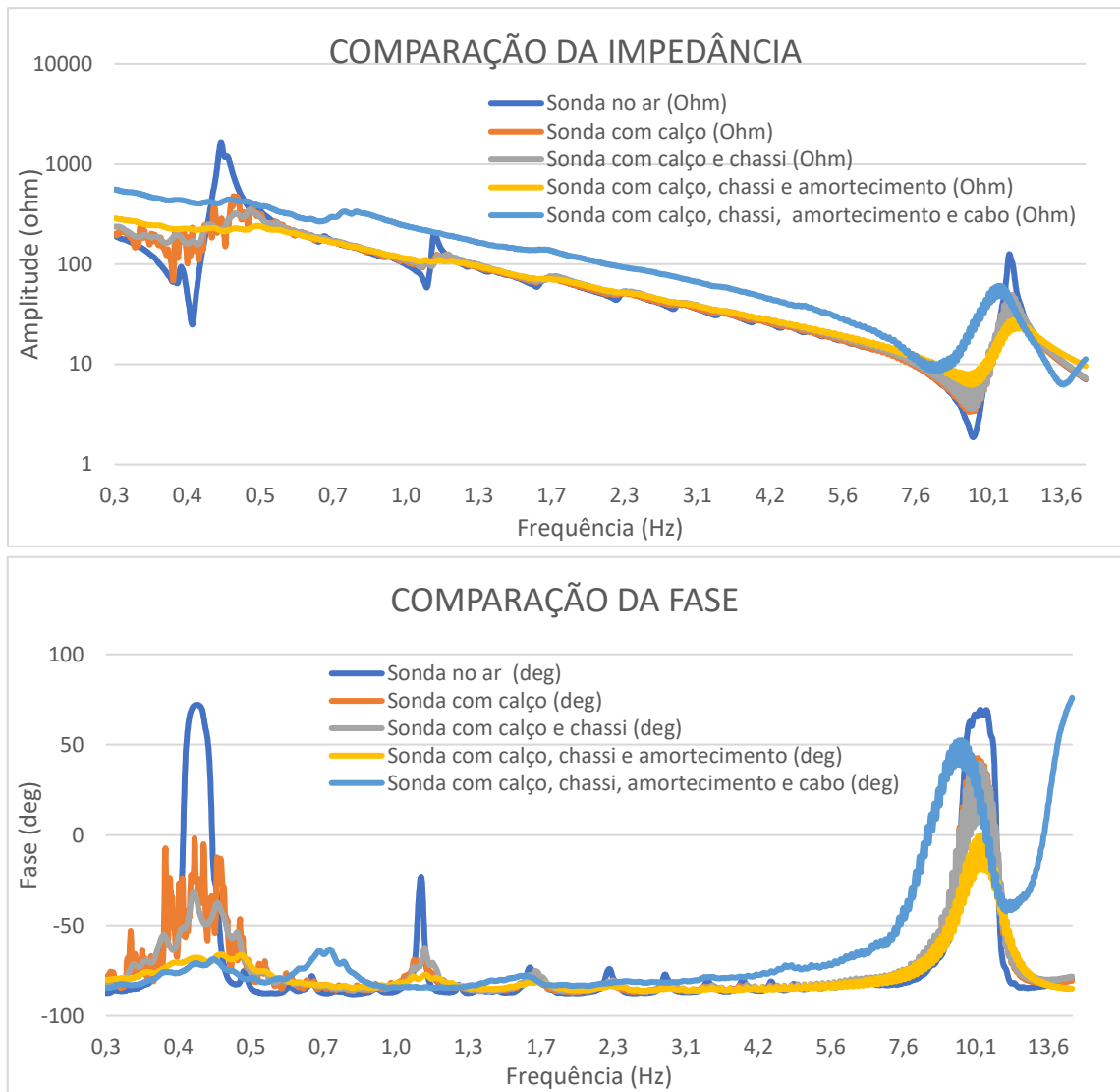


Figura 3.17 - Comparação da caracterização dos diferentes componentes da sonda.

Através da Figura 3.17, é possível observar de que forma cada componente afetou o sinal, em termos de amplitude e de fase ao longo da frequência. Concluiu-se que, à medida que foram sendo adicionados componentes, a frequência de ressonância manteve-se praticamente a mesma, mas a impedância e a fase diminuíram. No entanto, ao ligar a sonda ao cabo, observou-se um aumento da impedância e um deslocamento da frequência de ressonância ligeiramente para a esquerda. Ou seja, enquanto os restantes componentes apenas amorteceram o sinal, o cabo foi o que fez mais alterações. Mesmo assim, o sinal permaneceu semelhante ao inicial.

4 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DAS SONDAS DE CI

4.1 – Introdução

Existe uma variedade de tipos de sondas de correntes induzidas, sendo estas usadas consoante o objetivo. Como neste caso o objetivo é detetar defeitos em cordões de WAAM, decidiu-se desenvolver sondas absolutas uma vez que para analisar o cordão WAAM em várias direções as sondas absoluta são indicadas. As sondas absolutas de correntes induzidas funcionam com uma única bobina em contacto com o material. Estas sondas podem também ter uma bobina de referência que pode estar na caixa da sonda, no conector do cabo, ou num adaptador à parte. Foram produzidas duas sondas com diferentes bobinas: uma com 50 espiras e uma com 200 espiras.

4.2 – Produção das Bobinas

De forma a enrolar o fio de cobre ao longo das ferrites, foi utilizado um equipamento desenvolvido no NOVA NDT Lab (Figura 4.1). Este equipamento permite a produção de sondas de uma forma rápida e com elevada eficiência. O enrolador de bobinas é constituído por uma estrutura de perfil *Bosh*, onde está fixado um motor passo a passo que permite a rotação do suporte das bobinas.

A velocidade e a direção de rotação do suporte são controladas através de um sistema de pedais. O enrolamento é possível através da rotação do suporte que está acoplado ao motor, e do movimento axial que permite a tração do fio, controlado manualmente pelo utilizador. Para o controlo do enrolador de bobinas, recorreu-se ao *software* LabVIEW, utilizando uma DAC-6008 da *National Instruments*. O programa utilizado permite controlar a velocidade do motor e o seu sentido de rotação.

Na Figura 4.1, é possível visualizar a interface gráfica do programa.

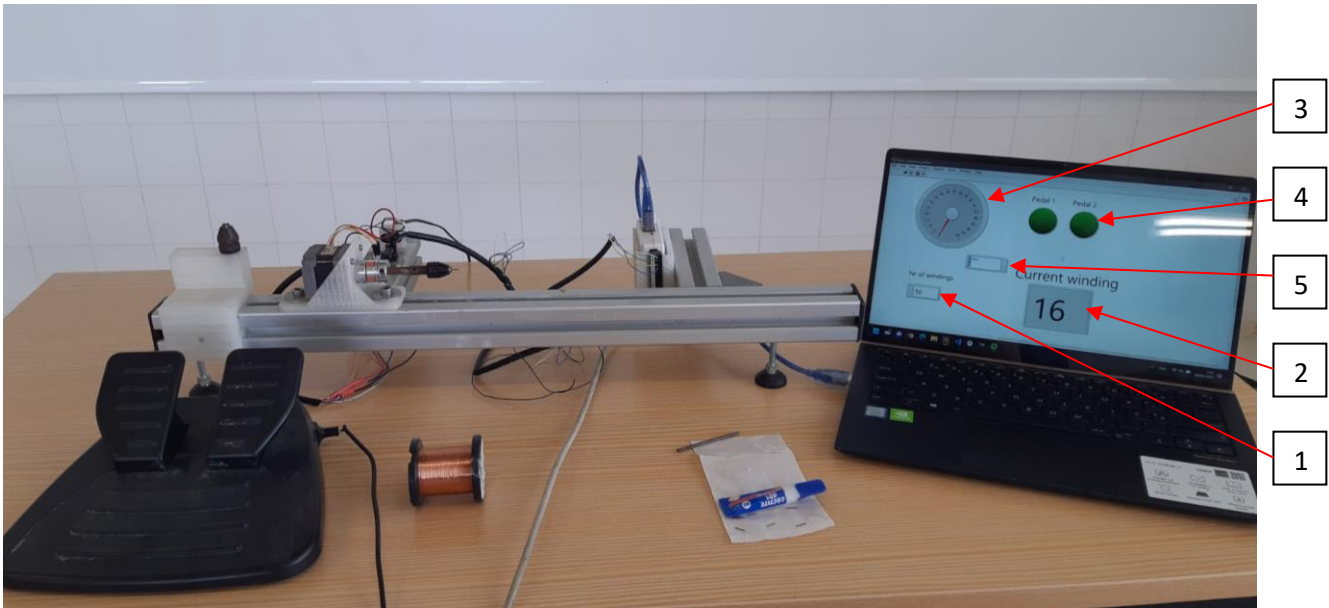


Figura 4.1 – *Set up* para a produção de Bobinas: 1) número total de enrolamentos, 2) número de enrolamentos efetuados, 3) percentagem da velocidade aplicada pelo utilizador, 4) Pedais 1 e 2, dependendo do sentido de rotação desejado, 5) Seleção do driver.

Após o enrolamento das bobinas, foram medidos os planos de impedância (Figura 4.2 e Figura 4.3), de modo a verificar se as bobinas se comportavam como era esperado. Recorreu-se a uma placa com diversos materiais, e em que a %IACS variava gradualmente (Tabela 4.1), para realizar os planos de impedância.

Tabela 4.1 - %IACS

Material	Condutividade (%IACS)
Prata	104,1
Cobre	101
Ouro	80
AA1100	54
AA6061 T6	44,4
AA6082	43,8
AA7075 T651	31,8
Latão	26,1
AlMgSe	22,9
SnSO	12,5
Chumbo	9
AISI304	2,9

A ordem dos materiais na tabela é igual à ordem dos pontos a contar de baixo para cima no eixo YY dos gráficos da Figura 4.2 e da Figura 4.3.

