



JOÃO FRANCISCO PEREIRA DE CARVALHO

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de sistema de inspeção não destrutiva para juntas brasadas a laser

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024



Desenvolvimento de sistema de inspeção não destrutiva para juntas brasadas a laser

João Francisco Pereira de Carvalho

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Miguel Machado
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Nuno Alberto Marques Mendes,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

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

Orientador: Miguel Araújo Machado,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Desenvolvimento de sistema de inspeção não destrutiva para juntas brasadas a laser

Copyright © João Francisco Pereira de Carvalho, 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.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A escrita e defesa desta dissertação marca o fim do meu percurso acadêmico no meu curso de sonho que alcancei com muito suor e lágrimas, mas sempre com um sorriso na cara. Sonho este que só foi possível alcançar devido a todo o apoio recebido ao longo destes inesquecíveis 5 anos, nesta que foi a minha segunda casa. Resta-me então agradecer a todos aqueles que estiveram lá para mim independentemente.

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Miguel Machado que mesmo quando o tema se mostrou mais desafiante do que o esperado, nunca cessou de me ajudar sempre que foi preciso e se disponibilizar para me guiar.

Aos Professores Doutores Valdemar Duarte e Bruno Soares por todo o apoio nos laboratórios.

Ao senhor Campos e ao senhor Paulo pela ajuda fornecida na parte prática, sempre que necessária.

Aos meus amigos Serra, Diogo e Carvalheira que partilham cerca de 10 anos de amizade comigo e que por muito que os rumos tomados tenham sido diferentes nunca deixaram de me apoiar e partilhar momentos inesquecíveis.

Ao melhor amigo que a faculdade me podia ter oferecido, João Figueiredo que não partilhou apenas apontamentos comigo, mas também cada festa, cada teste, cada trabalho e acima de tudo cada momento. Ao qual estou eternamente grato e a faculdade não teria sido a mesma sem o qual.

Aos meus padrinhos que me guiaram na faculdade e aos meus afilhados que confiaram em mim, e a muitos outros que partilharam esta jornada comigo, com especial agradecimento à Mariana Claro, cujos cadernos de apontamentos foram a minha salvação.

À minha melhor amiga e outra metade Carla, que foi a minha pedra durante estes 5 anos. Obrigado por me teres apoiado e ajudado nos bons e nos maus momentos, por me teres ajudado a estudar ainda que esta não seja a tua área de especialidade e por existires. A vida é melhor partilhada contigo.

À minha irmã que se disponibilizou, sempre que eu precisei, para me orientar no caminho certo mesmo quando mais ninguém me conseguia ajudar. Que é um ídolo para mim, que me fez visualizar um futuro que gostaria de alcançar e me fez acreditar que era possível.

E por fim aos meus pais que fizeram muito mais do que pagar este curso, mas que sempre me incentivaram a seguir os meus sonhos, a lutar pelos meus objetivos, nunca me deixaram perder-me no caminho e acima de tudo nunca deixaram que me faltasse nada. Obrigado, pai. Obrigado, mãe. Para mim este título também é vosso.

“Carpe Diem”

RESUMO

A Soldadura por Brasagem a Laser é uma tecnologia crucial na indústria automóvel, utilizada para unir chapas metálicas com elevada precisão e eficiência. No entanto, a deteção de defeitos nos cordões de soldadura, especialmente nas suas extremidades, representa um desafio significativo, uma vez que defeitos não detetados podem comprometer a integridade estrutural e a segurança dos veículos. Esta dissertação foca-se na aplicação de métodos de Ensaio Não Destrutivos para melhorar a deteção de defeitos em cordões de Soldadura por Brasagem a Laser, propondo soluções inovadoras para superar as limitações dos métodos tradicionais.

Para atingir este objetivo, foram exploradas duas abordagens principais: a monitorização de pressão e a utilização de Correntes Induzidas. A monitorização de pressão envolveu o desenvolvimento de um protótipo que permite a deteção de defeitos passantes ao longo dos cordões de soldadura e nas suas extremidades. Os ensaios realizados com este protótipo mostraram resultados promissores, conseguindo identificar com precisão a presença de defeitos passantes. Contudo, é importante notar que os testes foram realizados apenas para um exemplar, o que limita um pouco a sua viabilidade.

Foi ainda avaliada a eficácia de sondas de Correntes Induzidas na deteção de defeitos superficiais e em profundidade nos cordões de Soldadura por Brasagem a Laser através de uma tecnologia emergente denominada de indutores de montagem superficial. Vários ensaios foram conduzidos para validar o desempenho dessas sondas, fazendo-se variar as frequências e a sua posição, destacando-se uma das sondas pela sua capacidade de identificar defeitos com uma precisão razoável. Para a avaliação de extremidades de cordões de soldadura, foi testado um novo método de leitura pontual da impedância para que depois fosse adaptado para extremidades, no entanto, os resultados mostraram-se inconsistentes.

Em conclusão, esta dissertação contribuiu para a compreensão e desenvolvimento de métodos avançados de Ensaio Não Destrutivos para a inspeção de cordões de Soldadura por Brasagem a Laser. Apesar dos avanços alcançados, identificaram-se áreas que requerem melhorias, como a automatização do processo de monitorização de pressão e a otimização das sondas de Correntes Induzidas. A continuidade desta pesquisa poderá viabilizar a aplicação industrial dos métodos propostos, oferecendo uma solução mais robusta e eficiente para a deteção de defeitos em cordões deste tipo, crucial para a indústria automóvel.

Palavras-chave

Soldadura por Brasagem a Laser

Ensaio Não Destrutivos

Monitorização de Pressão

Correntes Induzidas

ABSTRACT

Laser Brazing Welding is a crucial technology in the automotive industry, used to join metal sheets with high precision and efficiency. However, the detection of defects in the weld beads, especially at their ends, presents a significant challenge, as undetected defects can compromise the structural integrity and safety of vehicles. This dissertation focuses on the application of Non-Destructive Testing methods to improve defect detection in Laser Brazing Welds, proposing innovative solutions to overcome the limitations of traditional methods.

To achieve this goal, two main approaches were explored: pressure monitoring and the use of Eddy Currents. Pressure monitoring involved the development of a prototype that enables the detection of passing defects along the weld beads and at their ends. The tests carried out with this prototype showed promising results, managing to accurately identify the presence of defects. However, it is important to note that the tests were only carried out on one sample, which limits their viability somewhat.

In addition, the effectiveness of Eddy Current probes in detecting surface and depth defects in Laser Brazing Welding beads was evaluated through an emerging technology called surface mounted inductors. Several tests were conducted to validate the performance of these probes, by varying the frequencies and their position, with one of the probes standing out for its ability to identify defects with reasonable precision. In order to evaluate the ends of weld beads, a new method of point impedance reading was tested and then adapted for ends, but the results were inconsistent.

In conclusion, this dissertation has contributed to the understanding and development of advanced Non-Destructive Testing methods for the inspection of Laser Brazing Weld beads. Despite the progress made, areas requiring improvement were identified, such as the automation of the pressure monitoring process and the optimization of Eddy Current probes. Continuing this research could enable the industrial application of the proposed methods, offering a more robust and efficient solution for defect detection in this type of weld, which is crucial for the automotive industry.

Keywords:

Laser Braze Welding

Non Destructive Testing

Pressure Monitoring

Eddy Currents

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	ix
RESUMO.....	xiii
Palavras-chave.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
Keywords:.....	xv
ÍNDICE.....	xvii
LISTA DE FIGURAS.....	xxi
LISTA DE TABELAS.....	xxiii
NOMENCLATURA.....	xxv
Nomenclatura Romana.....	xxv
Nomenclatura Grega.....	xxv
SIGLAS.....	xxvii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia.....	2
1.4 Estrutura da Tese.....	2
2 Estado da Arte.....	4
2.1 Soldadura por Brasagem a Laser.....	4
2.1.1 Modo de funcionamento.....	4
2.1.2 Aplicações na indústria Automóvel.....	5
2.1.3 Defeitos Característicos.....	6
2.2 Ensaio Não Destrutivo.....	7
2.3 Monitorização de Pressão.....	8
2.3.1 <i>Micro-Electromechanical Systems (MEMS)</i>	10
2.3.2 Aplicações Industriais.....	10
2.3.3 Testes Hidrostáticos e Pneumáticos.....	10
2.4 Correntes Induzidas.....	12
2.4.1 Plano de Impedâncias.....	12
2.4.2 Detecção de defeitos.....	13
2.4.3 <i>Lift-off</i>	14
2.4.4 Efeito de bordo.....	14
2.4.5 Profundidade de Penetração.....	15
2.4.6 Classificação de sondas.....	16
2.4.7 Inspeção de SBL por CI.....	17
2.4.8 <i>Surface-Mount Inductors</i>	19
2.5 Síntese do Capítulo.....	19

3 Métodos e Materiais.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Propriedades a considerar da superfície a inspecionar.....	21
3.3 Desenvolvimento e produção do componente de inspeção de pressão.....	22
3.3.1 Requisitos.....	22
3.3.2 Método de pressurização.....	23
3.3.3 Escolha e montagem do sensor de pressão.....	24
3.3.4 Conceção e Modelação do componente de acoplamento.....	26
3.3.5 Escolha de material e equipamento de produção.....	31
3.4 Desenvolvimento e Produção de Sondas de Correntes Induzidas.....	32
3.4.1 Escolha de bobinas de CI.....	32
3.4.2 Conceção do <i>Chassis</i> para as bobinas e Montagem.....	33
3.4.3 Controlo do <i>lift-off</i>	34
3.5 Síntese do Capítulo.....	34
4 Ensaio e Resultados Experimentais.....	37
4.1 Introdução.....	37
4.2 Validação Experimental da Monitorização de Pressão.....	37
4.2.1 Ensaio de Monitorização de Pressão ao longo do cordão.....	38
4.2.2 Ensaio de Monitorização de Pressão na extremidade do cordão.....	42
4.2.3 Uso do Braço robótico para Monitorização de Pressão ao longo do Cordão.....	44
4.2.4 Uso do Braço robótico para Monitorização de Pressão na Extremidade do Cordão.....	46
4.3 Validação Experimental das Sondas de CI.....	46
4.3.1 Inspeção de um cordão de SBL com as sondas produzidas.....	47
4.3.2 Testagem de um novo método de inspeção a partir da leitura pontual da impedância.....	53
4.4 Discussão de Resultados.....	54
4.4.1 Medição da Pressão.....	55
4.4.2 Correntes Induzidas.....	55
4.5 Síntese do Capítulo.....	56
5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	58
5.1 Conclusões.....	58
5.2 Desenvolvimentos Futuros.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	61
Apêndices.....	65
Apêndice 1. Código Arduíno (C).....	65
Apêndice 2. Código de <i>Python</i> para o teste da Monitorização de Pressão.....	66
Apêndice 3. Gráficos de resultados dos testes das Correntes Induzidas no cordão de SBL com sondas produzidas com SMD.....	68
Anexos.....	71
Anexo 1. Ficha Técnica do Sensor de Pressão.....	71
Anexo 2. Características de operação do sensor MPX5010GP.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Montagem de Soldadura por Brasagem a Laser, adaptado de [6]	5
Figura 2.2 - SBL aplicado à indústria automóvel [9]	5
Figura 2.3 - Defeitos típicos de um cordão de SBL, adaptado de [8]	6
Figura 2.4 - Defeitos encontrados na SBL por Wang et al., adaptado de [2]	6
Figura 2.5 - Cantos do cordão se soldadura a) Início do cordão, b) Fim do cordão.....	7
Figura 2.6 - Sensores de Pressão, adaptado de [16]	8
Figura 2.7 - Sensores de Pressão, adaptado de [19,21]	9
Figura 2.8 - Pressurização de um componente de teste, adaptado de [30]	11
Figura 2.9 - Indução eletromagnética, adaptado de [33]	12
Figura 2.10 - Plano da impedância elétrica, adaptado de [34].....	13
Figura 2.11 - Perturbação no campo elétrico por descontinuidade, adaptado de [37].....	13
Figura 2.12 - Representação do Efeito de bordo [36]	14
Figura 2.13 - Plano de Impedâncias, adaptado de [34].....	15
Figura 2.14 - Profundidade de Penetração das Correntes Induzidas, adaptado de [34].....	15
Figura 2.15 - Configuração da Sonda de CI, adaptado de [1]	17
Figura 2.16 - Sonda após produção, adaptado de [1] a) Sonda de inspeção e de referência, b) Montagem final ...	17
Figura 2.17 - Resultados do ensaio por uma Sonda de CI [1]	18
Figura 2.18 - Configurações dos dois tipos de ensaio, adaptado de [43]	18
Figura 3.1 - Cordão de Soldadura por Brasagem a Laser, adaptado de [49]	22
Figura 3.2 - Método de pressurização através de um balão	24
Figura 3.3 - Ilustração da saliência criada no componente.....	24
Figura 3.4 - Sensor de Pressão MPX5010GP.....	25
Figura 3.5 - Montagem do Sensor de Pressão	25
Figura 3.6 - Modelação 3D da Superfície do Cordão.....	26
Figura 3.7 - Modelo da relação entre o componente fabricado e o componente de teste	27
Figura 3.8 - Secção transversal do 1º protótipo do componente acoplante	27
Figura 3.9 - Esquema ilustrativo da chapa com defeitos	28
Figura 3.10 - Zona de contacto entre o componente fabricado e componente de teste	28
Figura 3.11 - Resultados experimentais do funcionamento do componente de acoplamento - 1ºProtótipo	29
Figura 3.12 - Secção transversal do 2º protótipo do componente acoplante	30
Figura 3.13 - Resultados experimentais do funcionamento do componente de acoplamento - 2ºProtótipo	30
Figura 3.14 - Comparação dos resultados dos defeitos A e B para os dois protótipos.....	31
Figura 3.15 - <i>Surface-Mount Inductor</i>	32
Figura 3.16 - Montagem do <i>Chassis</i>	33
Figura 3.17 - Montagem das Sondas de 1 a 6 a) vista frontal, b) vista traseira	34
Figura 3.18 - Sistema de Controlo de <i>Lift-off</i>	34
Figura 4.1 - Montagem Experimental da Monitorização de Pressão	38
Figura 4.2 - Representação do funil de cola à saída do componente fabricado.....	38
Figura 4.3 - Defeitos artificiais no cordão TRAS LH.....	39
Figura 4.4 - Resultados experimentais da pressão	40
Figura 4.5 - Resultados experimentais da pressão na presença de defeito	41
Figura 4.6 - Comparação dos resultados da variação de pressão no cordão com e sem defeito.....	42
Figura 4.7 - Defeito artificial passante na extremidade do cordão LH TRAS.....	43
Figura 4.8 - Resultados experimentais da pressão em função do tempo, na extremidade do cordão	43
Figura 4.9 - Montagem Experimental para testar a automatização do processo de Monitorização de Pressão.....	44
Figura 4.10 - Montagem do componente acoplante fabricado ao robô	45
Figura 4.11 - Resultados experimentais da pressão com o braço robótico.....	45
Figura 4.12 - Gráfico de comparação de ensaios realizados com e sem o braço robótico.....	46
Figura 4.13 - Montagem experimental para testagem de sondas de Correntes Induzidas	47
Figura 4.14 - Defeitos artificiais no componente de teste 3LH do 1 ao 4	47
Figura 4.15 - Defeitos artificiais no componente de teste 3LH do 5 ao 8	48