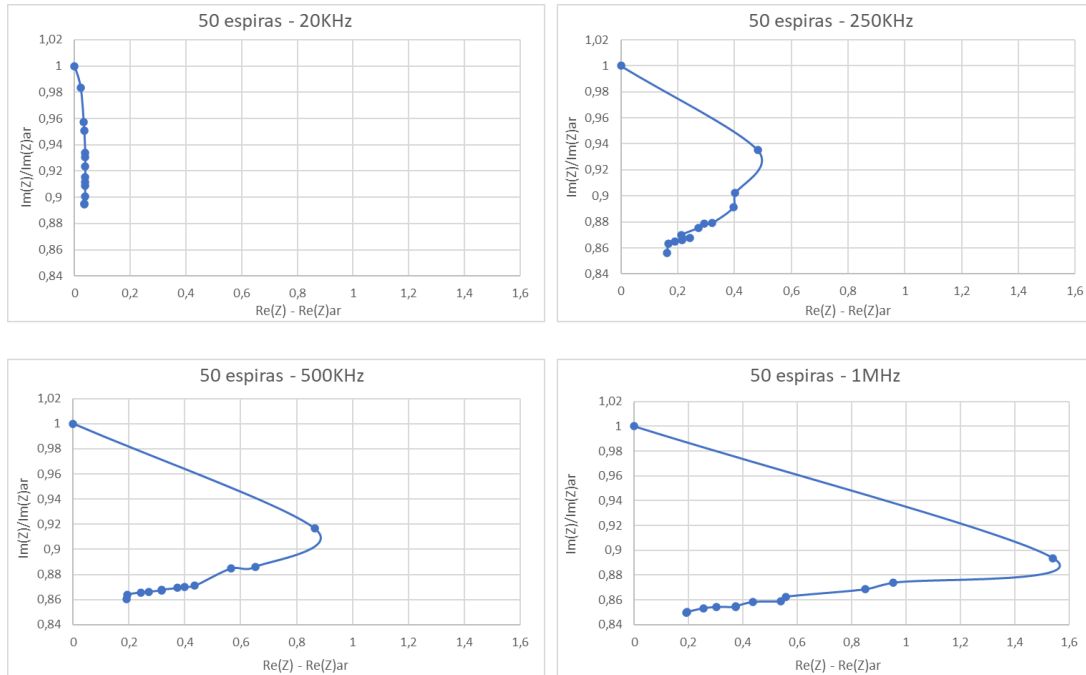


Figura 4.2 - Planos de Impedância da Bobina de 50 espiras.

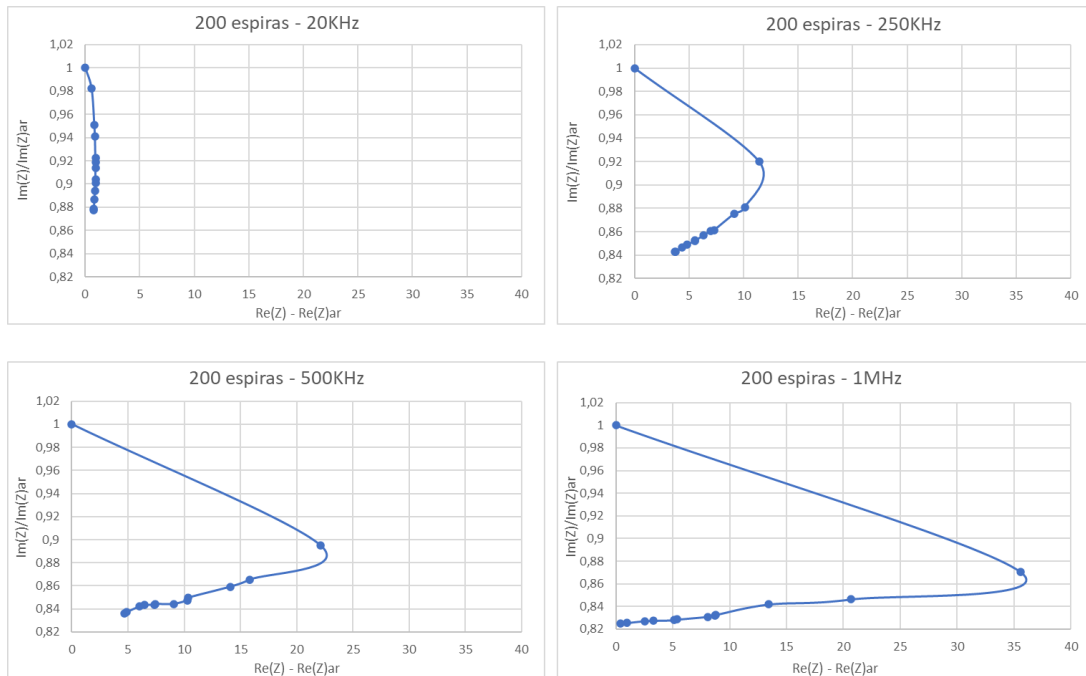


Figura 4.3 - Planos de Impedância da Bobina de 200 espiras.

Como é possível observar as bobines comportaram-se como o esperado tendo os planos de impedância o aspeto que era suposto terem.

Por último, foram realizadas as ligações soldadas dos fios de cobre aos conectores dos cabos LEMO.

5 – CRIAÇÃO DE PROVETES

Com o objetivo de conseguir detetar a existência de defeitos nos materiais produzidos por *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), foi necessário proceder à produção de provetes em metal usando o processo de WAAM, na vertente convencional e na vertente *Hot Forging*. Nestes foram produzidos defeitos artificiais, de forma a reproduzir os que se formam naturalmente durante o referido processo. Neste capítulo serão descritos os respetivos provetes para posterior inspeção através de técnicas END.

5.1 – Defeitos no fabrico

Para tentar simular defeitos que podem ocorrer durante a produção de peças pelo processo do WAAM, tais como porosidades e vazios, foram criados vários provetes, em que foram realizadas quatro camadas de WAAM *Hot Forging* (Figura 5.1 a)). De seguida, foi adicionada uma pequena quantidade de giz (Figura 5.1 b)), que faz com que o arco elétrico não funcione corretamente e que, conseqüentemente, surjam porosidades e vazios. Foi, então, produzida uma quinta camada (Figura 5.1 c)) por cima da camada com giz e adicionado novamente giz (Figura 5.1 d)), apesar de noutra secção do cordão. De seguida, foi adicionada uma sexta e última camada (Figura 5.1 e)).

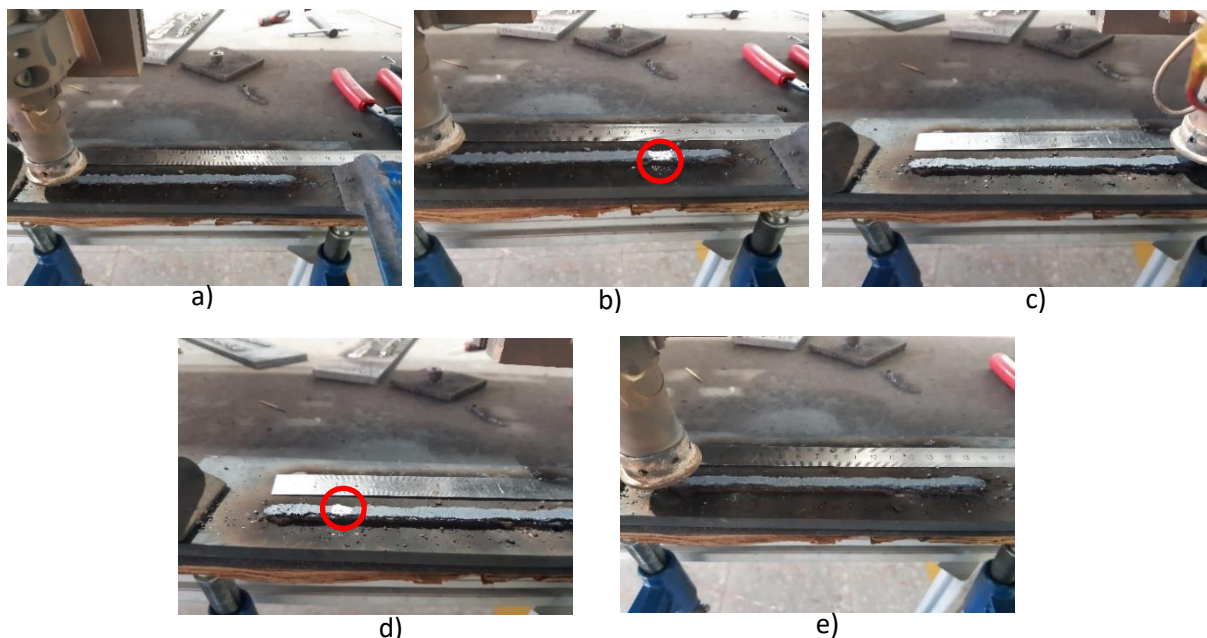


Figura 5.1 - Produção de um provete WAAM com porosidades e vazios.

Após este procedimento, o cordão ficou com defeitos entre os 11 e 12 cm na quinta camada, e na sexta camada com defeitos entre os 3 e 4 cm do cordão.

5.2 – Defeitos na peça

Outros tipos de defeitos foram, também, realizados, nomeadamente furos. O objetivo de testar este tipo de defeito é devido ao facto de se saber previamente a sua localização e tamanho e, por conseguinte, sabe-se, em teoria, que resultado é suposto obter. Assim, quando comparado com o resultado experimental, é possível obter uma prova de conceito das sondas.

Foram efetuados dois provetes com furos, todos os furos têm um diâmetro de 2,5 mm, sendo um em WAAM *Hot forging* com um único furo, para ser inspecionado por sondas de US (Figura 5.2). O outro provete foi realizado em WAAM convencional, com três furos, para ser inspecionado por sondas de CI (Figura 5.3).



Figura 5.2 - Provette com um furo para inspeção por US.



Figura 5.3 - Provette com furos para a inspeção por CI.

Metade da parte superior de um cordão de WAAM foi, ainda, maquinada, de forma a que esta ficasse lisa, uma vez que as sondas de ultrassons necessitam de uma superfície plana para conseguir obter bons resultados. Este provete irá permitir perceber as diferenças de uma superfície plana para uma superfície resultante do *Hot Forging* WAAM, que, na teoria, é também plana.



Figura 5.4 - Provette de WAAM maquinado.

6 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

6.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente através das diferentes técnicas descritas anteriormente.

Com o método de US, utilizaram-se sondas por contacto em placas padrões de alumínio e aço para testar a fiabilidade das sondas, empregaram-se também para testar a deteção defeitos em cordões de WAAM. Posteriormente foi desenvolvida a técnica de US por imersão de modo a comprovar a deteção dos vazios nos provetes impressos. Inspeccionaram-se os vários provetes produzidos por WAAM *Hot forging*.

Na inspeção por correntes induzidas, foram testados cordões de WAAM convencional com defeitos, a bobina foi colocada em três direções diferentes com o objetivo de no futuro reunir as 3 direções em uma única sonda.

6.2 – Resultados das Sondas de Ultrassons

O equipamento de medição usado no método de inspeção por ultrassons foi o *Krautkramer USM 36* comercializado pela *General Electric®*. Como acoplante no caso da inspeção por contacto foi utilizada vaselina sólida, enquanto na inspeção por imersão o acoplante é a água. Na Figura 6.1 é ilustrada a montagem experimental na inspeção dos provetes com as sondas de contacto.

6.2.1 - Caracterização das sondas no ar



Figura 6.1 - Configuração ensaios de US por contacto.

O primeiro ensaio realizado teve como propósito visualizar o sinal e compará-lo com o das sondas comerciais, o ensaio consistiu em ligar as sondas ao *Krautkramer USM 36* e definir o mesmo ganho (34 dB) para todas as sondas, mantendo cada sonda no ar, sem contacto com qualquer material. Os sinais obtidos podem observar-se na Figura 6.2.

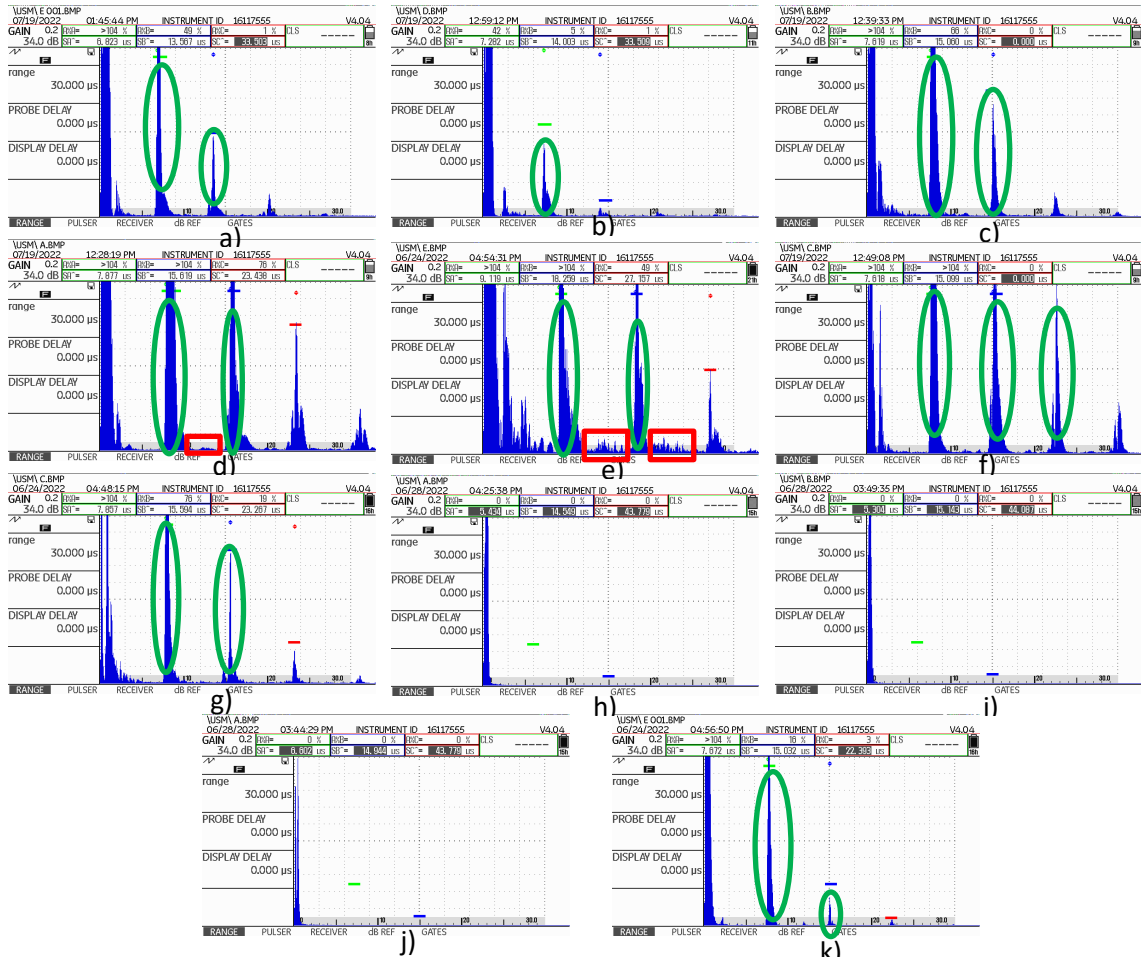


Figura 6.2 - A-scan no ar: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.

Legenda:

- Ecos Parasitas ○
- Ruído □

Os ecos parasitas representados foram provocados pelo uso do calço, logo existem em todas as sondas que foram produzidas no laboratório e existem também na sonda da sonotec, uma vez que esta tinha um calço removível fornecido com a sonda e que foi utilizado neste ensaio, estes ecos podiam ser diminuídos caso fosse adicionada uma maior quantidade de amortecimento como é o caso da sonda da Figura 6.2 b) mas isso implicava uma acrescida dificuldade na deteção de sinais.

Para além dos ecos parasitas é possível observar quais sondas têm mais ruído quando o ganho é 34dB, as sondas comerciais apresentam um ruído residual, no entanto duas das sondas produzidas e com especial destaque para a sonda da Figura 6.2 e) já apresentam ruído, isto tem como possível causa o facto de as faces do calço não estarem completamente paralelas.

6.2.2 - Caracterização das sondas em placas padrão de aço e de alumínio

Realizou-se uma inspeção em placas padrão, para verificar se as sondas conseguiram analisar os diferentes materiais. Em primeiro lugar, inspecionou-se uma placa padrão de alumínio com uma altura de 10 mm (Figura 6.3).

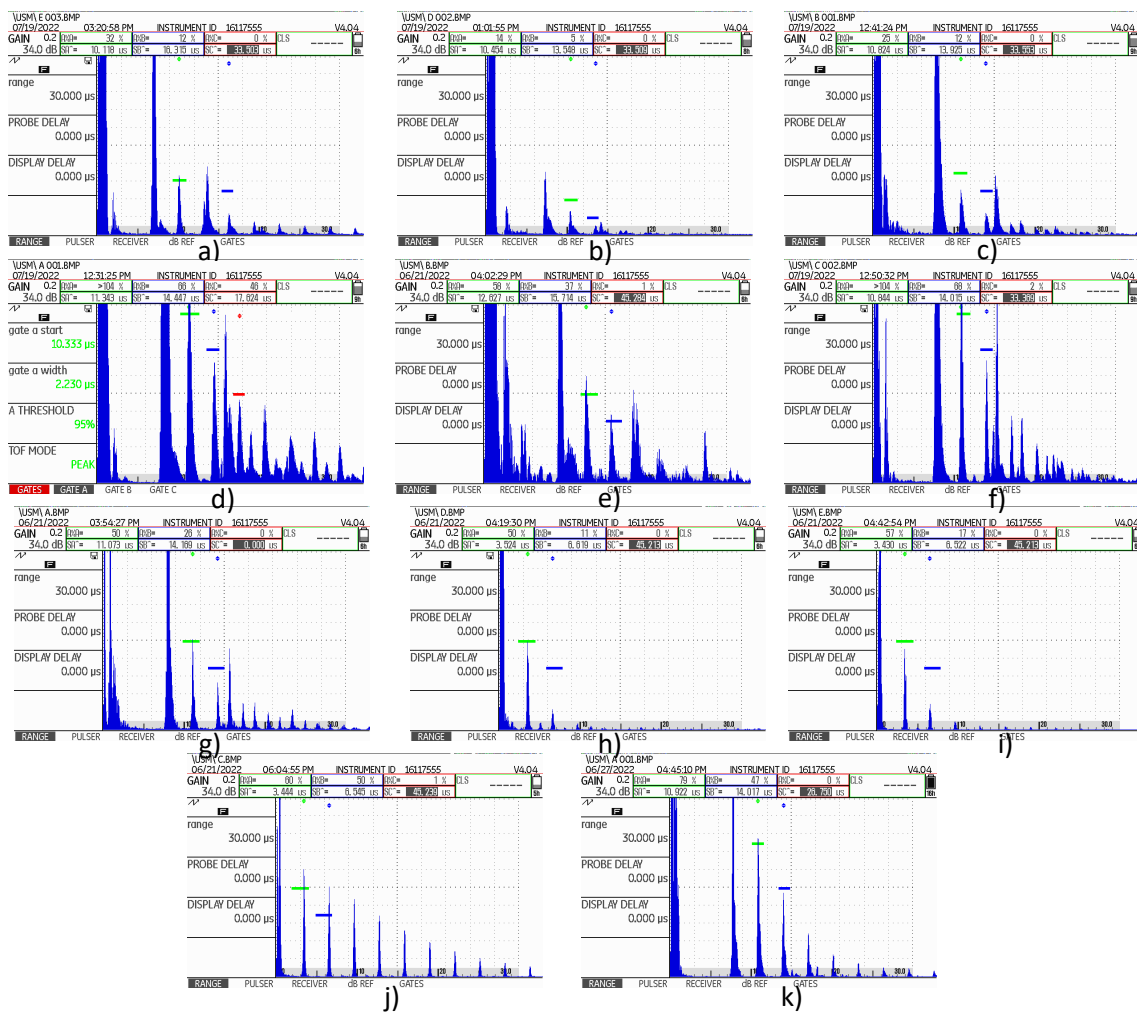


Figura 6.3 - A-scan no alumínio: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.

Através deste ensaio foi possível chegar a conclusão que todas as sondas conseguiram analisar o material, neste caso, alumínio sem defeitos, de uma forma correta, uma vez que a diferença entre os picos do material é semelhante em todas as sondas.