Figura 4.16 - Defeito artificial extra no componente de teste 3LH 9	48
Figura 4.17 – Posicionamento da bobina sob o cordão de soldadura durante o ensaio	49
Figura 4.18 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz	49
Figura 4.19 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz	50
Figura 4.20 - Resultado experimental da sonda 2 a 100 kHz	50
Figura 4.21 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz com material padrão de referência.....	51
Figura 4.22 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz com material padrão de referência.....	51
Figura 4.23 - Posicionamento da bobina sob o cordão de soldadura durante o ensaio	52
Figura 4.24 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz numa nova posição	52
Figura 4.25 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz numa nova posição	53
Figura 4.26 – Resultados experimentais, para duas zonas sem defeito	54
Figura 4.27 - Resultados experimentais para uma zona sem defeito e uma zona com defeito	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da superfície de um cordão de SBL	22
Tabela 2 - Requisitos funcionais do componente de acoplamento	23
Tabela 3 – Parâmetros de impressão 3D por resina	32
Tabela 4 – Bobinas de Montagem Superficial avaliadas	33

NOMENCLATURA

Nomenclatura Romana

A	Área
C	Capacitância
d	Distância
f	Frequência de excitação
H _p	Campo Magnético Primário
H _s	Campo Magnético Secundário
R	Resistência Elétrica [Ω]
X	Reatância elétrica induzida [Ω]
Z	Impedância Elétrica [Ω]

Nomenclatura Grega

ε	Constante Dielétrica
θ	Ângulo de Fase
μ	Permeabilidade Magnética
σ_c	Condutividade Magnética

SIGLAS

CI	Correntes Induzidas
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
ED	Ensaio Destrutivos
END	Ensaio Não Destrutivos
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
PLA	Poliácido Láctico
SBL	Soldadura por Brasagem a Laser
SL	Soldadura a Laser
SMD	<i>Surface-Mount Inductors</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa

1 Introdução

1.1 Motivação

A Soldadura por Brasagem a Laser (SBL) é uma tecnologia emergente e atualmente um processo fundamental na indústria automóvel. Esta é utilizada para efetuar a ligação entre chapas metálicas através da adição de material fundido que promove uma ligação às chapas por brasagem. Algumas características vantajosas quando comparada a outros processos (como a rapidez, automatização do processo, impermeabilidade, etc.), tornam imperativo o seu uso [1]. No entanto, na indústria automóvel existe uma tolerância zero para defeitos uma vez que isto pode comprometer a integridade da estrutura, colocar pessoas em risco ou comprometer a impermeabilidade. Desta forma, torna-se crucial o uso de ensaios e testes que se certifiquem que este processo seja feito com a maior das precisões [2].

Uma resposta possível é o uso de Ensaios Não Destrutivos (END) que permitam avaliar a integridade e qualidade do cordão de soldadura, contornando a ineficiência e desperdícios dos Ensaios Destrutivos (ED). A possibilidade de utilização dos END expande-se ao facto de se poder utilizar não só após o processo de soldadura como também durante, abrindo o estudo a diversas possibilidades.

Apesar de já existirem algumas técnicas que utilizam END para tentar avaliar o cordão de SBL, a deteção de defeitos ainda apresenta um grande desafio no que toca às extremidades do cordão. Os defeitos nesta zona podem comprometer de igual forma a estrutura, no entanto, devido à complexidade da sua geometria muitas vezes passam despercebidos.

1.2 Objetivos

Partindo do exposto em §1.1, o objetivo principal desta dissertação, passa por resolver o problema da detecção de defeitos nas extremidades do cordão de soldadura. Para isso, propõe-se o uso de dois tipos de ensaios não destrutivos.

Primeiramente pretende-se utilizar o processo de monitorização de pressão para a detecção de defeitos passantes. Para isso é necessária a conceptualização e posterior produção de um protótipo que permita acoplar o espaço a ser analisado e crie pressão. Posteriormente pretende-se incorporar um sensor que permita ler esses valores de pressão para que se possa monitorizar a existência de defeitos passantes.

Uma vez que o método referido anteriormente apenas fornece informação sobre a existência de defeitos passantes, propõe-se ainda realizar um estudo sobre a possibilidade de utilização de Correntes Induzidas (CI) através da leitura absoluta da impedância em detrimento do modo convencional (leitura da variação de impedância).

1.3 Metodologia

A metodologia adotada nesta dissertação envolve uma abordagem experimental, centrada no desenvolvimento e validação de técnicas de END aplicáveis à detecção de defeitos em soldadura por SBL. O processo inicia-se com a análise detalhada das propriedades das superfícies a inspecionar, garantindo que as características geométricas e materiais sejam adequadamente compreendidas e consideradas no desenvolvimento dos métodos de ensaio.

O primeiro passo metodológico inclui a conceptualização e produção de um componente de inspeção de pressão, capaz de detetar defeitos passantes. Este componente é desenhado para criar e manter pressão no local de análise, sendo complementado por um sensor que monitoriza as variações de pressão e, assim, deteta a presença de possíveis falhas. Para garantir a eficiência deste método, são realizados ensaios experimentais que avaliam a sua eficácia em diferentes condições operacionais.

Paralelamente, é estudada a aplicação das CI, focando-se na leitura absoluta da impedância para superar as limitações das abordagens convencionais no que toca à extremidade do cordão. Esta etapa envolve o desenvolvimento e produção de sondas específicas para a aplicação de CI, incluindo a escolha de bobinas adequadas e o controlo do efeito *lift-off*, que é crucial para a precisão dos resultados.

Os métodos propostos são validados através de ensaios experimentais rigorosos, conduzidos em condições controladas. As etapas de validação incluem a análise dos dados obtidos, comparando-os com padrões de referência para determinar a eficácia dos métodos desenvolvidos.

1.4 Estrutura da Tese

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução: Fornece uma visão geral do tema de estudo, apresentando o estado da arte, a motivação para a dissertação, os objetivos principais, a metodologia adotada e a estrutura da tese.

Capítulo 2 - Estado de Arte: Explora detalhadamente a soldadura por brasagem a laser, com foco nos seus modos de funcionamento, aplicações na indústria automóvel e defeitos característicos. Além disso, aborda os ensaios não destrutivos, com especial atenção às técnicas

de monitorização de pressão e correntes induzidas, destacando as suas aplicações industriais e desafios técnicos.

Capítulo 3 - Métodos e Materiais: Descreve os procedimentos experimentais e os materiais utilizados no desenvolvimento dos métodos de inspeção propostos. Inclui a conceção e produção do componente de inspeção de pressão, assim como o desenvolvimento das sondas de correntes induzidas.

Capítulo 4 - Ensaaios e Resultados Experimentais: Apresenta os resultados obtidos durante a validação experimental dos métodos de monitorização de pressão e correntes induzidas. Analisa-se a eficácia das técnicas desenvolvidas na deteção de defeitos em SBL, ao longo do cordão e respetiva extremidade, discutindo-se as limitações e potenciais melhorias.

Capítulo 5 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros: Sintetiza as principais conclusões da dissertação, propondo direções para trabalhos futuros, visando a otimização das técnicas de END exploradas nesta dissertação.

2 Estado da Arte

2.1 Soldadura por Brasagem a Laser

A soldadura é atualmente uma das tecnologias de junção de materiais mais relevante nas indústrias. Mais concretamente, a Soldadura a Laser (SL), por ser caracterizada pelas suas zonas termicamente afetada e fundida de pequenas dimensões. Por esse motivo, é bastante utilizada na junção de ligas metálicas tendo evoluído para outras variantes como a SBL [3].

A SL e a SBL diferem pelo facto de, na SBL, o material de adição ser aquecido a temperaturas suficientes para ocorrer fusão e facilitar o seu preenchimento nos espaços vazios enquanto a sua ligação ao material base é feita por brasagem. Já na soldadura a laser convencional, as temperaturas são suficientes para fundir o material base podendo ser ou não utilizado um material de adição [4]. Adicionalmente, na SBL, caso esta seja usada para juntar dois materiais com pontos de fusão bastante diferentes, o material base com menor ponto de fusão poderá também fundir obtendo-se um material base brasado ao cordão e outro fundido [5].

Esta técnica avançada de junção de materiais (SBL) permitiu um grande avanço tecnológico nomeadamente no que diz respeito à junção de materiais com propriedades diferentes. Adicionalmente esta tem algumas vantagens sobre outros processos tradicionais de soldadura como, por exemplo, permitir uma grande velocidade de produção com custos inferiores, zonas termicamente afetadas com dimensões reduzidas, ser automatizável e ter um excelente controlo e precisão devido à grande densidade de energia localizada [6].

2.1.1 Modo de funcionamento

Em geral, como explicado em §2.1, o modo de funcionamento da SBL passa pela fusão de um material através de um laser, que é usado como material de adição, que penetra nas cavidades

por capilaridade permitindo preencher os espaços vazios existentes entre dois materiais bases como apresentado na Figura 2.1 [7].

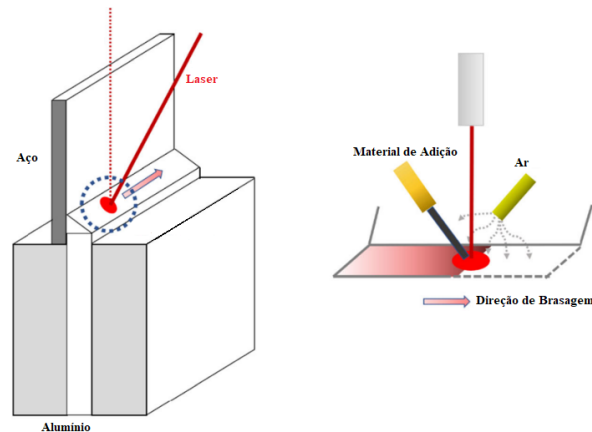


Figura 2.1 - Montagem de Soldadura por Brasagem a Laser, adaptado de [6]

2.1.2 Aplicações na indústria Automóvel

No fim da década de 90, SBL começou a ser utilizada no setor industrial para a junção de diversas partes de veículos. As primeiras aplicações deste processo deram-se no ano de 1998, no entanto, as suas características apelativas e contínua evolução levaram a um aumento da sua importância [7].

Atualmente, a SBL tem sido bastante reconhecida pela indústria automóvel como um dos processos mais apropriados para a junção de chapas metálicas. Isto acontece porque, quando comparado a outras técnicas, esta permite estanquicidade da junta e uma grande qualidade superficial mantendo também um bom *design*, que é uma característica desejável atendendo a que muitas vezes os cordões de soldadura estão num local visível do automóvel. Um exemplo pode ser encontrado na Figura 2.2, onde foi efetuada a ligação entre o topo do carro e a parte lateral. Uma outra grande vantagem deste processo e que também é valorizado neste tipo de indústria é o facto de cordões de SBL serem dúcteis e permeáveis a temperaturas baixas [7,8].



Figura 2.2 - SBL aplicado à indústria automóvel [9]

Atualmente, o material mais frequentemente utilizado na indústria como material de adição é o bronze silicatado (CuSi_3) [7].

2.1.3 Defeitos Característicos

De forma a criar sistemas de controlo e deteção de defeitos primeiro é necessário conhecer que tipo de defeitos podem surgir no cordão de soldadura durante o processo. Por esse motivo, Ungers et al, conduziram um conjunto de ensaios com o objetivo de categorizar os tipos de defeitos que podem surgir e perceber o seu modo de formação. Atendendo a que os ensaios foram realizados para aço revestido por zinco e cobre como material de adição, estes foram os resultados [8]:

- Ocorrência esporádica de poros de diversos tamanhos e quantidades;
- Interrupção do cordão por descontinuidades, cavidades ou falta de material no rebordo do cordão;
- Irregularidades superficiais.

Estes defeitos estão ainda apresentados na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Defeitos típicos de um cordão de SBL, adaptado de [8]

Um segundo estudo foi tido em conta de forma a confirmar estes resultados. Wang et al., também avaliaram que tipos de defeitos podem surgir num cordão soldado por SBL. Estes obtiveram cavidades, poros, excessos pontuais de material (*humps*), descontinuidades por fundição do material e falta de material como se pode observar pela Figura 2.4 [2].

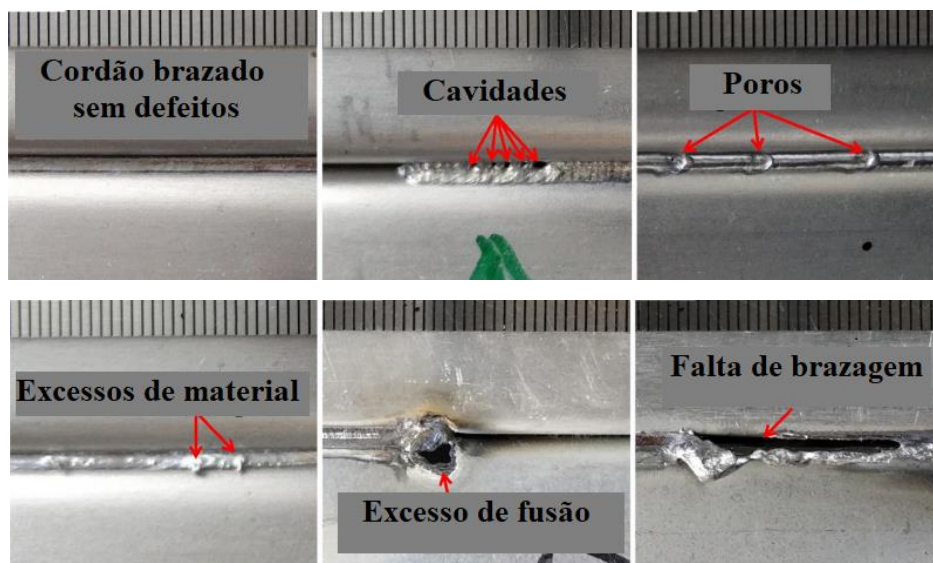


Figura 2.4 - Defeitos encontrados na SBL por Wang et al., adaptado de [2]

Estes defeitos são bastante semelhantes aos apresentados por Ungers et al., o que leva a concluir que são os defeitos mais frequentes nesta tecnologia. É preciso, no entanto, ter especialmente em conta a extremidade inicial e final do cordão de soldadura por SBL. Apesar de não ser comum mencionar, estas zonas podem conter defeitos adicionais. É possível verificar na Figura 2.5 que esta é uma zona de inconsistência em relação ao resto do cordão na medida em que pode haver falta de ligação entre o cordão e o material base. Este fenómeno pode estar associado ao facto de ser uma zona de mudança de direção ou então à carência ou excesso de deposição de material.