Efetuiu-se uma segunda inspeção numa placa padrão, mas com um material diferente, aço em vez de alumínio, e com uma altura de 8 mm (Figura 6.4).

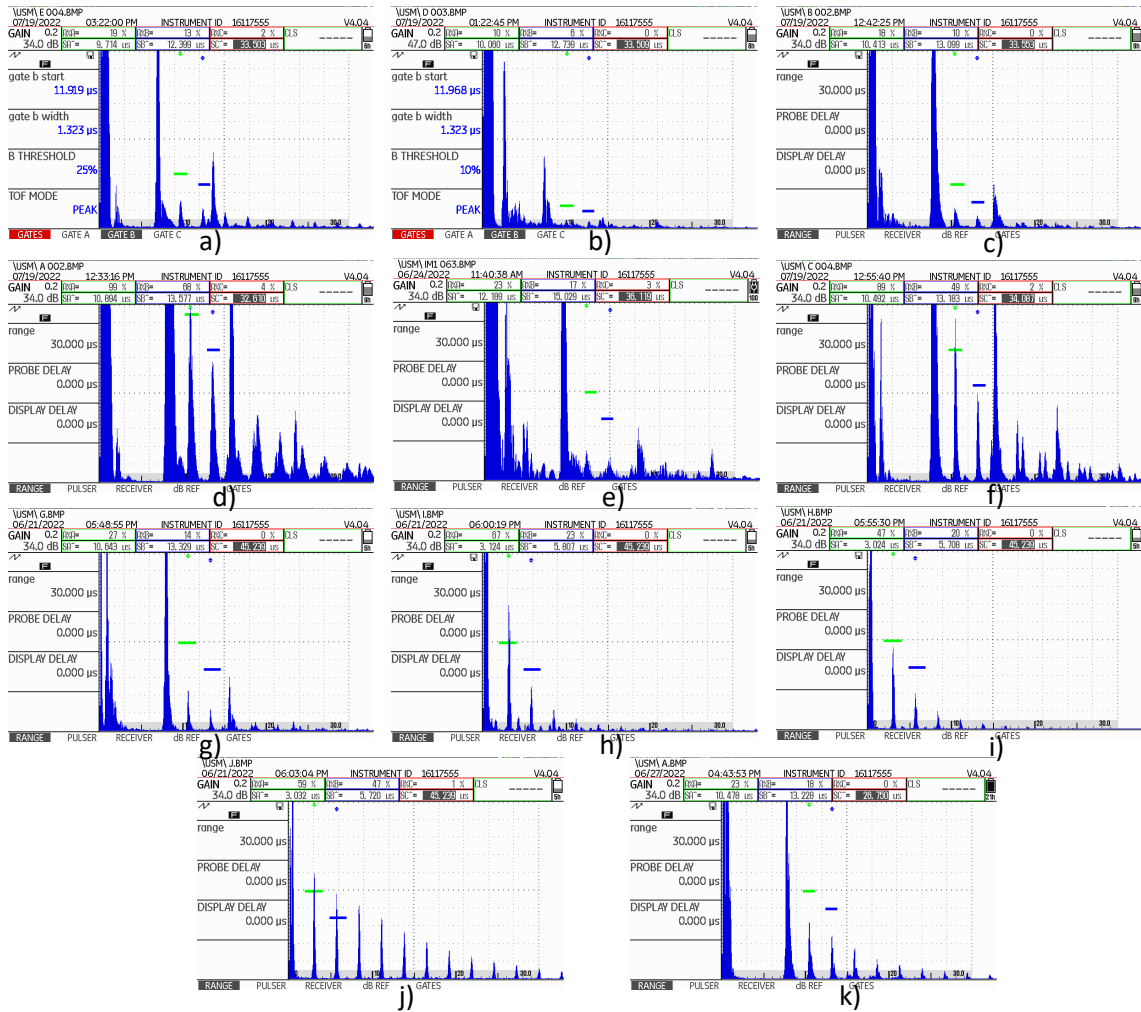


Figura 6.4 - A-scan no aço: a) Sonda 5 mm 8 MHz b) Sonda 6,5 mm 8 MHz c) Sonda 3 mm 8 MHz d) Sonda 5,334 mm 8 MHz e) Sonda 6,35 mm 6 MHz f) Sonda 3,5 mm 8 MHz g) Sonda 5 mm 10 MHz h) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz i) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz j) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz k) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.

Como verificado anteriormente todas as sondas conseguiram analisar o material de uma forma correta e a diferença entre os picos do material é semelhante em todas as sondas, a distinção entre este ensaio e o anterior reside no novo material, aço, e na menor espessura daí existir um tempo menor entre picos, em comparação com o alumínio, para além disso é possível observar que para o mesmo ganho, o sinal no aço é mais fraco do que no alumínio, ou seja, quando se inspecionar os cordões de WAAM será necessário aumentar o ganho, sendo que para a sonda da Figura 6.4 b) que possui uma maior quantidade de amortecimento foi necessário aumentar o ganho para obter um sinal e que mesmo assim fica pouco perceptível, o que mostra que a solução dos ecos parasitas não passa por aumentar a quantidade de amortecimento.

6.2.3 - Inspeção de cordão WAAM *Hot Forging* por Contacto

Foram inspecionados numa primeira fase cordões de WAAM *Hot Forging* sem defeitos para verificar a possibilidade de obter um bom sinal. Tal como foi referido no capítulo 6.1.2 foi necessário aumentar o ganho para detetar algum sinal. Ao executar este aumento para o dobro (68 dB) o ruído aumentou consideravelmente nas sondas produzidas no laboratório (Figura 6.5), o que tornou impossível detetar defeitos em WAAM.

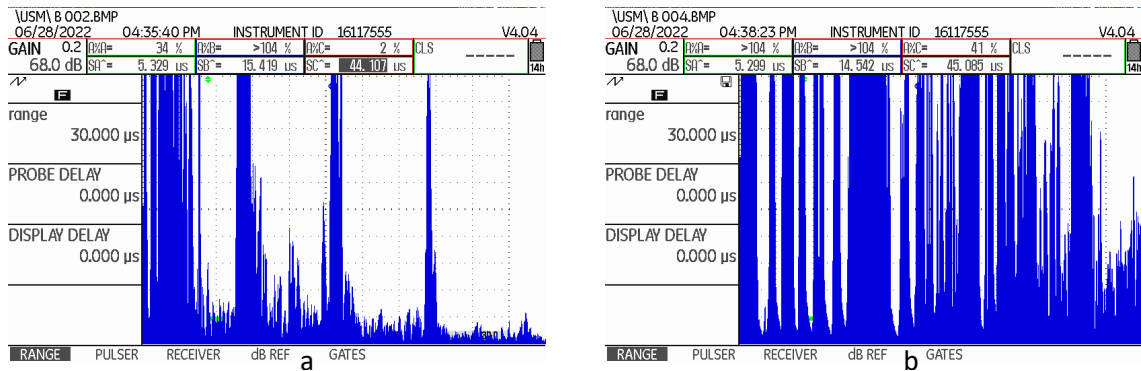


Figura 6.5 - A-scan no ar: a) Sonda 5 mm 10 MHz b) Sonda 6,35 mm 6 MHz

Como é possível observar na Figura 6.5 a) que correspondia à sonda que tinha melhor sinal nas inspeções das placas padrão, o ruído atinge valores muito elevados para, de uma forma eficaz, distinguir que alterações no sinal correspondem a deteções do cordão de WAAM. Já na Figura 6.5 b) que já possuía ruído nas inspeções anteriores, este escala para valores que impossibilitam operar com a sonda. Esta quantidade de ruído deve-se muito provavelmente ao facto de o calço das sondas não ter ficado perfeitamente direito apesar dos esforços feitos nesse sentido.

Em relação às sondas comerciais, a 68 dB continuam sem apresentar ruído, no entanto também foram encontradas muitas dificuldades em conseguir detetar um sinal, pelo que apenas se obteve um único eco, pouco perceptível, em um cordão de WAAM sem defeitos, como é possível observar na Figura 6.6.

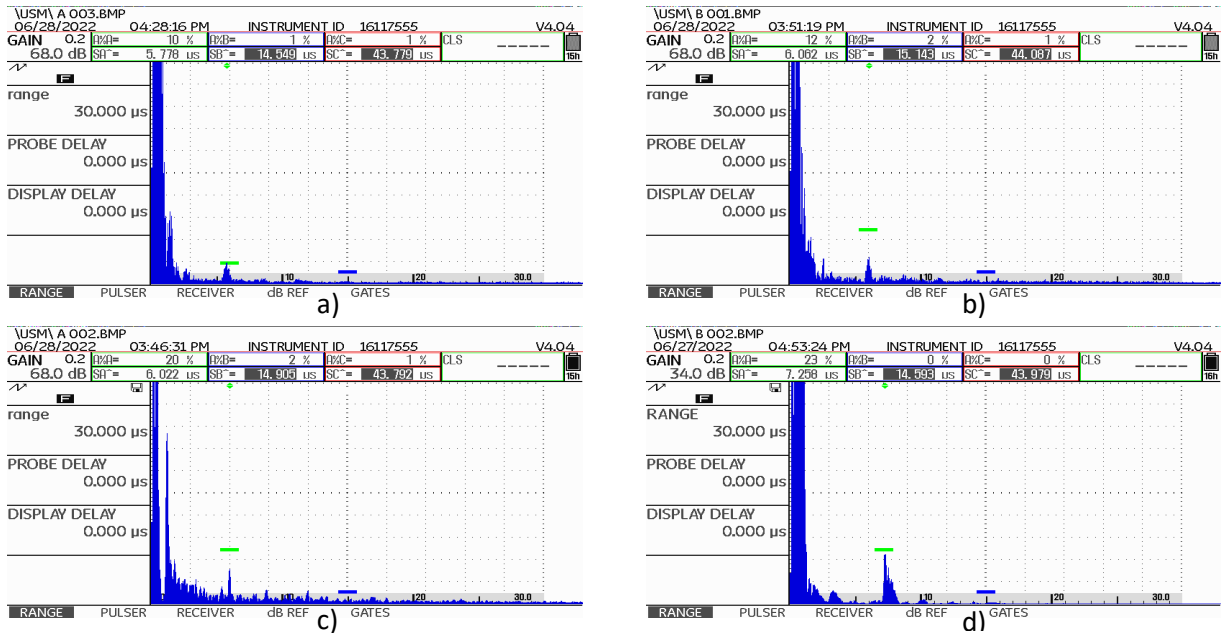


Figura 6.6 - A-scan no cordão de WAAM sem defeitos: a) Sonda Olympus 3 mm 5 MHz b) Sonda Olympus 3 mm 10 MHz c) Sonda Olympus 6 mm 15 MHz d) Sonda Sonotec 6 mm 10 MHz.

Esta dificuldade deve-se ao facto de apesar de na teoria um cordão feito por WAAM *Hot forging* ficar plano, experimentalmente isso não se verifica tendo muitas falhas o que fazem com que não seja possível assentar a sonda completamente no cordão e mesmo sendo posto um excesso de acoplante para tentar ultrapassar esta dificuldade não foram obtidos melhores resultados.

Em relação a deteção de defeitos no cordão de WAAM devido aos fatores já referidos neste capítulo, foi impossível detetá-los pelo método de US por contato quer com as sondas produzidas quer com as sondas comerciais.

6.2.4 - Inspeção de cordão WAAM *Hot Forging* por imersão

Para a técnica de US por imersão foi utilizada uma mesa xy desenvolvida pelo NOVA NDT Lab., que permite efetuar um varrimento ao longo da área do provete a inspecionar. Esta mesa possui um curso útil de 50 × 50 mm e uma resolução espacial máxima de 0,43 μm. Na Figura 6.7 é apresentada a montagem experimental durante os ensaios de ultrassons por imersão. O movimento da mesa e a aquisição de dados xy é realizada através de um programa criado no software LabVIEW. Os dados são adquiridos com recurso ao referido equipamento de ultrassons, onde a amplitude foi designada como valor de output e lida através da ligação a uma placa DAQ-6008 da *National Instruments®*. Após aquisição dos dados estes são processados pelo software LabVIEW, que os analisa, apresenta e armazena. Este software permite a automação do equipamento, proporcionando a criação de uma interface onde estão localizados os controlos para iteração com o equipamento e a definição dos parâmetros para cada ensaio. Deste modo, é possível controlar a área a inspecionar e a resolução do deslocamento e posição da sonda.

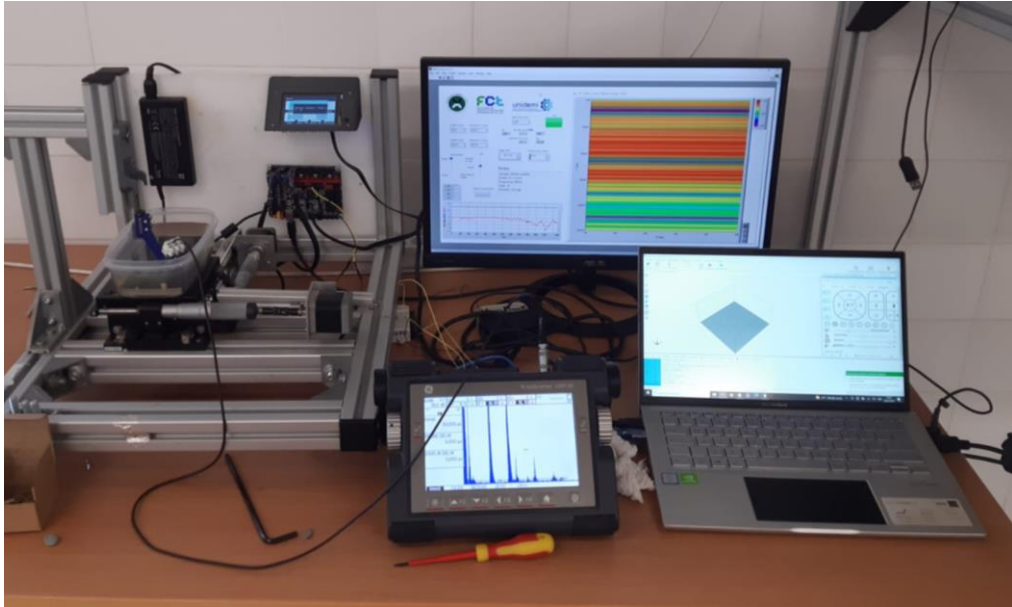


Figura 6.7 - Configuração dos ensaios de US por imersão.

Foi necessário criar um suporte para fixar as sondas à mesa, de modo a garantir que esta esteja sempre na mesma posição ao longo do ensaio. Este suporte foi produzido através de impressão 3D a partir do modelo de *SolidWorks*® ilustrado na Figura 6.8.

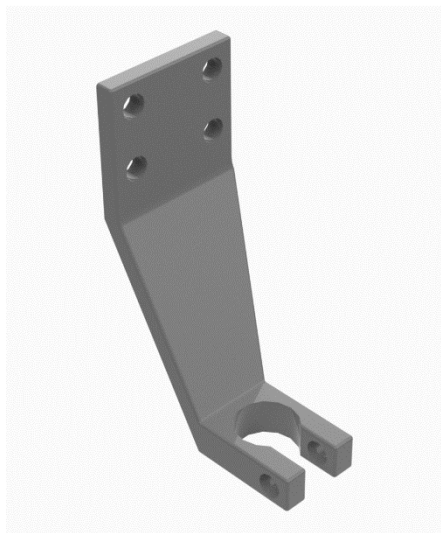


Figura 6.8 – Modelo do suporte sondas de US.

O ensaio é realizado da seguinte forma: seleciona-se com uma gate do equipamento um eco do material quando não existem defeitos, e depois é feita uma análise do provete, quando forem detetados defeitos há uma aproximação da amplitude do eco a 0 uma vez que o eco irá mover de sítio.

Foram encontradas várias dificuldades, e uma das hipóteses consideradas para o facto de não se estar a conseguir detetar defeitos era que, o sinal assim que chegava ao provete era devolvido, ou seja, não atravessava o material tornando-se assim impossível detetar defeitos. Para testar esta hipótese usou-se uma placa padrão que tinha um defeito que era aberto para a parte superior (Figura 6.9). Para que desta maneira fosse possível ver se de facto estava a acontecer a situação referida.

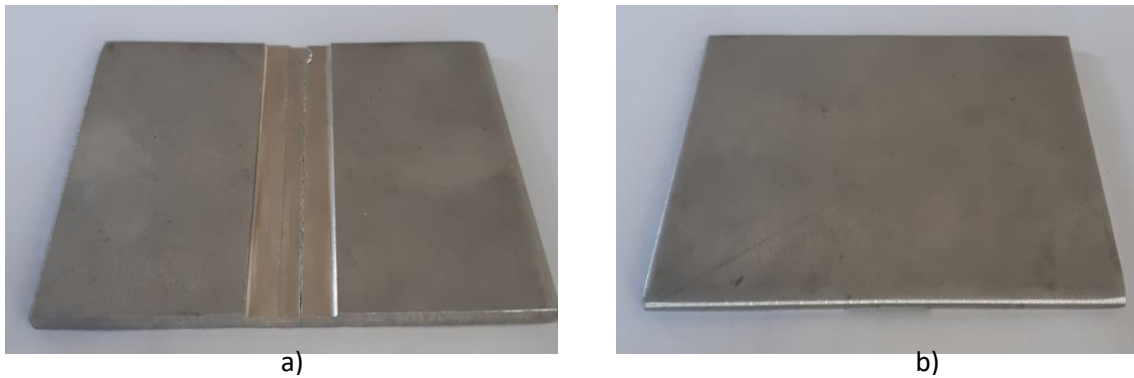


Figura 6.9 - Placa padrão com defeito: a) defeito para cima b) defeito para baixo

Através deste ensaio confirmou-se que a hipótese estava certa, uma vez que quando o defeito da placa padrão estava virado para cima foi possível detetar, mas quando se virou o defeito da placa padrão para baixo, o sinal foi constante, não sendo detetado qualquer defeito (Figura 6.10).

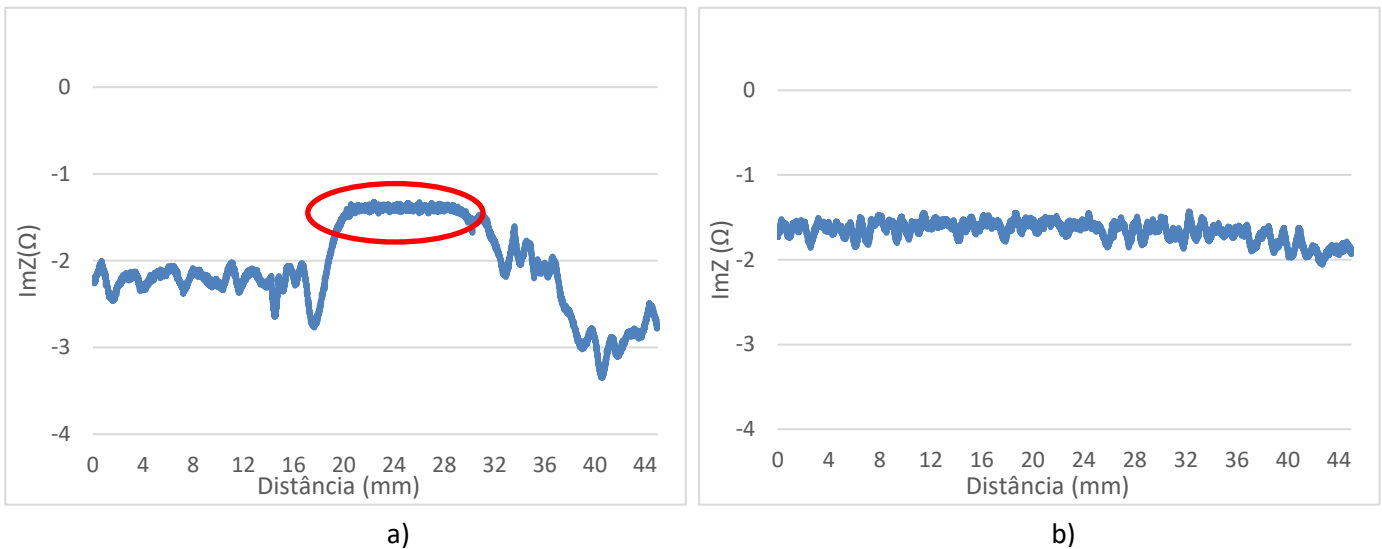


Figura 6.10 - Sinal de inspeção da placa padrão: a) placa com o defeito virado para cima b) placa com o defeito virado para baixo

Uma possibilidade para o sinal não atravessar os provetes era a distância a que a sonda se encontrava do provete foram por isso realizados vários ensaios variando a altura a que a sonda se encontrava e outros fatores tais como, frequência e ganho. E em 1 desses ensaios foi possível obter um sinal que o som foi transmitido pela peça e que fosse assim capaz de detetar o defeito (Figura 6.11).