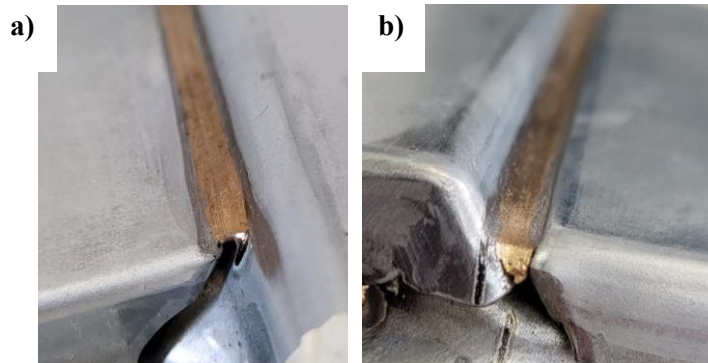


Figura 2.5 - Cantos do cordão se soldadura
a) Início do cordão, b) Fim do cordão

2.2 Ensaios Não Destrutivos

Quando se considera o uso de SBL na indústria automóvel uma das várias vantagens que torna o seu uso crucial, é o facto de esta permitir uma conexão necessária entre as duas partes a juntar de forma a obter a permeabilidade necessária sem ter de se recorrer a outras técnicas (como plástico fundido) para obter este resultado. Isto porque na indústria automóvel existe uma tolerância zero no que toca ao comprometimento da integridade ou do isolamento entre os dois materiais. Desta forma, torna-se crucial o uso de ensaios e testes que se certifiquem que este processo seja feito com a maior das precisões [2].

Os END consistem na aplicação de um conjunto de métodos de avaliação e deteção de defeitos à superfície ou no interior de um componente bem como as suas características, sem que ocorra destruição do mesmo, alteração das propriedades do material e sem comprometer o seu desempenho [10].

Até ao momento alguns métodos END de inspeção de cordões de SBL foram encontrados. Cheng et al. [11], utilizaram sensores infravermelhos para monitorizar defeitos, onde a radiação térmica é transformada num sinal elétrico por um sensor fotoelétrico. Este método apenas foi testado para quatro tipos de defeitos, não sendo necessariamente aplicável a defeitos abaixo da superfície. Apesar disso, mostrou resultados razoáveis para defeitos à superfície. Wang et al. [2], desenvolveram uma tecnologia baseada na combinação de duas outras já existentes e também já testadas. Por um lado, utilizaram triangulação laser (*laser triangulation*) de forma a localizar defeitos, ao contrário do seu uso original que é conhecer as características da superfície brasa (dimensões e geometria) [12]. Por outro lado, o uso de inspeção baseada em imagens, que por si só é um processo lento e que depende da inspeção visual, vai ser aplicado apenas quando já existe conhecimento da localização dos defeitos. Este método impede também a possibilidade de detetar defeitos em profundidade (apenas à superfície) e adicionalmente é mais dispendioso. Por fim, Hua et al. [13], propuseram uma solução baseada em *laser scanning*. Este processo consiste no uso de um algoritmo de forma a criar o modelo do cordão ideal que será posteriormente comparado sempre que se pretenda detetar defeitos num cordão novo. Uma das vantagens deste

processo é que não é necessário saber previamente quais são os defeitos característicos de SBL, contudo, isto leva a que seja difícil perceber que tipo de defeito está presente.

Apesar das soluções apresentadas, estas são soluções demoradas, pouco eficientes ou limitadas. Nesta dissertação pretende-se explorar dois novos métodos de detetar defeitos no cordão de soldadura por SBL dando especial atenção à zona inicial e final do cordão, nomeadamente na área das Correntes Induzidas (CI) e na área da monitorização de pressão.

2.3 Monitorização de Pressão

O uso de sensores para averiguar variações de pressão com diferentes aplicabilidades não é uma novidade. Esta tecnologia tem vindo gradualmente a crescer em diversas indústrias por permitir uma grande variedade de aplicações. De forma a se conhecer as aplicações que já existem na indústria primeiro é necessário perceber um pouco do funcionamento destes sensores já existentes [14].

Um sensor de pressão normalmente funciona como um transdutor e converte uma força física num sinal elétrico para que possa ser lido. Esse mecanismo de transformação pode ser por diversos modos, no entanto, os mais comuns são baseados num conceito que é a movimentação de um elemento mecânico [15]. Estes convertem pressão pelo movimento de um ou mais diafragmas (Figura 2.6 a), b), c) e d)), extensão de um fole (Figura 2.6 e)) ou medição da deflexão de tubos de Bourdon ou tubos de parede direita (Figura 2.6 f) e g), respetivamente) [16].

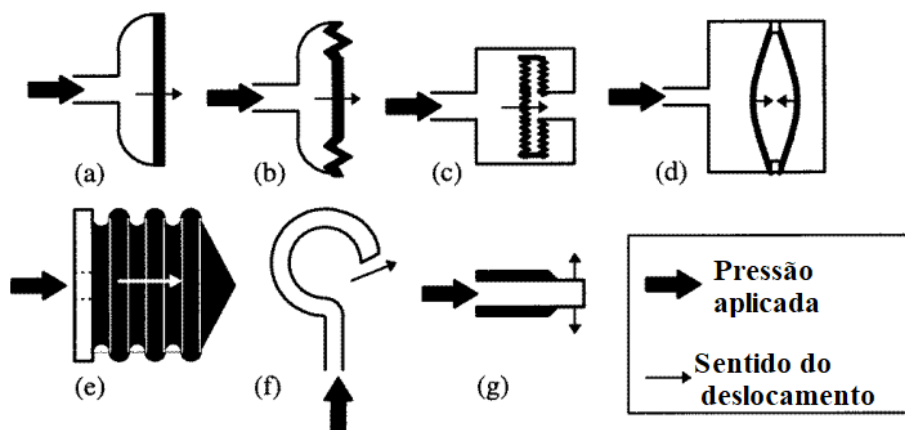


Figura 2.6 - Sensores de Pressão, adaptado de [16]

- a) Diafragma simples, b) Diafragma complexo, c) Cápsula, d) Sensor capacitivo, e) Fole, f) Tubo de Bourdon, g) Tubo de parede direita

Existem muitos modos de conversão de pressão em energia elétrica baseados na tecnologia de movimentação mecânica de um componente, no entanto, os mais utilizados na indústria são o piezoresistivo, o capacitivo e o piezoelétrico. Contudo, existem outros que também utilizam este sistema como os de fibra ótica, potenciométrico e de ressonância [17].

- **Piezoresistivo** (Figura 2.7 a)) - Em 1964, Smith descobriu o fenómeno da piezoresistividade do silício, no qual a resistência elétrica do material varia em resposta a um esforço mecânico. Quando um esforço de compressão ou tração é realizado neste material, cria-se uma deformação na distribuição da estrutura cristalina fazendo variar a resistência elétrica [18]. Um exemplo de um sensor baseado neste modo de operação está representado pela figura. Neste existe uma camada fina de silício que contém resistores. Quando uma pressão é aplicada causa

uma distorção aos resistores desencadeando um efeito piezoresistivo. Consequentemente desencadeia uma diferença de potencial que é utilizada para enviar o sinal elétrico [19].

- **Capacitivo** (Figura 2.7 b)) - Um outro tipo de sensor de pressão com crescente aplicação é o sensor capacitivo. Este é normalmente constituído por um condensador de placas paralelas, separado por uma camada dielétrica isolante colocada entre dois elétrodos condutores. O funcionamento dos sensores capacitivos baseia-se no facto da capacitância variar por influência de um estímulo externo [14,20]. A capacitância pode ser calculada pela equação 2.1, onde C [F] é a capacitância, ϵ é a constante dielétrica, A [m²] é a área e d [m] é a distância entre dois elétrodos. Assim, ao aplicar uma força externa, ocorre a deformação por compressão ao nível da camada dielétrica que fará diminuir a distância (d) e aumentar a capacitância (C) como se pode observar pela figura. Isto resulta numa alteração da capacitância que realiza um estímulo de corrente alternada permitindo medir a pressão [21].

$$C = \frac{A \cdot \epsilon}{d} \quad (2.1)$$

- **Piezoelectrico** (Figura 2.7 c)) - O mecanismo de transdução dos materiais piezoelectricos pode ser descrito da seguinte forma: quando o material piezoelectrico é deformado por aplicação de uma pressão externa, ocorre uma separação de cargas positivas e negativas que se reorganizam nas superfícies do material em direções opostas, originando uma diferença de potencial no seu interior. Esta diferença de potencial é então utilizada para determinar as forças externas [14].

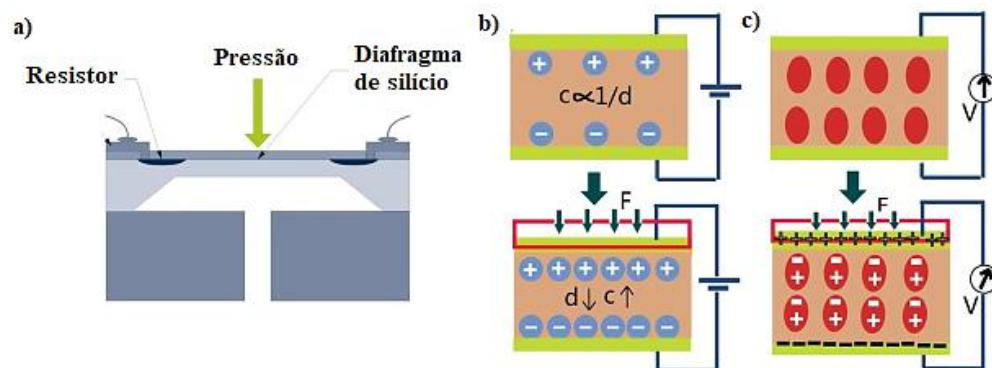


Figura 2.7 - Sensores de Pressão, adaptado de [19,21]
a) Sensor piezoresistivo, b) Sensor Capacitivo, c) Sensor piezoelectrico

Outros:

- **Fibra Ótica** - Este tipo de sensor é maioritariamente utilizado em medicina uma vez que é a intensidade luminosa que realiza pressão. A luz é emitida por um tubo de fibra ótica que está conectado a um diafragma que flete com a dita pressão [17].
- **Potenciométrico** - Os sensores potenciométricos baseiam-se na alteração de resistência de um potenciometro que se encontra ligado mecanicamente a um elemento sensor como um tubo de Bourdon, um fole ou um diafragma. A deflexão deste elemento sensível à pressão determina a movimentação e posição do cursor no potenciometro, levando a uma alteração do valor da resistência equivalente à pressão aplicada no elemento sensor.

- **Ressonância** – Um componente que vibra na sua frequência de ressonância e está ligado a um diafragma de silício. Quando é aplicada uma força esta frequência varia e é esta variação que é detetada [22].

2.3.1 *Micro-Electromechanical Systems (MEMS)*

Durantes as últimas décadas, a ascensão da tecnologia MEMS destacou-se no que toca a sensores. Os desenvolvimentos nesta tecnologia fizeram com que houvesse a possibilidade de criar uma versão com dimensões muito reduzidas de sensores que já existiam e ainda apresentando resultados superiores às suas versões iniciais [22].

A importância de mencionar a existência desta tecnologia deve-se às suas características vantajosas em relação aos sensores existentes até ao momento (como o volume ocupado, densidade e pouca energia despendida) e à quantidade de aplicações em indústria que já tem, sendo que grande parte dos sensores utilizados atualmente dependem desta tecnologia [14].

2.3.2 **Aplicações Industriais**

Uma das maiores aplicações da monitorização de pressão é na indústria da medicina, onde existe atualmente uma grande variedade de sensores de pressão com destaque no sensor de pressão flexível. Isto porque, estes sensores para além de demonstrarem uma flexibilidade fora do comum, têm um custo reduzido e a capacidade de cobrir uma vasta área como a pele. Devido a estas características vantajosas começaram a ser aplicados essencialmente para monitorizar os sinais vitais dos seres humanos [15]. Uma outra solução proposta foi o sensor de pressão por fibra-ótica para deteção de pressão intraocular [23].

Na indústria aeronáutica existe o conceito de força de levantamento que é o que permite a um avião manter-se a uma altitude constante. Isto acontece porque existe uma diferença de pressão entre a zona superior e inferior das asas dos aviões. No entanto, caso haja algum problema, como por exemplo, o ar aderir à superfície da asa devido à viscosidade, pode causar problemas na força de levantamento, o que tem um grande impacto na *performance* e na segurança do avião. Para este efeito são utilizados sensores de pressão distribuídos ao longo das asas. Para testar esta teoria sensores capacitivos foram utilizados.

Para aplicações marinhas também foram desenvolvidos sensores de pressão piezoresistivos capazes de suportar temperaturas e pressões bastante elevadas como as do fundo do oceano (sensores de grafeno por laser induzido). Estes sensores são necessários para problemas como encontrar espécies em vias de extinção ou prever movimento das ondas para segurança [25].

Apesar das diversas aplicações já existentes, nenhuma é diretamente aplicável a cordões de soldadura. Inclusive, a tecnologia de pressão existente mais próxima do uso em soldadura é na indústria automóvel para soldaduras onde a pressão certa na fixação é um parâmetro importante (como por exemplo soldadura por fricção linear ou por resistência). No entanto, este não é de todo o propósito que se pretende explorar [26].

Existem, contudo, técnicas de deteção de defeitos que podem ser adaptadas e que atualmente são utilizadas essencialmente para a testagem de fugas em componentes. Os dois modos essenciais desta metodologia são os testes hidrostáticos e pneumáticos [27].

2.3.3 **Testes Hidrostáticos e Pneumáticos**

O teste hidrostático é provavelmente o mais frequentemente utilizado. Este é um teste onde o componente é pressurizado com água para avaliar a sua integridade. Durante o teste o componente é cheio com água de forma a aumentar a pressão, permanecendo nesse estado uma

duração de tempo limitada. É imperativo que no fim do teste toda a água seja removida para que não haja corrosão [28].

O teste pneumático é bastante semelhante ao hidrostático. Este também utiliza um fluido de modo a pressurizar um componente. A diferença permanece no fluido utilizado que convencionalmente é ar ou nitrogénio [29].

A utilização mais frequente de testagem de fugas por pressão hidrostática em detrimento da pneumática deve-se ao facto de a água ser um fluido muito mais seguro que o ar por este ser praticamente incompressível. Isto leva a que o trabalho necessário para pressurização a ar seja muito maior. Para além disso, este é bastante perigoso podendo haver uma explosão em caso de fuga [27].

Um estudo recente demonstrou a deteção de defeitos relacionados com a fadiga numa estrutura consistindo em algo semelhante ao teste pneumático onde é realizada a pressurização positiva ou negativa do componente e conseqüente monitorização da variação da pressão a partir de um sensor. De forma a melhor entender o conceito, foi ilustrado o modo de funcionamento (Figura 2.8), onde um componente de teste se encontra pronto a ser fletido por quatro rolos. Este componente encontra-se pressurizado negativamente e em equilíbrio. Após ser fletido a fissura é exposta à pressão atmosférica e conseqüentemente a pressão dentro do tubo é equilibrada [30].