Figura 6.11 - Sinal do ensaio de US a um provete WAAM *Hot Forging* com um furo.

Este ensaio foi realizado com a sonda cujo piezoelétrico era do material Pz27 tinha 5 mm de diâmetro e 10 MHz frequência de ressonância, no equipamento foi selecionada uma frequência de 10 MHz e um ganho de 45 dB, a sonda estava a uma altura de 5 mm do provete e ambos estavam submersos.

Como pode ser observado na Figura 6.11 entre os 11,5 mm e os 14 mm aproximadamente, na parte selecionada, foi detetado um defeito, e observando o cordão podemos então concluir que corresponde ao furo.

Apesar de se ter usado condições semelhantes para realizar vários ensaios, de modo a conseguir detetar defeitos, não foi possível, estima-se que é necessária uma combinação de fatores altura e frequência que não corresponde a cálculos teóricos para que seja possível o sinal atravessar a peça, e essa condição apesar de terem sido feitos vários ensaios para as restantes sondas não foi alcançável. O que torna este método não viável, para fazer a análise de provetes de WAAM.

6.3 – Resultados das Sondas de Correntes Induzidas

Os ensaios de correntes induzidas foram realizados na mesa xy referida no subcapítulo 6.2.4, recorrendo ao uso do equipamento *Nortec 600* da *Olympus*. Este equipamento permite a leitura da impedância das sondas capaz de funcionar numa gama de frequências entre os 50 Hz e os 12 MHz. O ganho é ajustável até aos 90 dB com incrementos de 0,1 dB e ângulo variável de 1 ° em 1 °.

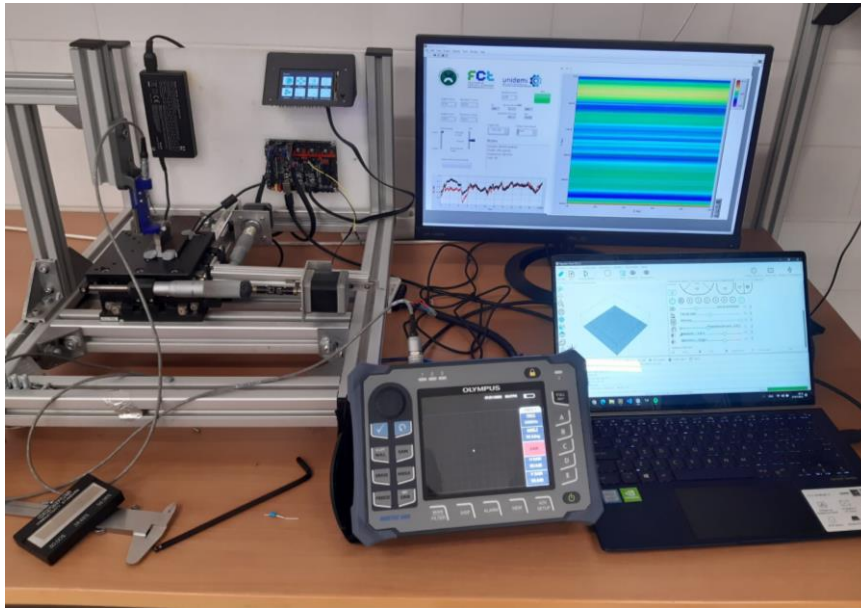


Figura 6.12 - Configuração ensaios de CI.

Tal como tinha acontecido nos Ultrassons foi necessário criar um suporte para fixar as sondas à mesa, de modo a garantir que esta esteja sempre na mesma posição ao longo do ensaio. Este suporte foi produzido através de impressão 3D a partir do modelo de *SolidWorks®* ilustrado na Figura 6.13.

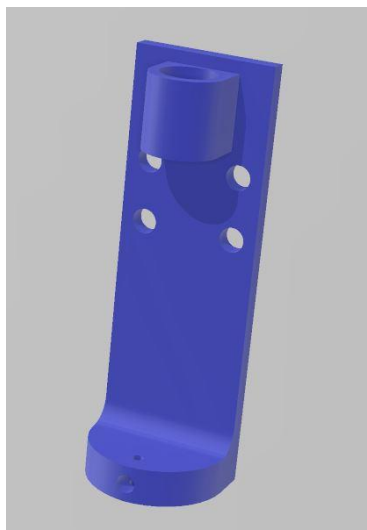


Figura 6.13 - Modelo do suporte de sondas de CI.

Foram realizados 3 tipos de ensaios com diversas sondas em que o ângulo em que o cordão era analisado foi mudado como é possível observar pela Figura 6.14. As posições serão designadas da esquerda para a direita respetivamente por posição 1, posição 2 e posição 3.

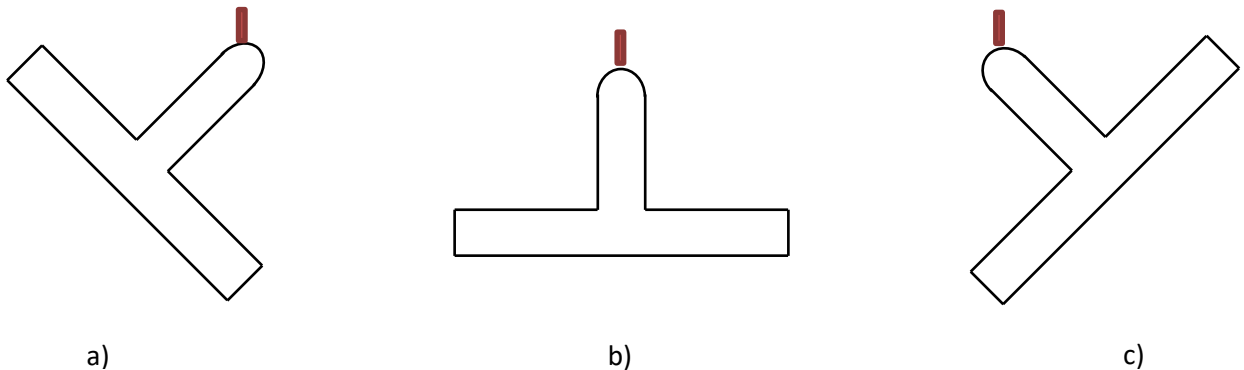


Figura 6.14 - Esquema dos ensaios de CI.

6.3.1 Inspeção num cordão de WAAM com defeitos

Como foi referido no capítulo 6.3 foram feitos vários ensaios em 3 posições para cada uma das sondas em que se varia a frequência e o ganho. O *lift-off* vai ser sempre constante e é de 0,1 mm.

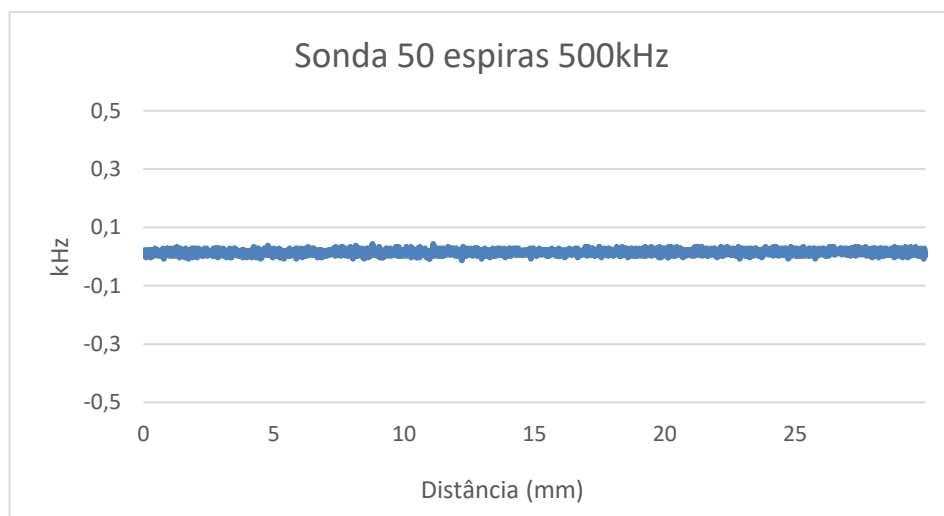


Figura 6.15 – Sinal do ensaio de CI com a sonda de 50 espiras.

Com a sonda de 50 espiras não foi possível obter bons resultados, pois independentemente da frequência, do ganho e da posição da sonda, não houve alterações no campo magnético secundário (H_s), logo não há variação no sinal, ou seja não foi possível detetar qualquer defeito.

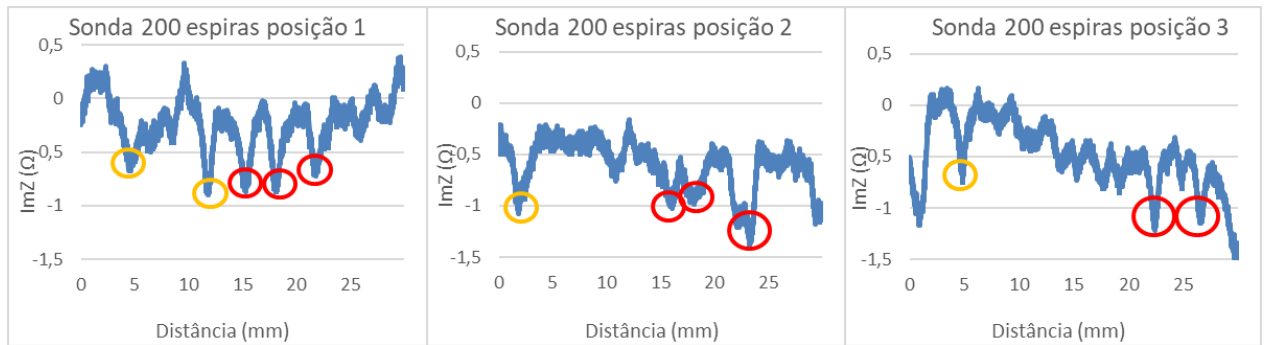


Figura 6.16 -Sinal dos ensaios de CI com a sonda de 200 espiras.

Legenda:

- Defeitos fabricados ○
- Defeitos desconhecidos ○

Na sonda de 200 espiras a 200 kHz e com um ganho de 95 dB, já foi possível detetar alguns dos defeitos (assinalado com um círculo vermelho), foram também detetados ruído que pode ser defeitos que não foram fabricados (assinalado com um círculo laranja). No entanto existe muito ruído em todos os sinais devido a parte superior de um cordão WAAM não ter um bom acabamento e assim a parte superior fica irregular, o que não permite ter a certeza de que todos os sinais assinalados são de facto defeitos ou se são apenas ruído.

Foram feitos outros ensaios com características diferentes, mas as enunciadas anteriormente foram as que permitiram obter os melhores resultados.

Foram também feitos ensaios com uma sonda comercial, os resultados podem ser observados na Figura 6.17.

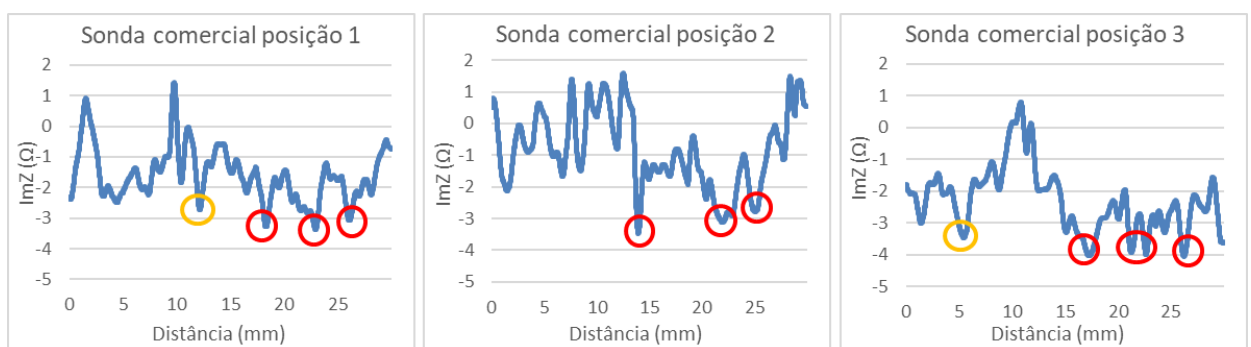


Figura 6.17- Sinal dos ensaios de CI com a sonda comercial.

Observando os gráficos da Figura 6.17 é possível concluir que a sonda comercial a 200 kHz e com um ganho de 60 dB, conseguiu detetar os 3 defeitos, estes foram detetados nas 3 posições. Existe muito ruído no sinal o que leva à deteção de falsos defeitos, mas tal deve-se à irregularidade da superfície do provete.

Os defeitos em cada ensaio variam ligeiramente de local, isto deve-se ao facto que ao mudar de posição e de sondas, nem sempre se conseguiu definir o mesmo ponto inicial de inspeção.

É possível observar que os defeitos fabricados são quase sempre detetados independentemente da posição, mas que em todos os casos há sempre ruído, seria por isso interessante avaliar uma sonda que tivesse as 3 bobinas, para desta forma a componente do defeito ser acentuada e o ruído diminuir, para além disso garantia que os sinais eram obtidos em simultâneo e que tinham o mesmo ponto inicial de inspeção.

7 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 – Introdução

Este capítulo é dividido entre as conclusões e possíveis desenvolvimentos futuros nas áreas abordadas ao longo deste trabalho. As conclusões estão implícitas nos diversos comentários realizados ao longo dos capítulos respetivos. Deste modo, no presente capítulo, pretende-se sintetizar essa informação dando evidência aos fatores mais relevantes que foram obtidos na análise dos ensaios.

7.2 – Conclusões

7.2.1 – Conclusões obtidas através dos ensaios de ultrassons

Através do método de ultrassons, verificou-se que a estratégia utilizada para a medição da velocidade do som, e do coeficiente de atenuação acústica, permite obter resultados precisos. Contudo, conclui-se que não é possível aplicar esta técnica aos provetes de WAAM *Hot forging*, pois a parte superior dos cordões não é completamente plana, e determinadas sondas têm demasiado ruído, devido ao facto de não possuírem o calço com as faces completamente paralelas entre si.

Através da técnica de ultrassons por imersão, foi possível realizar uma inspeção dos cordões de WAAM *hot forging*. Contudo, foram encontradas muitas dificuldades, nomeadamente o facto de o sinal não percorrer o provete. No entanto, em um dos ensaios em que se utilizou esta técnica, com a sonda Pz27 5 mm 10 MHz, detetou-se o defeito no provete que continha um furo de 2 mm.

Nos provetes com giz, nenhum método de ultrassons permitiu detetar defeitos.

7.2.2 – Conclusões obtidas através dos ensaios de correntes induzidas

Através do método de correntes induzidas, foram detetados os 3 defeitos, quer com a sonda comercial, quer com as sondas de 200 espiras, nas três posições em que os ensaios foram realizados. No entanto, devido à rugosidade do cordão existente ruído no sinal, o que dificulta uma perceção clara dos defeitos.

Na caracterização da impedância e da fase, que variam conforme a frequência, da bobina de 200 espiras a frequência ideal foi de 400 kHz. No entanto, nos ensaios experimentais a frequência que permitiu obter melhores resultados foi 200 kHz.

A sonda de 50 espiras não permitiu detetar nenhum defeito uma vez que não há alterações ao campo magnético, por isso conclui-se que fazer sondas com apenas 50 espiras não é viável. Para além disso, a caracterização da impedância e da fase, que variam conforme a frequência, da bobina de 50 espiras, não permitiu ter uma noção de qual frequência ótima para a sondas de CI.

7.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros

7.3.1 – Desenvolvimentos futuros para o método de ultrassons no WAAM

Em relação à construção das sondas, seria interessante garantir que os calços ficassem com as faces paralelas. Tal passa por garantir que, quando no torno se realiza o facejamento no torno e se sangra, o acabamento fica com qualidade e não necessita de uma maquinação adicional, que por vezes acaba por fazer com que as faces não fiquem paralelas.

Na inspeção de cordões de WAAM *hot forging*, a utilização de folhas de silicone como acoplante poderá tornar possível que a dificuldade de acoplamento, que existe devido ao facto do cordão não ser completamente plano, seja ultrapassada. Para além disso, o próprio método de *hot forging* está, ainda, em evolução. No futuro, este irá produzir provetes mais planos e constantes do que atualmente, o que facilitará o uso de ultrassons por contacto.

7.3.2 – Desenvolvimentos futuros para o método de correntes induzidas no WAAM

Tendo em conta o ruído que existe na deteção dos defeitos nas correntes induzidas, e considerando também que as três posições testadas permitiram identificar o defeito, poderá ser realizada uma sonda com três bobinas, uma para cada posição testada (Figura 7.1). Desta forma, iria ser permitido que os vários sinais fossem obtidos em simultâneo e comparados, para que fosse possível definir melhor a deteção dos defeitos e reduzir o ruído.

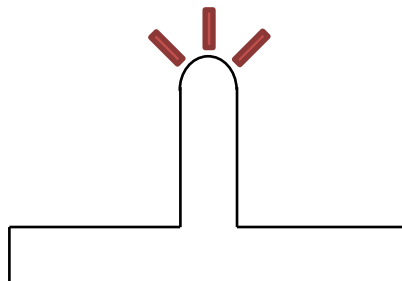


Figura 7.1 - Esquema de ensaio com 3 bobinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing | ASTM Standardization News.” <https://sn.astm.org/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html> (accessed Jan. 19, 2022).
- [2] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, no. 6. Springer New York LLC, pp. 1917–1928, 2014. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [3] C. Xia *et al.*, “A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 57. Elsevier B.V., pp. 31–45, Oct. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.08.008.
- [4] S. Singh, S. K. Sharma, and D. W. Rathod, “A review on process planning strategies and challenges of WAAM,” in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 47, pp. 6564–6575. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.632.
- [5] K. Treutler and V. Wesling, “The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 18. MDPI, Sep. 01, 2021. doi: 10.3390/app11188619.
- [6] B. Wu *et al.*, “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35. Elsevier Ltd, pp. 127–139, Oct. 01, 2018. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [7] D. Subbaram Naidu, S. Ozcelik, and K. L. Moore, *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*. 2003.
- [8] S. Hashmi, G. Ferreira Batalha, C. J. Van Tyne, and B. Yilbas, Eds., *Comprehensive Materials Processing*. 2014.
- [9] L. Liu, Ed., *Welding and Joining of Magnesium Alloys*. 2010.
- [10] J. Feng, H. Zhang, and P. He, “The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding,” *Mater Des*, vol. 30, no. 5, pp. 1850–1852, May 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.015.

- [11] X. Chen *et al.*, “Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) System,” *Journal of Surface Investigation*, vol. 12, no. 6, pp. 1278–1284, Nov. 2018, doi: 10.1134/S102745101901004X.
- [12] D. Galeazzi, R. H. G. e. Silva, I. O. Pigozzo, A. F. da Rosa, A. S. Pereira, and C. Marques, “Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under a view of additive manufacturing,” *Welding in the World*, vol. 66, no. 7, pp. 1369–1380, Jul. 2022, doi: 10.1007/s40194-022-01298-1.
- [13] V. R. Duarte, T. A. Rodrigues, N. Schell, R. M. Miranda, J. P. Oliveira, and T. G. Santos, “Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM),” *Addit Manuf*, vol. 35, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101193.
- [14] Y. Lu *et al.*, “Double-electrode arc welding process: Principle, variants, control and developments,” *J Manuf Process*, vol. 16, no. 1, pp. 93–108, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.jmapro.2013.08.003.
- [15] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, and O. M. Akselsen, “Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire,” *J Mater Process Technol*, vol. 259, pp. 68–74, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014.
- [16] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang, and H. Frei, “Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure,” *Addit Manuf*, vol. 26, pp. 138–146, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.12.013.
- [17] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [18] J. B. Bento, A. Lopez, I. Pires, L. Quintino, and T. G. Santos, “Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts,” *Addit Manuf*, vol. 29, p. 100782, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.100782.
- [19] S. Gholizadeh, “A review of non-destructive testing methods of composite materials,” in *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 1, pp. 50–57. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- [20] A. el Kouche and H. S. Hassanein, “Ultrasonic non-destructive testing (NDT) using wireless sensor networks,” in *Procedia Computer Science*, 2012, vol. 10, pp. 136–143. doi: 10.1016/j.procs.2012.06.021.