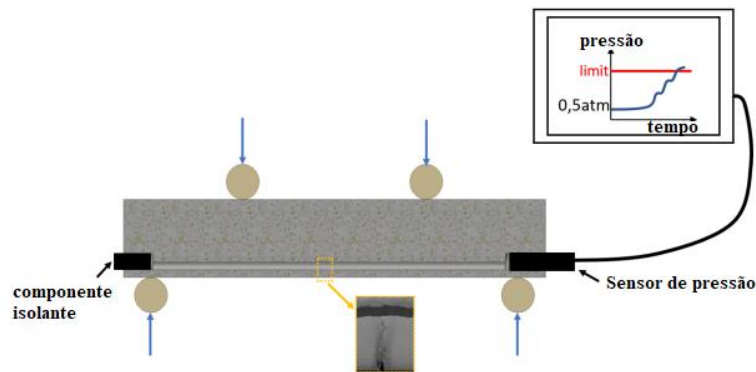


Figura 2.8 - Pressurização de um componente de teste, adaptado de [30]

Até ao momento ainda não existem aplicações de deteção de defeitos por monitorização de pressão em SBL. No entanto, este estudo [30] tem a particular característica de o método usado ser facilmente adaptado. Apesar de a superfície do cordão não ser um componente fechado, pode-se utilizar a superfície deste como o isolante.

2.4 Correntes Induzidas

Michael Faraday, pioneiro na descoberta da indução eletromagnética em 1831, revolucionou o mundo da física ao se aperceber da existência de interações entre campos magnéticos variáveis e correntes induzidas. O mesmo descobriu que uma mudança num campo magnético num material condutor elétrico, gera uma força eletromotriz nesse mesmo condutor induzindo corrente. Para além disso, estabeleceu uma relação entre a taxa de variação do fluxo magnético e a diferença de potencial gerada [31].

O uso de CI como um método de END explora o fenómeno da indução eletromagnética para a deteção de defeitos em componentes condutores, ferromagnéticos ou não ferromagnéticos. No seu modo convencional é utilizada uma sonda que contém uma bobina que por sua vez é excitada com uma corrente alternada criando um campo magnético primário (H_p). Se estivermos na presença de um material condutor elétrico, uma corrente elétrica será induzida no corpo como previsto pela lei de *Faraday*. Isto implica por sua vez a aparição de um campo magnético secundário (H_s) que irá interagir com o primeiro fazendo variar a impedância na bobina. Este fenómeno pode melhor ser visualizado na Figura 2.9 [32].

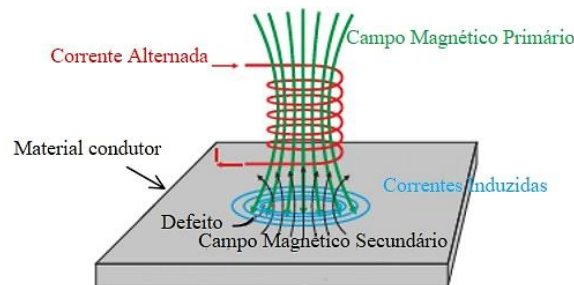


Figura 2.9 – Indução eletromagnética, adaptado de [33]

2.4.1 Plano de Impedâncias

A impedância elétrica (Z), medida nos terminais de uma bobina (em Ω), é a oposição total que um circuito apresenta à corrente alternada [34]. Inicialmente, todas as bobinas são caracterizadas pela sua impedância calculada pela equação 2.2, onde R [Ω] é a resistência, parte real, e X [Ω] é a reatância, parte imaginária, como ilustrado na Figura 2.10 [33].

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (2.2)$$

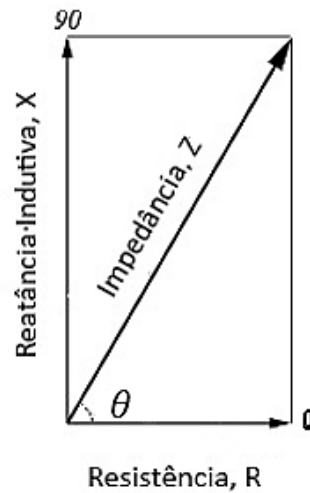


Figura 2.10 – Plano da impedância elétrica, adaptado de [34]

No entanto, quando utilizamos este END e se gera a corrente induzida, esta impedância irá variar, como descrito em §2.4, passando a ser dada pela equação 2.3. Pode-se ainda calcular o ângulo de fase, θ [rad], a partir da equação 2.4 [33].

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.3)$$

$$\text{tg}(\theta) = \frac{X_L}{R} \quad (2.4)$$

Conclui-se que a variação da impedância no plano de impedâncias fornece informação importante acerca da existência de discontinuidades no material, tornando-se um fator crucial à detecção de defeitos por CI [35].

2.4.2 Detecção de defeitos

Quando é induzida uma corrente elétrica no componente a ser inspecionado, esta corrente tende sempre a ir pela zona de menor resistência. Assim, na existência de uma discontinuidade, a corrente é perturbada e tende a contorná-lo como se pode observar na Figura 2.11. Isto provoca uma variação no campo magnético e por sua vez na impedância [36].

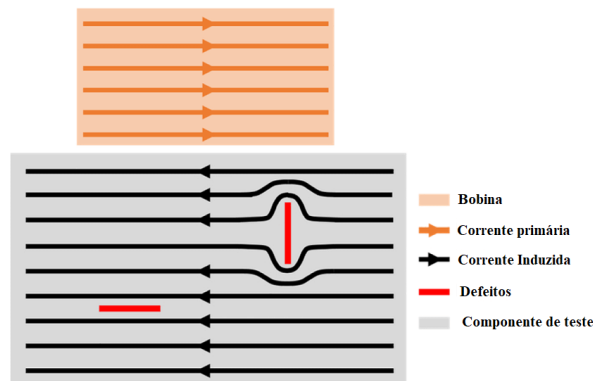


Figura 2.11 – Perturbação no campo elétrico por descontinuidade, adaptado de [37]

É de extrema importância notar, no entanto, que o posicionamento da descontinuidade é um fator importante para a perturbação do campo elétrico sendo que um defeito que se encontre na mesma direção que as linhas de corrente poderá não ser detectado como ilustrado também na Figura 2.11.

2.4.3 *Lift-off*

O *lift-off* é a distância entre a sonda e o material base. Uma variação desta altura não é ideal uma vez que o campo H_p é mais forte perto da sonda, ou seja, quando ocorre distanciamento entre estas duas peças a corrente induzida diminui e conseqüentemente varia a impedância. Isto significa que a detecção de defeitos pode ser afetada por este fator [33]. Desta forma, apesar de não ser necessário ter um *lift-off* igual a zero, é imperativo manter um *lift-off* constante ao longo da peça, uma vez que este fator afeta bastante o sinal recebido da variação da impedância [38].

2.4.4 Efeito de bordo

Como foi mencionado em §2.4.2, distorções na corrente provocam grandes variações na impedância. Assim, em caso de as correntes encontrarem uma parede, irá criar um fenômeno que tem o nome do efeito de bordo como se pode observar na Figura 2.12 [36].



Figura 2.12 -Representação do Efeito de bordo [36]

Em conclusão, o plano de impedâncias permite uma interpretação dos resultados da inspeção de um componente baseado na variação da impedância que por sua vez é afetada pelos parâmetros mencionados. A Figura 2.13 mostra uma síntese das diferentes perturbações que fazem variar o plano de impedâncias para materiais condutores ferromagnéticos ou não ferromagnéticos [39].

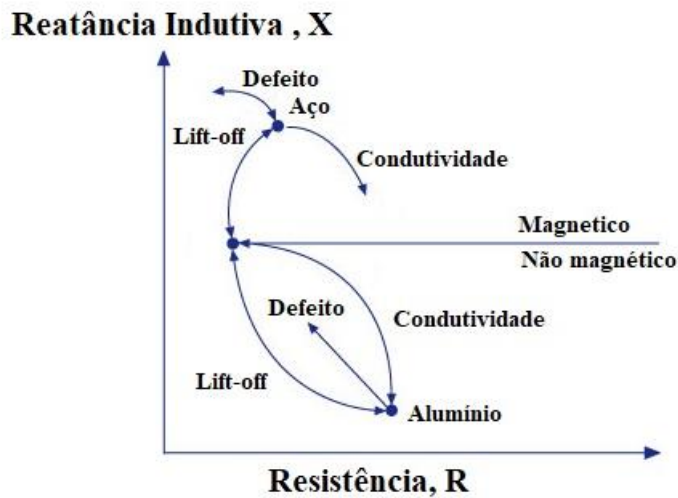


Figura 2.13 – Plano de Impedâncias, adaptado de [34]

2.4.5 Profundidade de Penetração

Um outro aspecto que influencia a detecção de defeitos por este método é a capacidade de penetração das correntes. A distribuição e intensidade das CI num material é fortemente afetada pela condutividade desse mesmo material. As CI são bastante mais densas à superfície quando comparadas com as que se encontram mais no interior da peça, fenómeno denominado de efeito de pele [36]. Num material com uma condutividade relativamente elevada, as CI são geradas mais à superfície reduzindo rapidamente em função da profundidade. Isto porque, tendo uma corrente mais intensa no material condutor, também este irá criar um campo H_s mais forte. Pela mesma lógica, o contrário também se verifica para um material menos condutor, com uma menor variação em profundidade, mas correntes mais fracas à superfície. Este fenómeno é melhor compreensível através da Figura 2.14 [40].

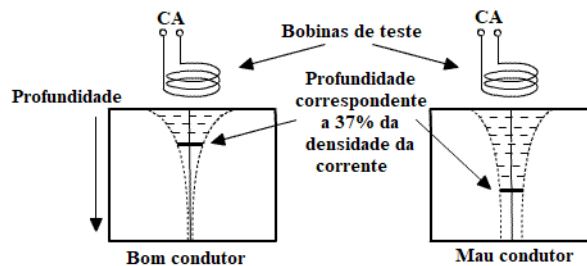


Figura 2.14 – Profundidade de Penetração das Correntes Induzidas, adaptado de [34]

Com base no que foi dito anteriormente, sabe-se ainda que a profundidade que descreve a característica “efeito de pele” é dada pela equação 2.5.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma_c}} \quad (2.5)$$

Onde $f [s^{-1}]$ é a frequência de excitação, $\mu [H/m]$ é a permeabilidade magnética e $\sigma_c [S/m]$ é a condutividade elétrica. Para além disso, $\delta [m]$ é a profundidade na qual a densidade da corrente diminui para 37%. A partir desta equação pode-se concluir que a profundidade de

penetração das CI é fortemente afetada pela escolha da frequência. Frequências mais altas levam a uma menor penetração e frequências mais baixas a uma maior penetração. Pode-se ainda concluir que, se a sonda estiver mais afastada da peça, as correntes induzidas também serão menores, pelo que o *lift-off* afeta a profundidade de penetração [36].

2.4.6 Classificação de sondas

Uma das grandes vantagens do uso de correntes induzidas para testagem de componentes é a sua grande capacidade de adaptação uma vez que a sonda abrange uma grande quantidade de tamanhos e geometrias.

Um dos tipos de classificação tipicamente utilizado para as sondas é o modo de operação. Este refere-se ao modo como as sondas estão dispostas em relação ao componente testado. Irão ser abordados aqui os tipos de sonda que são usualmente usados com bobina. Assim, podem-se classificar em sondas [33,34,41,42]:

- **Absolutas** – Esta sonda usa uma bobina única que é capaz tanto de gerar correntes como contém um sensor que capta variações no campo elétrico. São usadas em contacto direto com o componente inspecionado e podem ser usadas não só para a deteção de defeitos como para determinar a condutividade do material, medições de *lift-off* e espessura dos materiais. São particularmente usadas para detetar falhas longas ou variações dimensionais pequenas em tubos e barras;
- **Diferenciais** – Estas, ao contrário das absolutas, consistem em duas bobinas que comparam duas partes adjacentes do material. As bobinas estão ligadas em direções opostas de forma a igualar as tensões. Quando ambas as bobinas estão dispostas sobre uma área sem defeitos a diferença de potencial entre ambas é nula. No entanto, quando uma das bobinas está sobre o defeito o mesmo já não acontece. Neste modo, a sonda é altamente sensível a defeitos pontuais. No entanto, a deteção de defeitos longos é um desafio. Por esse motivo, muitos investigadores, para compensar esta desvantagem, utilizam sondas que incluem uma sonda absoluta e uma diferencial para detetar defeitos de todas as dimensões.
- **Reflexão** – Estas são muito semelhantes às diferenciais na sua disposição, no entanto, nestas, uma das bobinas é utilizada como indutora de correntes e a outra é a recetora. Isto permite otimizar cada uma das bobinas para o seu objetivo pretendido. Nomeadamente, na primeira bobina, a impedância pode ser ajustada de forma a produzir um campo H_p mais forte. A segunda, que recebe o sinal, pode ser diminuída para receber o campo elétrico secundário com a melhor sensibilidade possível.
- **Híbridas** – Quando junta dois modos de operação diferentes. Um exemplo seria uma sonda a funcionar no modo de reflexão, no entanto, a bobina que recebe o sinal pode estar a operar no modo diferencial. Outras configurações podem ser usadas.
- **Planares** – Estas são bobinas dispostas num plano. São uma tecnologia de sondas ainda em ascensão e têm a vantagem de se poder produzir com o formato pretendido de forma a se adaptar a qualquer geometria e permitem uma maior sensibilidade à descoberta de defeitos devido à maior capacidade de controlo de *lift-off*.

2.4.7 Inspeção de SBL por CI

Apesar de já existirem algumas tentativas de soluções para detecção de defeitos em SBL, como visto em §2.2, destaca-se que nenhuma dessas soluções está ainda comercialmente disponível.

Atendendo, no entanto, à alta necessidade de inspeção destes cordões devido à sua importância, Machado et al., viram a necessidade de modelar, produzir e validar sondas de CI que se destacassem das demais já existentes no mercado. A conceptualização inicial da sonda teve em conta não só a permeabilidade, resistividade e condutividade dos materiais envolvidos, como também a sua geometria. Isto permitiu definir os parâmetros que iriam ser utilizados na sonda. Para além disso foi utilizado o modo absoluto em detrimento do modo diferencial, criando, no entanto, um circuito que tivesse em conta uma outra sonda de referência como a ilustrada na Figura 2.15. Esta solução permite um melhor resultado em relação ao ruído, pois para uma zona do cordão sem defeitos a diferença de potencial de cada uma das sondas (U_i , cordão de referência e U_r , cordão analisado) são muito semelhantes, o que resulta numa variação de impedância perto de zero na ausência de defeito e aumentada na presença de defeito [1].

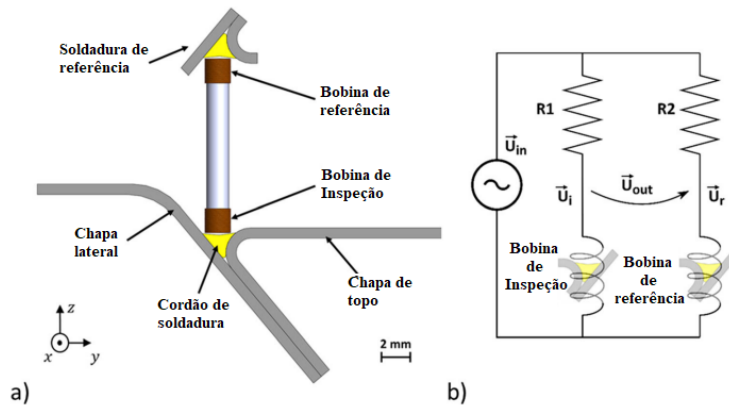


Figura 2.15 - Configuração da Sonda de CI, adaptado de [1]
a) Configuração proposta da sonda, b) Circuito elétrico

Após a produção da sonda com as dimensões adequadas e ajustadas o resultado é o apresentado na Figura 2.16, onde a) é a sonda com a bobina de inspeção e a de referência e b) é a montagem final com o suporte [1].

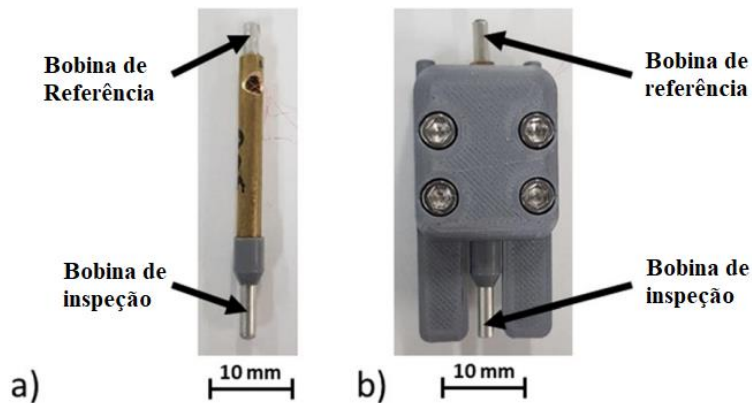


Figura 2.16 - Sonda após produção, adaptado de [1]
a) Sonda de inspeção e de referência, b) Montagem final

Foram por fim realizados testes de forma a validar esta sonda, tanto num *chassis* de automóvel sem conhecimento prévio da sua condição como em defeitos artificiais. Os resultados mostraram-se promissores na medida em que a altas frequências (2 MHz) uma resposta clara é visualizada a defeitos superficiais enquanto a frequências baixas (250 kHz) são visualizadas as mais longe da superfície. Um exemplo destes resultados pode ser encontrado na Figura 2.17. Esta diferença entre as duas frequências pode permitir inspeções que identifiquem apenas os defeitos superficiais e outra que detete os mais em profundidade [1].

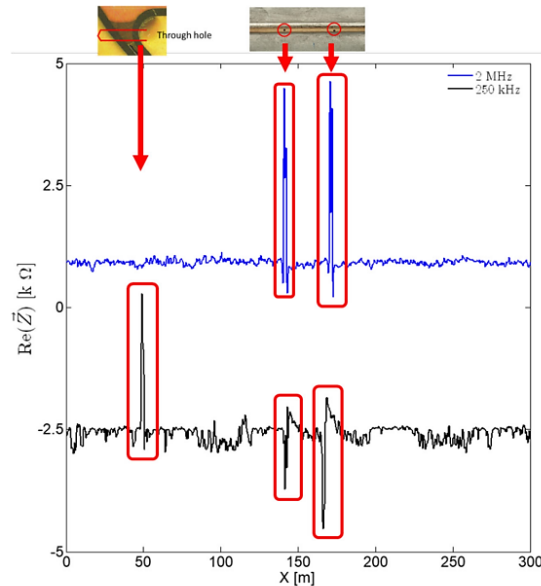


Figura 2.17 - Resultados do ensaio por uma Sonda de CI [1]

Num segundo estudo, Machado et al, implementaram dois métodos baseados em correntes de forma a se complementarem e obterem uma resposta melhor. Por um lado, foi implementada uma sonda cujo modo de funcionamento é bastante semelhante à sonda apresentada em [1] (Figura 2.18 a)), por outro, foi utilizada uma segunda tecnologia que usa uma diferença de potencial para criar corrente direta no componente através de uns elétrodos (representados a vermelho na Figura 2.18 b)) e dois sensores para deterem variações do campo elétrico (representados a verde). O uso combinado destas soluções deve-se ao facto de esta segunda solução possibilitar a deteção de defeitos em locais que por CI não são possíveis (e vice-versa), como por exemplo, as interfaces brasadas cordão/material base onde pode existir falta de fusão de material de adição que por CI passam indetetáveis [43].

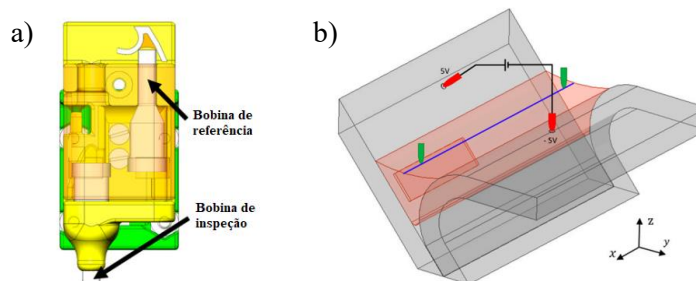


Figura 2.18 - Configurações dos dois tipos de ensaio, adaptado de [43]
a) Sonda de CI, b) CI por diferença de potencial

É de notar que ambas as soluções apresentadas são para a generalidade do cordão, não sendo por isso as soluções mais adequadas para a zona final ou inicial do mesmo. Para essa parte final ou inicial do cordão algumas considerações extras teriam de ser tomadas em conta. A geometria complexa do cordão levaria à impossibilidade de deteção de defeitos por correntes induzidas pelo método da variação da impedância como é utilizado pelos estudos apresentados, invalidando qualquer solução já existente. Isto aconteceria por causa do efeito de bordo e impossibilidade de manter o *lift-off*, que levaria a demasiado ruído no sinal.

2.4.8 Surface-Mount Inductors

Existe uma continua necessidade de avaliação de componentes cada vez mais pequenos, o que levou a uma aparição de indutores também com dimensões muito mais pequenas, neste caso, os *surface-mount inductors* (SMD) [44]. O uso deste tipo de indutores ainda não foi muito estudado, especialmente na área das CI. Existe já, no entanto, apesar de muito escassa, documentação sobre testes realizados a SMD fabricados com núcleo de ferrite. Isto porque, normalmente, em comparação com os SMD com núcleo vazio, tendem a melhorar o sinal em relação ao ruído provocado pelos sensores (efeito de acoplamento) [45]. Nomeadamente, num estudo efetuado por Sollier et al, realizaram-se simulações de sondas de núcleo de ferrite que serviram para confirmar que o efeito de acoplamento destas sondas era de facto maior quando comparado a sondas sem ferrite [46].

Num outro estudo, realizado por Barrancos et al [47], foram realizados ensaios a SDM com 3 tipos diferentes de configurações (com núcleo de ferrite, com núcleo de cerâmico e com núcleo de ferrite e um revestimento também de ferrite) num componente de aço inoxidável 316 onde foram realizados defeitos artificiais com diferentes diâmetros e profundidades. Este ensaio teve o objetivo de perceber melhor o funcionamento destes indutores e quais funcionariam melhor para detetar defeitos superficiais. Este ensaio mostrou que os SMD com melhor resposta foram os com núcleo de ferrite sem revestimento.

Apesar dos SMD mais comercializados, atualmente, serem os com núcleo de ferrite, existem já diferentes estudos que testam a possibilidade de utilização de outros núcleos para este tipo de aplicações, nomeadamente o uso de pós de ligas magnéticas [44] ou até mesmo óxido de alumínio [48].

2.5 Síntese do Capítulo

Apesar das diversas soluções apresentadas para a deteção de defeitos em cordões de SBL, tanto por CI como por outras metodologias, uma característica mantém-se comum a todas. Nenhum destes métodos se dirige realmente à zona final do cordão de soldadura em SBL. Isto acontece porque esta é uma zona particularmente difícil de avaliar pelas diversas tecnologias devido à sua geometria extremamente complexa. Adicionalmente, todas estas tecnologias avaliam o cordão comparando as diversas partes do seu todo, ou seja, os defeitos são detetados por comparação de zonas sem defeito com as com, o que leva a que para zonas tão curtas e pontuais como a extremidade do cordão, não sejam aplicáveis. No entanto, não deixa de ser importante, uma vez que um defeito nesse ponto pode comprometer a integridade da estrutura da mesma forma que um defeito que se encontre noutra zona do cordão.

Por esse motivo, ao longo desta dissertação, esse será o elemento de estudo. Será avaliada a possibilidade do uso de um sensor de pressão para avaliação da existência de furos passantes e o uso de SMD para o resto dos defeitos.

3 Métodos e Materiais

3.1 Introdução

Neste capítulo são explorados e detalhados os requisitos necessários à conceptualização de uma solução que permita responder ao problema exposto em §1.1. Desta forma, foi desenvolvido um componente estanque projetado para acoplar a superfície de um cordão de SBL de forma que seja possível a criação e monitorização de pressão para a deteção de defeitos passantes. Para complementar, foram criadas sondas com SMD já comercializados para a posterior avaliação de defeitos superficiais e sub-superficiais por CI.

3.2 Propriedades a considerar da superfície a inspecionar

A maior dificuldade no que toca à deteção de defeitos em SBL na junta de chapas na indústria automóvel ainda permanece nas geometrias complexas que a superfície apresenta, que se agravam quando aliadas às reduzidas dimensões da largura do cordão de soldadura. Para melhor visualização destes aspetos, na Figura 3.1 a) pode ser observada a secção transversal de um cordão de SBL com as características geométricas em estudo, e na Figura 3.1 b) a complexidade da extremidade do cordão.

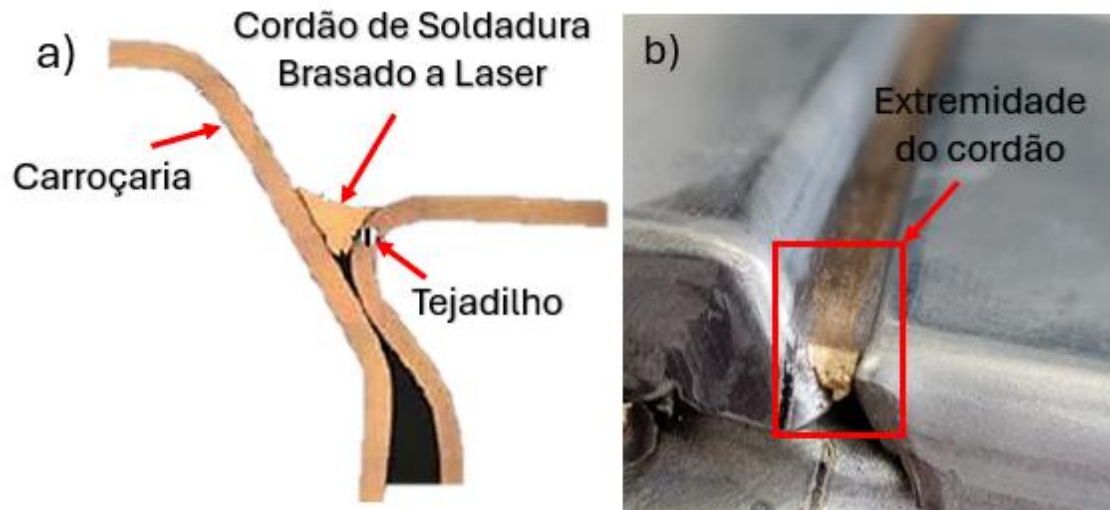


Figura 3.1 – Cordão de Soldadura por Brasagem a Laser, adaptado de [49]
 a) secção transversal do cordão, b) extremidade do cordão

Na Tabela 1 estão sintetizados os aspetos essenciais que se retiram da Figura 3.1.

Tabela 1 - Características da superfície de um cordão de SBL

Número	Propriedade	Característica
1	Geometria não plana da superfície do cordão de soldadura	Dificulta o acoplamento da superfície necessitando de soluções que sejam capazes de se adaptar.
2	Geometria complexa da extremidade do cordão	Apresenta uma dificuldade acrescida em relação à inspeção da mesma.
3	Dimensões do cordão na ordem dos milímetros	Implica também pequenas dimensões das soluções apresentadas, mantendo a precisão.

3.3 Desenvolvimento e produção do componente de inspeção de pressão

3.3.1 Requisitos

Uma vez conhecidas as condições superficiais do cordão a inspecionar, começaram-se por definir os requisitos funcionais que o componente de acoplamento deve possuir de forma a responder às necessidades apresentadas. Este deve permitir a criação de pressão na superfície do cordão sem comprometer a fiabilidade da inspeção, de forma a se encontrar defeitos passantes no mesmo. Na Tabela 2 está apresentada a síntese dos requisitos considerados essenciais para o estudo.

Tabela 2 - Requisitos funcionais do componente de acoplamento

Requisito	Comentário
Impermeabilidade	Um dos aspetos mais importantes que se deve ter em consideração, essencialmente aquando da escolha do material e o processo de fabrico, é a impermeabilidade. Isto porque este é um ensaio que envolve a criação de pressão e a posterior monitorização de variações dessa mesma pressão, pelo que, qualquer falha no material irá criar ruído nos resultados.
Entrada de ar pressurizado	O componente de inspeção deverá ter uma zona que permita a pressurização da câmara do componente fabricado, mantendo essa pressão ao longo do ensaio.
Entrada para sensor de pressão	O componente de inspeção também deve ter uma zona onde se possa colocar um sensor de pressão para que possa monitorizar variações na pressão em caso de fuga de ar.
Capacidade de acoplamento de qualquer zona do cordão	O componente deve conter um orifício que permita acoplar e manter o contacto com a junta de soldadura, permitindo apenas sair ar caso exista defeito. Um especial detalhe a considerar neste requisito é que a zona de contacto tem de ser adaptável às diversas zonas e rugosidades do cordão sem comprometer a impermeabilidade do ponto de saída do ar.
Zona passível de segurar pelo operador ou braço robótico	Para que possam ser efetuados os testes, é necessário existir uma zona que permita que o componente seja utilizado pelo operador ou montado num braço robótico.

3.3.2 Método de pressurização

Para a deteção de variações de pressão no interior do componente de acoplamento, foi necessária a escolha de um sensor de pressão adequado. No entanto, este apenas pode ser efetuado após a escolha de um método de pressurização. Isto acontece porque o sensor necessita de ter o seu modo de funcionamento dentro dos valores de pressão a que o ensaio está a ser efetuado. Desta forma, foi escolhido um balão, como método de pressurização, como se pode observar pela Figura 3.2. O balão permite a realização de pressão com um valor máximo de 0.6 psi e permite ainda manter a pressão constante dentro do componente, desde que não exista vazamento de ar por defeitos ou por deficiência do protótipo. Desta forma, o balão foi ligado ao componente, como está representado na Figura 3.2, pelo bocal do balão, através de cola quente, para garantir a estanquicidade da abertura, tendo também sido criada uma entrada de ar para o enchimento do balão.



Figura 3.2 – Método de pressurização através de um balão
1) ligação do balão ao componente acoplante, 2) entrada de ar

Para ajudar no isolamento foi ainda criada uma saliência no protótipo que ajudasse a impedir a saída de ar, como se pode observar na Figura 3.3.