- [21] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and P. A. Soni, "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review," in *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 3690–3698. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.
- [22] P. Cawley, "Non-destructive testing - current capabilities and future directions."
- [23] L. S. Rosado, T. G. Santos, P. M. Ramos, P. Vilaça, and M. Piedade, "A new dual driver planar eddy current probe with dynamically controlled induction pattern," *NDT and E International*, vol. 70, pp. 29–37, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.09.009.
- [24] R. B. Thompson and S. Begum, "NDT Techniques: Ultrasonic," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02684-9.
- [25] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. G. Santos, J. P. Sousa, and L. Quintino, "Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing," *Addit Manuf*, vol. 21, pp. 298–306, May 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.03.020.
- [26] "Nondestructive Evaluation Techniques: Eddy Current Testing." <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/Instrumentation/impedanceplane.xhtml> (accessed Jan. 19, 2022).
- [27] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565, Mar. 2011. doi: 10.3390/s110302525.
- [28] S. C. Mukhopadhyay, "Novel Planar Electromagnetic Sensors: Modeling and Performance Evaluation," *Sensors*, vol. 5, pp. 546–579, 2005, [Online]. Available: <http://www.mdpi.org/sensors>
- [29] D. Marques and A. Lopes, "DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL DO DEPARTAMENTO)."
- [30] Y. Xie, J. Li, Y. Tao, S. Wang, W. Yin, and L. Xu, "Edge effect analysis and edge defect detection of titanium alloy based on eddy current testing," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 24, pp. 1–15, Dec. 2020, doi: 10.3390/app10248796.
- [31] P. Chandra and R. Bhagi, "Eddy Current Testing: Basics," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/258935465>

- [33] “FAQs | Resources | Meggitt A/S | Ferroperm | CTS Ferroperm.”
<https://www.meggittferroperm.com/resources/faq/> (accessed Sep. 01, 2022).
- [34] “Soft PZT (Navy II).” [Online]. Available:
www.meggittferroperm.com
- [35] “Datasheet-soft-pz29”. [Online]. Available:
www.meggittferroperm.com
- [36] P. Materials, P. Material, P. Materials, and P. Ceramic Piezo Technology Brochure,
“Piezoceramic Materials, Piezo Material, PZT Materials, PI Ceramic Piezo Technology
Brochure”, Accessed: Sep. 28, 2022. [Online]. Available: www.piceramic.de

ANEXOS

Anexo 1 – Informações dos piezoelétricos Pz27

Enabling the Extraordinary
To Fly To Power To Live

MEGGITT

DATA SHEET

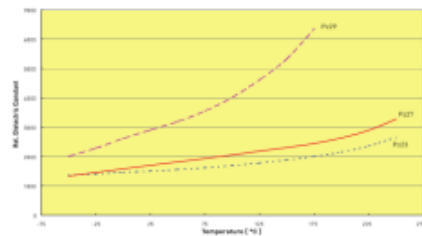
Soft relaxor type PZT, Type Pz27

05 Material properties

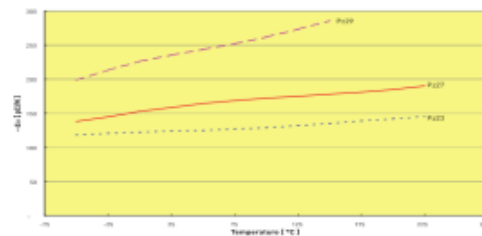
Electrical	Symbol	Pz27
Relative dielectric permittivity at 1 kHz	K_{33T}	1800
Dielectric dissipation factor at 1 kHz	$\tan\delta$	17×10^{-3}
Curie temperature	$T_c >$	350 °C
Recommended working range	$<$	250 °C
Electromechanical		
Coupling factors	K_p	0.59
	K_t	0.47
	K_{33}	0.70
Piezoelectric charge coefficient	d_{33}	440 pC/N
	d_{15}	500 pC/N
Mechanical		
Mechanical Quality Factor	$Q_{m,t}$	80
Density	ρ	7.70 g/cm ³

Note: Due to continuous process improvement, specifications are subject to change without notice. Please be aware that extreme dimensions and geometries can lead to exaggeration in tolerances in all materials.

06 Technical performance



Temperature dependence of the free dielectric constant of Pz27 in comparison with other soft PZT materials from Ferroperm.



Temperature dependence of the piezoelectric charge coefficient, d_{31} , for Pz27 in comparison with other soft PZT materials from Ferroperm.

Meggitt A/S

Our product line includes: Ferroperm™ Piezoelectric ceramics, Multilayer, Thick-film, InSensor™, PiezoPaint™

MSSDK_P224_201812

Tel: +45 49 12 71 00
www.meggittferroperm.com

A 1 - Informações dos piezoelétricos Pz27[34].

Anexo 2 – Informações dos piezoelétricos Pz29

Enabling the Extraordinary
To Fly To Power To Live

MEGGITT

DATA SHEET

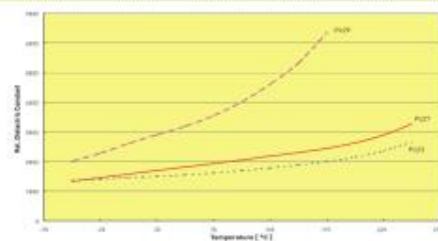
Very soft relaxor type PZT, Type Pz29

05 Material properties

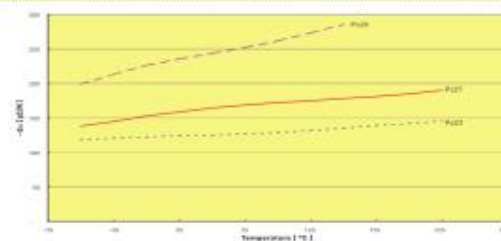
Electrical	Symbol	Pz29
Relative dielectric permittivity at 1 kHz	K_{33T}	2820
Dielectric dissipation factor at 1 kHz	$\tan\delta$	19×10^{-3}
Curie temperature	$T_c >$	235 °C
Recommended working range	$<$	150 °C
Electromechanical		
Coupling factors	K_p	0.62
	K_t	0.51
	K_{33}	0.75
Piezoelectric charge coefficient	d_{33}	575 pC/N
Mechanical		
Mechanical Quality Factor	$Q_{m,t}$	90
Density	ρ	7.45 g/cm ³

Note: Due to continuous process improvement, specifications are subject to change without notice. Please be aware that extreme dimensions and geometries can lead to exaggeration in tolerances in all materials.

06 Technical performance



Temperature dependence of the free dielectric constant of Pz29 in comparison with other soft PZT materials from Ferroperm.



Temperature dependence of the piezoelectric charge coefficient, d_{31} , for Pz29 in comparison with other soft PZT materials from Ferroperm.

Meggitt A/S

Our product line includes: Ferroperm™ Piezoelectric ceramics, Multilayer, Thick-film, InSensor™, PiezoPaint™

MS5DK_PZ24_201812

Tel: +45 49 12 71 00
www.meggittferroperm.com

Anexo 3 – Informações dos piezoelétricos PIC255



Material Data

Material type		PIC 151	PIC 255	PIC 155	PIC 153	PIC 152
Physical and dielectric properties						
Density	ρ (g/cm ³)	7.80	7.80	7.80	7.60	7.70
Curie temperature	T _c (°C)	250	350	345	185	340
Permittivity	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_{33}$ in the polarization direction	2400	1750	1450	4200	1350
	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_{11}$ perpendicular to the polarity	1980	1650	1400		
Dielectric loss factor	tan δ	20	20	20	30	15
Electromechanical properties						
Coupling factors	k _p	0.62	0.62	0.62	0.62	0.48
	k _t	0.53	0.47	0.48		
	k ₃₁	0.38	0.35	0.35		
	k ₃₃	0.69	0.69	0.69		0.58
	k ₁₅		0.66			
Piezoelectric charge constants	d ₃₁	-210	-180	-165		
	d ₃₃	500	400	360	600	300
	d ₁₅		550			
Piezoelectric voltage constants	g ₃₁	-11.5	-11.3	-12.9		
	g ₃₃	22	25	27	16	25
Acousto-mechanical properties						
Frequency constants	N _p	1950	2000	1960	1960	2250
	N ₁	1500	1420	1500		
	N ₅	1750		1780		
	N _i	1950	2000	1990	1960	1920
Elastic constants (compliance)	S _{11}^T}	15.0	16.1	15.6		
	S _{33}^T}	19.0	20.7	19.7		
Elastic constants (stiffness)	C _{33}^D}	10.0		11.1		
Mechanical quality factor	Q _m	100	80	80	50	100
Temperature stability						
Temperature coefficient of ϵ_{33} (in the range -20°C up to +125°C)	TK ϵ_{33} (x10 ⁻⁵ /K)	6	4	6	5	2
Aging stability (relative change of the parameter per decade in %)						
Relative dielectric constant	C		-1.0	-2.0		
Coupling factor	C _K		-1.0	-2.0		

Further information:

The following values are valid approximations for all PZT materials from PI Ceramic.

Specific heat capacity	HC = approx. 350 J / kg K
Specific thermal conductivity	TC = approx. 1.1 W / m K
Poisson's ratio	σ = approx. 0.34
Coefficient of thermal expansion	α_{\parallel} = approx. -4 to -6 x 10 ⁻⁶ / K (in the polarization direction, shorted) α_{\perp} = approx. 4 to 8 x 10 ⁻⁶ / K \perp to the polarization direction, shorted)
Static compressive strength	larger than 600 Mpa

—16 contact: www.piceramic.com, info@piceramic.de

A 3 - Informações dos piezoelétricos PIC255 [36].