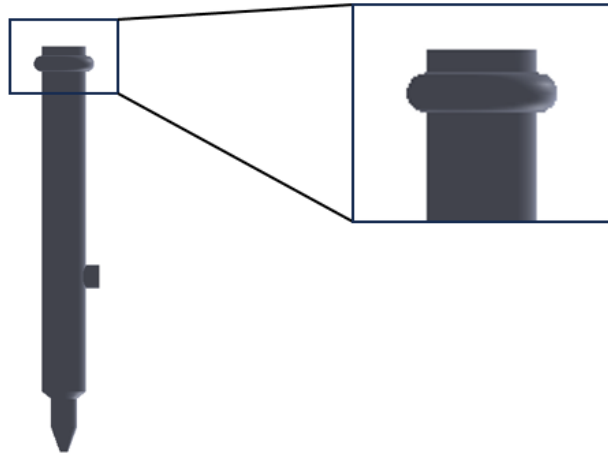


Figura 3.3 – Ilustração da saliência criada no componente

3.3.3 Escolha e montagem do sensor de pressão

Para a deteção de variações no nível de pressão no interior do componente fabricado, foi escolhido o sensor MPX5010GP, apresentado na Figura 3.4, cuja ficha técnica está apresentada no Anexo 1. Uma vez que foi escolhido o método de pressurização através de um balão com valores máximos abaixo de 0.6 psi, escolheu-se um sensor com valor máximo de 1,45 psi (10 kPa) para melhor precisão dos valores. Este sensor funciona por piezoresistividade, sendo que utiliza um diafragma de silício com piezoresistores na superfície. Este diafragma é deformado quando uma pressão diferencial é aplicada. Desta forma, este lê os valores analógicos da tensão (sinal de entrada) e transforma-os para digital (sinal de saída).



Figura 3.4 - Sensor de Pressão MPX5010GP

Para o funcionamento do sensor, foi utilizada uma montagem experimental com execução por uma placa de *Arduino Uno*, programada em *C* (código presente no Apêndice 1) e alimentada por uma fonte de 5 V. A visualização dos gráficos, criados pelos valores de pressão em função do tempo extraídos através do sensor, é posteriormente efetuada através de um código em *Python* (presente no Apêndice 2) que permite visualizar os valores em tempo real. A montagem está também apresentada na Figura 3.5, com a respetiva legenda.

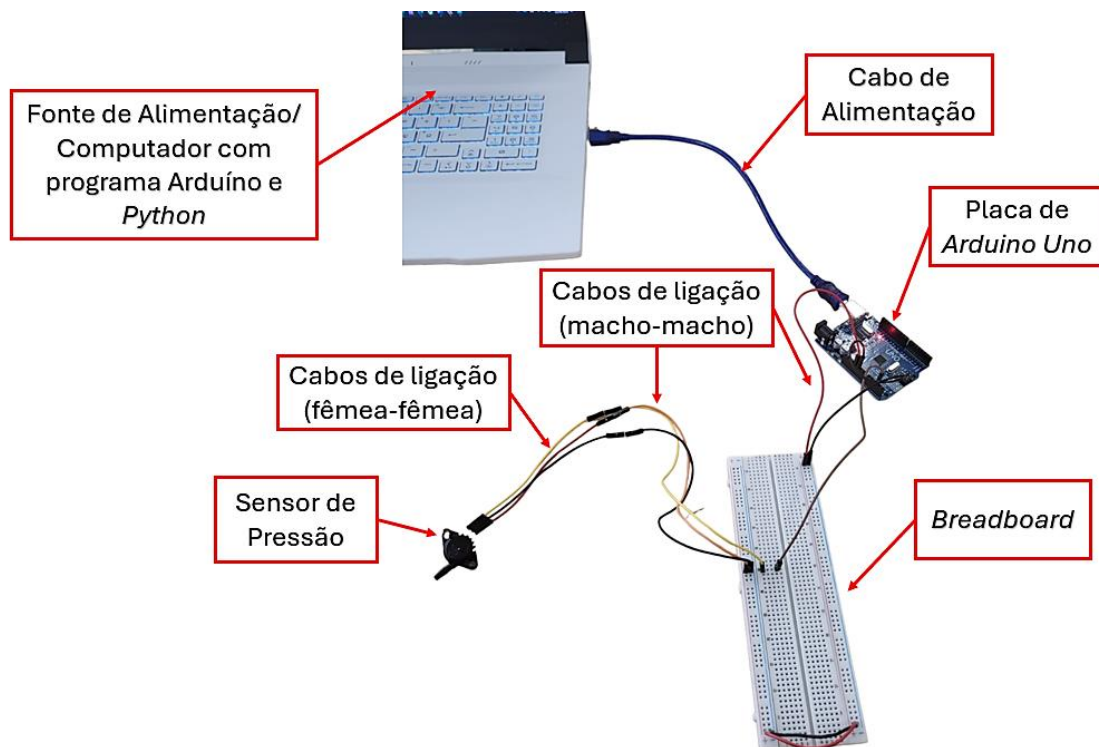


Figura 3.5 – Montagem do Sensor de Pressão

O funcionamento do sensor é efetuado por uma alimentação de 5 V, como já referido, e por um código criado em Linguagem *Arduino* que é posteriormente enviado para a placa *Arduino Uno*, mantendo o sensor a funcionar enquanto houver uma fonte de alimentação. Para a leitura

dos valores de pressão, é utilizada no código a função “analogRead()”. Esta função permite ao sensor ler a tensão analógica fornecida e transformá-la num valor entre 0 e 1023 (1024 valores). Este valor tem de ser posteriormente transformado num valor de pressão que é feito pela equação 3.1.

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Sinal Digital} - \text{Pressão Mínima}}{\text{Pressão Máxima} - \text{Pressão Mínima}} \times 1.45 \quad (3.1)$$

Onde o 1,45 psi é a capacidade máxima de leitura do sensor e o Sinal Digital é o valor digital lido representado por um número entre 0 e 1023. Os valores Pressão Máxima e Pressão Mínima são os valores máximo e mínimo, respetivamente, entre os quais o sensor representa valores admissíveis (sem erro). Isto é necessário pois para tensões perto de 0 V e 5 V, os valores mantêm-se constantes. Neste caso, pelo Anexo 2, consegue-se perceber que a tensão *offset* deste sensor é no mínimo 0.2 V. Para valores abaixo de 0.2 V, a tensão analógica lida vai se manter 0 V. Por outro lado, a tensão máxima será 4.8 V, sendo que acima disso a tensão analógica lida mantêm-se 5 V. Sendo assim, pelas equações 3.2 e 3.3 conseguimos retirar os valores necessários.

$$\frac{\text{Pressão Mínima}}{1024} = \frac{0.2}{5} \Leftrightarrow \text{Pressão Mínima} = 40.96 \quad (3.2)$$

$$\frac{\text{Pressão Máxima}}{1024} = \frac{4.8}{5} \Leftrightarrow \text{Pressão Máxima} = 983.04 \quad (3.3)$$

3.3.4 Conceção e Modelação do componente de acoplamento

Como observado em §3.2, a geometria e dimensões da superfície do cordão podem impor um desafio no que toca à modelação de um componente que acople a superfície, especialmente quando o objetivo é não permitir que passe ar. Desta forma, para que se pudesse ter uma ideia das dimensões da superfície do cordão quando a modelação do componente, foi utilizado o *Laser Scanner EinScan H1* da *Shining 3D*. Através do programa *EXScan H* foi possível mapear a superfície do cordão de forma a que se pudesse obter a modelação do mesmo no programa *SolidWorks*, como se pode observar na Figura 3.6.

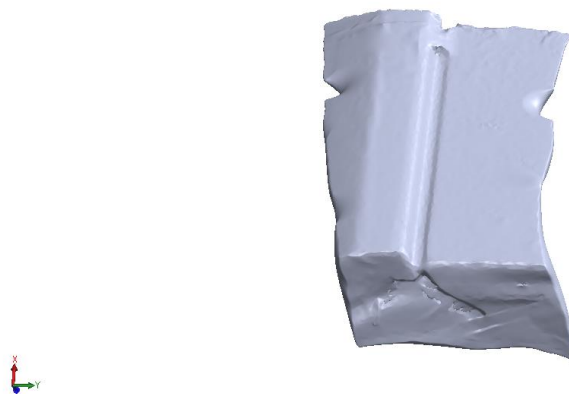


Figura 3.6 – Modelação 3D da Superfície do Cordão

Através deste modelo da superfície do cordão de soldadura em estudo, foi possível obter o tamanho exato da zona de contacto entre o componente acoplante e a superfície mapeada, como se pode observar pela Figura 3.7.

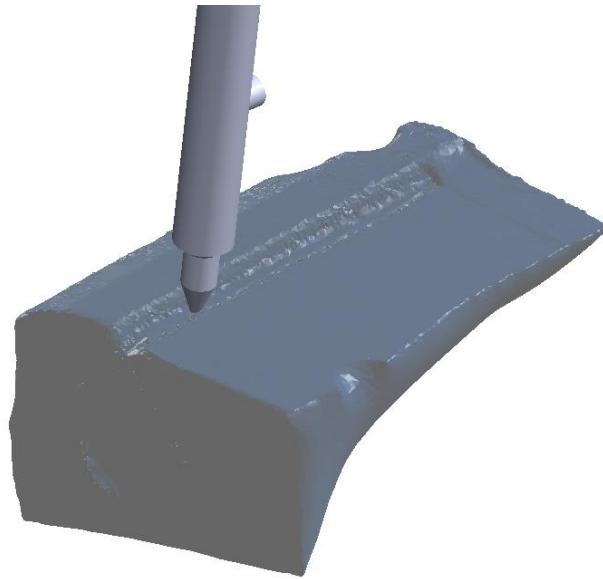


Figura 3.7 – Modelo da relação entre o componente fabricado e o componente de teste

Foi criado um primeiro protótipo desse mesmo componente que contém os requisitos apresentados em §3.3.1. Na Figura 3.8, consegue-se observar a secção transversal desse mesmo modelo.

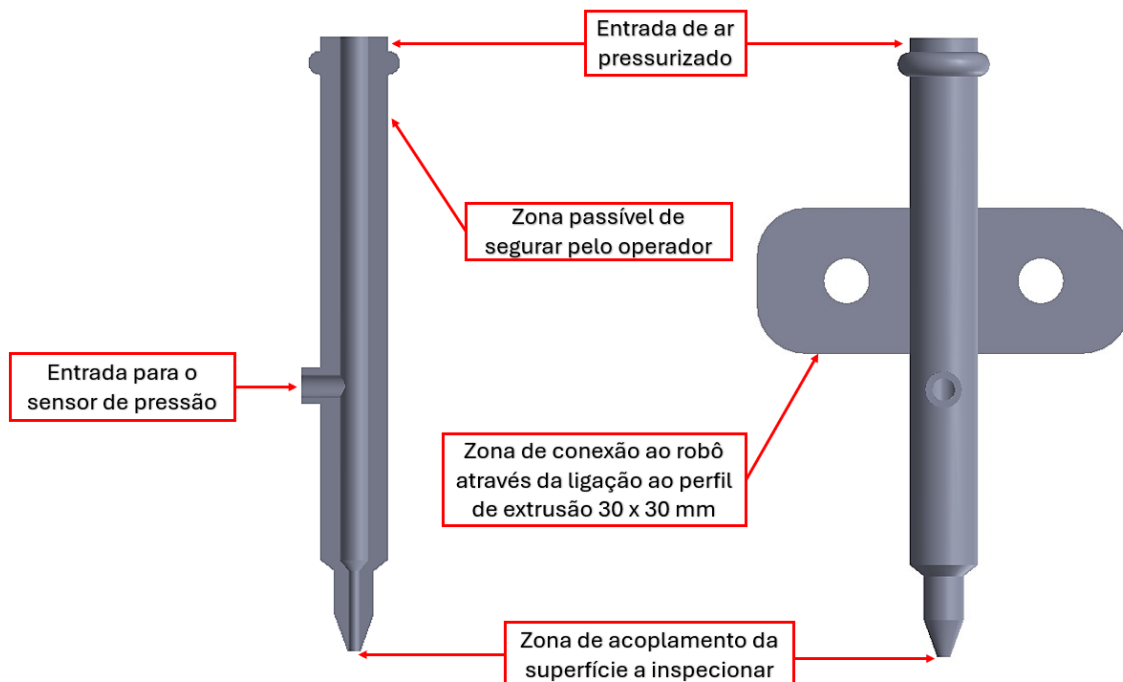


Figura 3.8 – Secção transversal do 1º protótipo do componente acoplante

De forma a averiguar se essa seria a melhor geometria, foram efetuados testes numa chapa plana já com o sensor montado e a funcionar. Para isso, foram criados dois defeitos passantes na chapa com dimensões de 2 mm e 1.5 mm, representadas pelas letras A e B, respetivamente. Na Figura 3.9 está apresentada uma ilustração desta chapa e dos defeitos na mesma. A seta preta representa o sentido do movimento do componente acoplante.

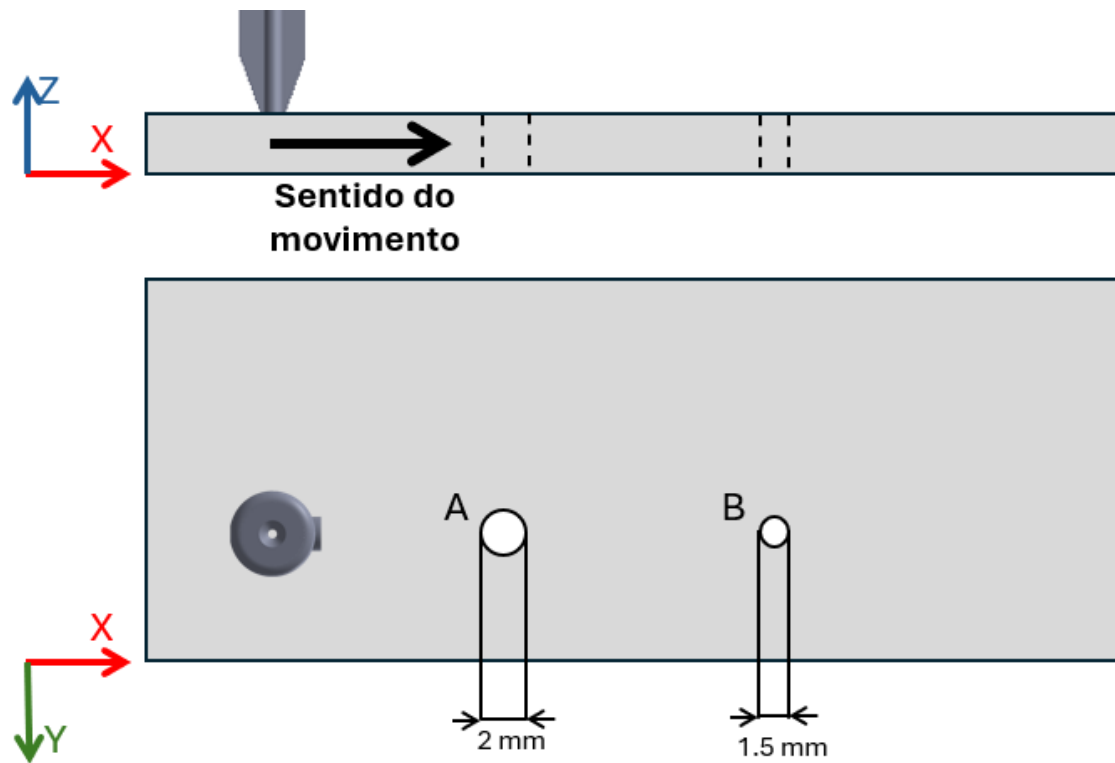


Figura 3.9 – Esquema ilustrativo da chapa com defeitos

É de notar que para ajudar a acoplar o componente fabricado à peça a ser inspecionada, foi utilizada cola quente, como se pode observar na Figura 3.10, e vaselina sólida como lubrificante para reduzir o atrito entre componentes e ajudar na movimentação. A cola quente é extremamente útil uma vez que permite a modelação do componente fabricado à peça de teste, impossibilitando as saídas de ar indesejadas.



Figura 3.10 – Zona de contacto entre o componente fabricado e componente de teste, revestido com cola quente e vaselina sólida

Os resultados estão então apresentados na Figura 3.11 sendo que as letras A e B representam mais uma vez os defeitos da Figura 3.9.

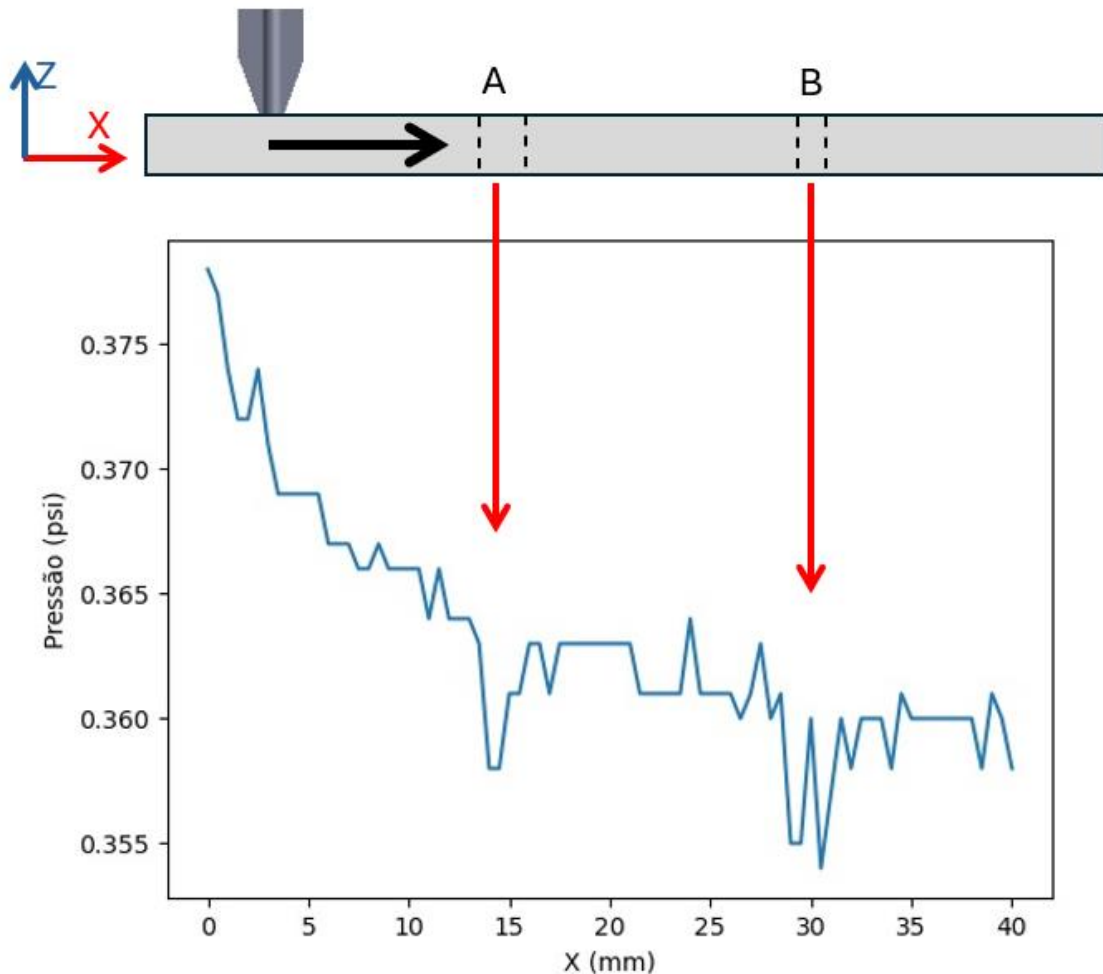


Figura 3.11 – Resultados experimentais do funcionamento do componente de acoplamento – 1ºProtótipo

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 3.11, o valor mantém-se praticamente constantes na presença e na ausência de furos. No entanto, quando o componente passa por um dos defeitos A ou B, existe uma pequena diminuição da pressão que acontece pela saída de ar do balão. Estes resultados demonstram que apesar de ter havido uma variação de pressão na presença de defeitos, estes resultados não são notórios e na ausência do conhecimento da localização dos defeitos, podem passar despercebidos no ruído provocado pelo sensor e por outras saídas de ar indesejadas. Desta forma, foi criado um segundo protótipo com vista a melhorar este fenómeno. Para isso, foi utilizada a equação 3.4 da conservação de caudal.

$$Q = v \cdot A \quad (3.4)$$

Onde $Q [m^3/s]$ é o caudal, $v [m/s]$ é a velocidade e $A [m^2]$ é a área. Isto significa que, se houver um defeito, haverá um caudal de ar. Com o caudal, há velocidade, e segundo o princípio de Bernoulli, onde há velocidade, a pressão diminui. Ao reduzir a área na zona de medição, a velocidade do ar nessa região aumenta ainda mais, o que leva a uma redução adicional da pressão. Esse aumento da velocidade na zona de medição torna o ensaio mais sensível, uma vez que a variação de pressão se torna mais pronunciada e, portanto, mais fácil de detetar. Sendo assim, foi remodelada a geometria inicial, tendo sido efetuada uma redução de área na zona onde o ar passa pelo sensor. A secção transversal do mesmo está representada na Figura 3.12.

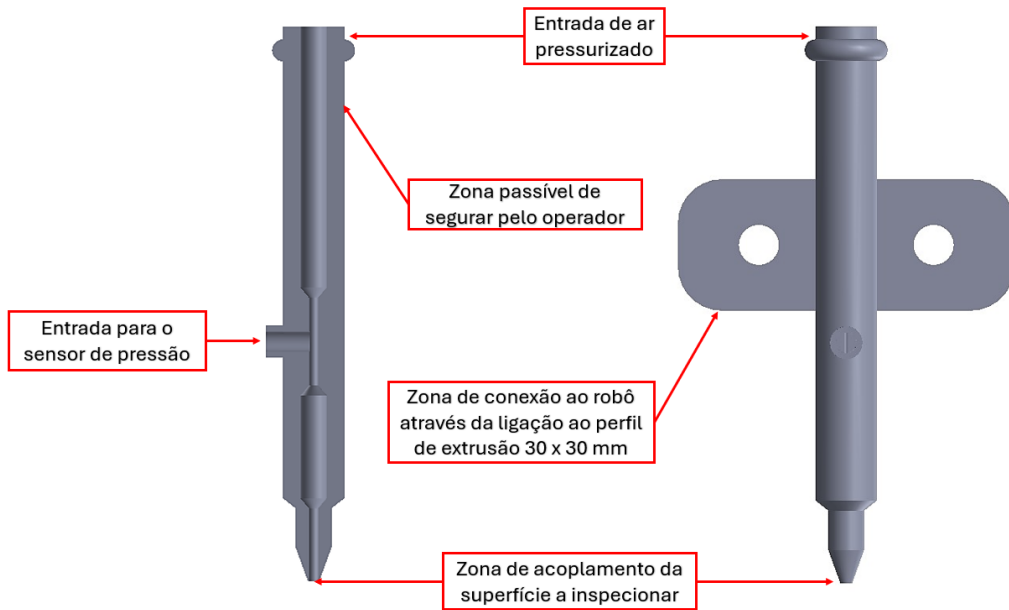


Figura 3.12 – Seção transversal do 2º protótipo do componente acoplante

Como se pode observar pela Figura 3.13, os defeitos são agora muito mais perceptíveis, sendo que, na presença de um defeito, conseguimos observar variações muito superiores às oscilações provocadas pelo ruído do sensor.

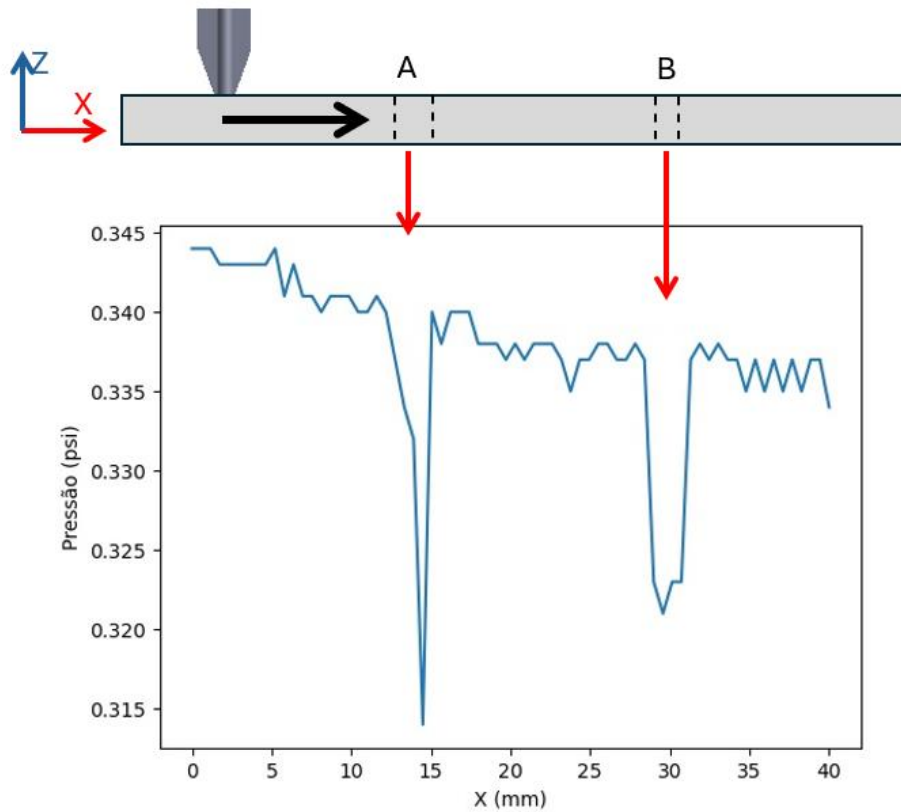


Figura 3.13 – Resultados experimentais do funcionamento do componente de acoplamento – 2º Protótipo

Na Figura 3.14, pode-se observar uma sobreposição dos gráficos onde é possível visualizar a diferença na detecção de defeitos de cada um dos protótipos. A diferença de pressão apenas está relacionada com o quanto o balão foi cheio em cada ensaio que não é constante porque é feito por sopro.

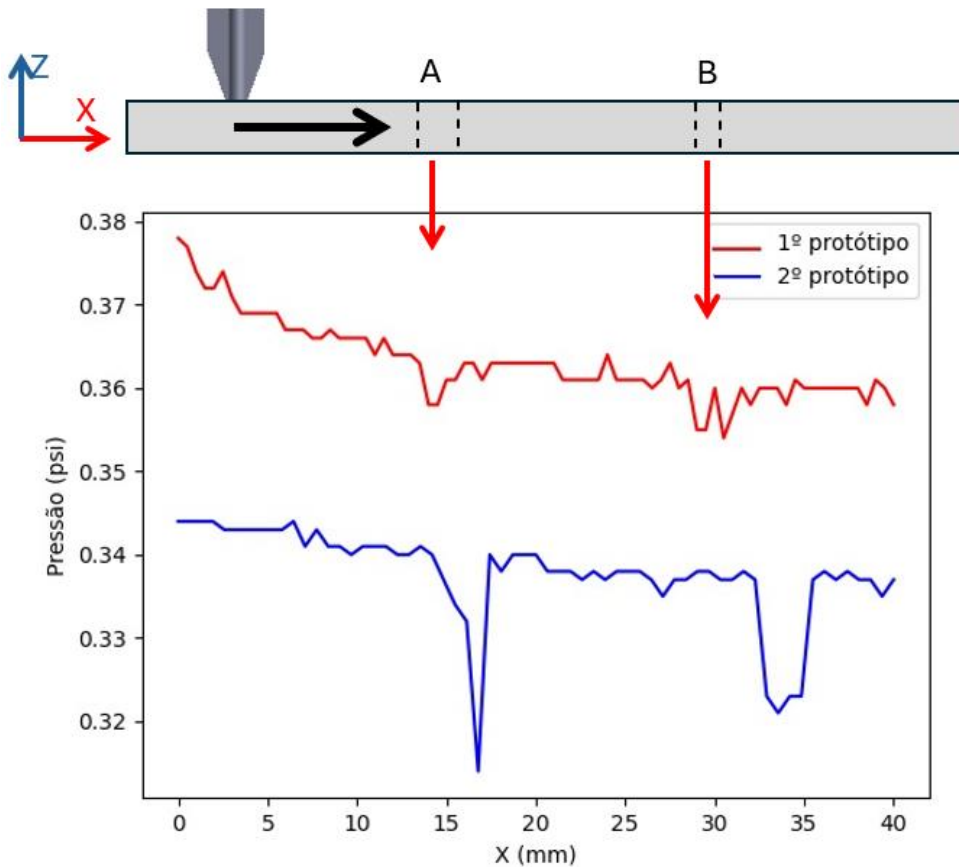


Figura 3.14 -Comparação dos resultados dos defeitos A e B para os dois protótipos

3.3.5 Escolha de material e equipamento de produção

Como determinado, foi imperativo garantir a impermeabilidade do componente de acoplamento, uma vez que a mesma pode afetar os resultados. Desta forma, a escolha do material e o modo de produção são elementos críticos para garantir que não existam saídas indesejadas de ar. Por esse motivo escolheu-se para produção do mesmo a impressão 3D em resina, através da impressora *anycubic* e com recurso ao *slicer AnycubicPhotonWorkshop*, que permite conferir não só a impermeabilidade, mas também a precisão do componente. No entanto, uma vez que a produção por resina é um processo um pouco mais complicado e caro, foi utilizada a impressão 3D por poliácido láctico (PLA) para primeiro garantir o dimensionamento correto do componente. A Tabela 3 resume os parâmetros utilizados na impressora 3D para obtenção do produto final.

Tabela 3 – Parâmetros de impressão 3D por resina

Parâmetro	Valor
Espessura de camada (mm)	0.05
Tempo de exposição normal (s)	4
Tempo de repouso (s)	0.5
Tempo de exposição em baixo (s)	40
Camadas base	6

3.4 Desenvolvimento e Produção de Sondas de Correntes Induzidas

Uma vez que o componente acoplante de pressão apenas tem a capacidade de detetar defeitos passantes no cordão, estudou-se um outro ensaio a partir de correntes induzidas para determinar a existência de defeitos à superfície ou perto desta. No entanto, para a zona da extremidade, poderia ocorrer o efeito de bordo pelos métodos já mencionados em §2.4.7. Desta forma, nesta dissertação pretende-se explorar um novo método do uso de sondas, que consiste na realização de ensaios localizados ao invés da movimentação das sondas ao longo do cordão, por forma a fazer medições localizadas da impedância e a sua comparação. O método seria então realizado da seguinte forma:

- 1º Colocar a sonda em cima do cordão de SBL sem defeitos;
- 2º Colocar a sonda em cima do cordão de SBL com defeito;
- 3º Colocar a sonda novamente em cima do cordão de SBL sem defeitos;
- 4º Averiguar se a impedância da primeira e da terceira etapa são iguais e se difere muito do valor da segunda etapa.

A terceira etapa serve para garantir que nada ocorreu de forma errada durante o processo.

3.4.1 Escolha de bobinas de CI

Foi testado o uso de SMD com núcleo de ferrite e cerâmico, não revestidos, já disponíveis comercialmente, que são colocados numa superfície que se pretenda avaliar. As principais motivações para a escolha destas bobinas é precisamente as muito reduzidas dimensões do cordão e o facto de serem extremamente económicos. Na Figura 3.15 pode ser observada uma destas bobinas descritas.



Figura 3.15 – *Surface-Mount Inductor*

Cada uma das bobinas escolhidas e testadas encontra-se na Tabela 4 com a respetiva numeração e dimensões.

Tabela 4 – Bobinas de Montagem Superficial avaliadas

	Referência	Dimensões (comprimento × largura × altura)	Núcleo
1	AISC-0805F-3R3G-T	2.29 x 1.73 x 1.55 mm	Ferrite
2	AISC-0805F-680J-T	2.29 x 1.73 x 1.55 mm	Ferrite
3	AISC-0603F-R47J-T	1.60 x 1.00 x 1.00 mm	Ferrite
4	AISC-0603F-1R8J-T	1.60 x 1.00 x 1.00 mm	Ferrite
5	AISC-0402HP-10NJ-T	1.00 x 0.55 x 0.5 mm	Cerâmico
6	AISC-0402HP-6N8J-T	1.00 x 0.55 x 0.5 mm	Cerâmico

3.4.2 Conceção do *Chassis* para as bobinas e Montagem

Para a conceção do *chassis* das bobinas, foram tidos em consideração os seguintes requisitos:

- A sonda funcionará em modo *bridge differential*, pelo que deve conter espaço para alojar duas bobinas, afastadas para que não haja interferência: uma bobina deve estar de forma que fique sobre o material de teste e outra de forma que seja possível colocar em contacto com um pedaço padrão de material;
- Deve conter um espaço onde seja possível colocar o conector;
- Deve conter um espaço onde estarão alojados os fios, de forma que estes não sejam movidos durante os ensaios para não criar ruído.

Desta forma, o suporte das bobinas foi modelado e montado como se pode observar pela Figura 3.16. As bobinas foram soldadas a fios de cobre, através da adição de estanho, o que criou um grande desafio. As reduzidas dimensões das bobinas levaram a que a área de contacto entre cada um dos fios de ligação e as bobinas fosse extremamente reduzida, abaixo de 1 mm, implicando que o peso dos fios seria suficiente para partir as mesmas. Dessa forma, foi utilizada cola quente para garantir que os fios e as bobinas se mantivessem estáveis o suficiente para evitar fragilidades durante o processo, uma vez que é necessário garantir o contacto entre a bobina e a superfície do cordão, durante os ensaios, o que pode levar a alguns esforços que sem a cola seriam o suficiente para partir as bobinas.

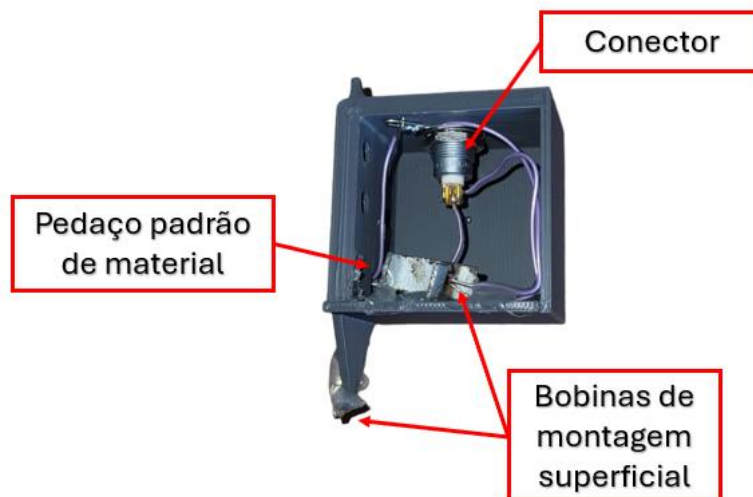


Figura 3.16 – Montagem do *Chassis*

Na Figura 3.17 a) e b), encontram-se as 6 sondas montadas e numeradas de acordo com a Tabela 4, vistas de frente e de trás, respetivamente, sem o material padrão.

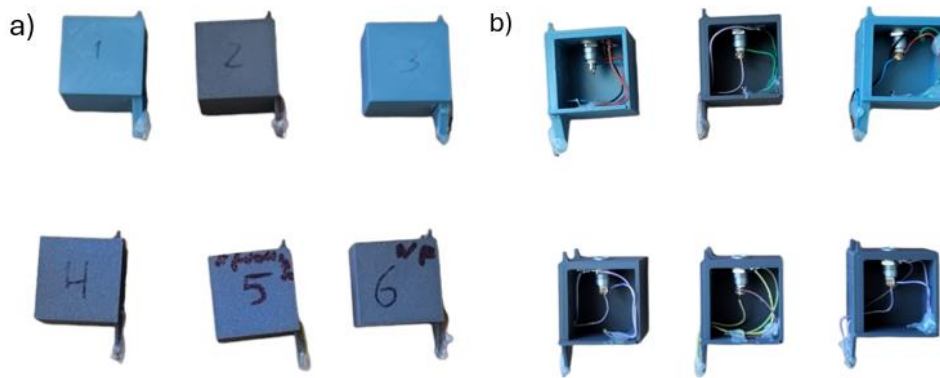


Figura 3.17 – Montagem das Sondas de 1 a 6
a) vista frontal, b) vista traseira

3.4.3 Controlo do *lift-off*

Aquando da testagem do funcionamento destas sondas num pedaço de cordão de SBL, é necessário haver um controlo do *lift-off* para que este efeito não afete o estudo. Ou seja, é necessário garantir que a altura da sonda em relação ao componente de teste se mantenha sempre igual. Desta forma, foi criado um mecanismo (representado na Figura 3.18) com funcionamento por uma guia linear que mantém a bobina em contacto com o cordão por ação da gravidade. Para além disso, permite ligar o Chassis ao perfil extrusão alumínio 30×30 que por sua vez permite ligar o sistema de controlo de *lift-off* a um braço robótico para realizar os ensaios.



Figura 3.18 – Sistema de Controlo de *Lift-off*

3.5 Síntese do Capítulo

Ao longo deste capítulo foram desenvolvidas duas soluções para a deteção de defeitos ao longo e na extremidade de um cordão de soldadura. Uma delas passa pela deteção de defeitos passantes, através do acoplamento da superfície do cordão e conseqüente aplicação de pressão e outra pelo uso de uma sonda de CI para detetar defeitos superficiais. Para o primeiro caso foi concebido um protótipo em resina que permite a aplicação de pressão na superfície do cordão através de um balão, para posteriormente detetar variações nessa pressão através de um sensor,

programado em *arduino*, com visualização dos gráficos em tempo real através de um código *Python*. No segundo caso, foram encomendadas bobinas de montagem superficial já comercializadas e criou-se um chassis e um mecanismo que permite controlar o *lift-off*, para a detecção de defeitos superficiais e sub-superficiais através de um novo método estudado ao longo desta dissertação.

4 Ensaios e Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos, com foco nas duas partes essenciais do estudo. Na primeira parte descreveram-se os ensaios realizados com o componente fabricado essencialmente para o teste da pressão. Foram efetuados ensaios de validação através da deteção de defeitos ao longo do cordão, para posteriormente se validar o uso deste método na extremidade. Na segunda parte, procedeu-se à validação experimental das sondas de CI desenvolvidas no capítulo anterior. Estas foram testadas com o intuito de se validarem na deteção de defeitos superficiais ou sub-superficiais. Posteriormente, escolheu-se a sonda que apresentou melhor resultados e realizaram-se ensaios com o objetivo de testar a eficácia de um novo método de utilização pontual de sondas.

Este capítulo oferece assim uma visão abrangente e detalhada do processo experimental, desde a montagem experimental até à análise e validação dos resultados.

4.2 Validação Experimental da Monitorização de Pressão

Foram efetuados ensaios diferentes de forma a validar a possibilidade de efetuar a deteção de defeitos passantes num cordão de SBL por monitorização de pressão (tanto ao longo do seu comprimento como na sua extremidade). Desta forma, foi realizada a sua montagem experimental que se encontra apresentada na Figura 4.1 com a respetiva legenda. Foi fixo o componente de teste a uma plataforma de madeira, através de dois parafusos. Por sua vez, a plataforma foi presa a uma mesa com dois sargentos de rosca. Foi montado o sensor e uma vez que os ensaios são

realizados manualmente, foi ainda colocado o componente de pressão em cima do componente de teste, também manualmente.

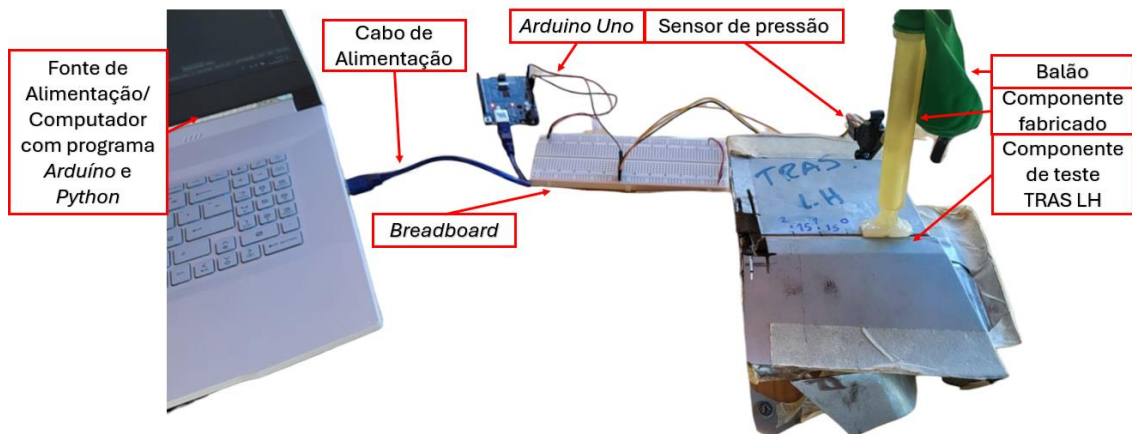


Figura 4.1 – Montagem Experimental da Monitorização de Pressão

4.2.1 Ensaio de Monitorização de Pressão ao longo do cordão

A realização deste ensaio serviu para averiguar se seria possível realizar este método da pressão com o componente produzido numa superfície tão irregular como a do cordão de soldadura por SBL. Caso não fosse possível então também não seria possível na extremidade. Para isso, foi utilizada cola quente de forma a modelar a superfície do cordão. Uma vez que o orifício de saída de ar do componente não tem as dimensões exatas do cordão (isto porque a superfície do mesmo não é plana), foi criada uma maneira de garantir que o orifício está sempre em contacto com toda a superfície do cordão. Sendo assim, criou-se um funil na cola, na zona de saída de ar, como se pode observar pela Figura 4.2. Com este método o diâmetro do orifício passa a não ser tão relevante.

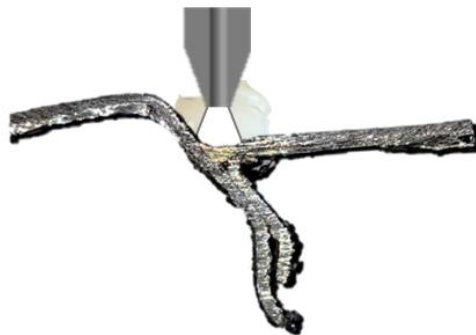


Figura 4.2 – Representação do funil de cola à saída do componente fabricado

Para a realização deste ensaio foram efetuados dois defeitos artificiais, com uma broca de 1 mm, num cordão por SBL, denominado TRAS LH, como estão apresentados e numerados na Figura 4.3.

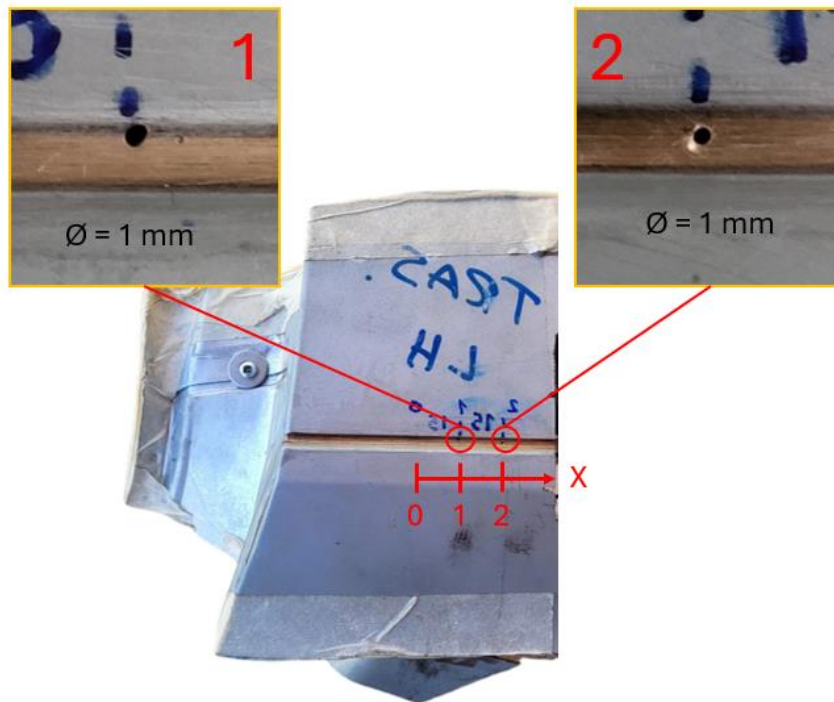


Figura 4.3 – Defeitos artificiais no cordão TRAS LH

Foi então primeiro efetuado um teste, manualmente, sem os defeitos, para averiguar se tanto o componente como a interface com o cordão estavam ambos estanques e para ter um ponto de comparação quando fosse testado com defeitos, estando os resultados apresentados na Figura 4.4. O eixo X representa a distância percorrida pelo componente ao longo do cordão. Para estes ensaios, a superfície do componente de teste foi lubrificada com vaselina sólida.

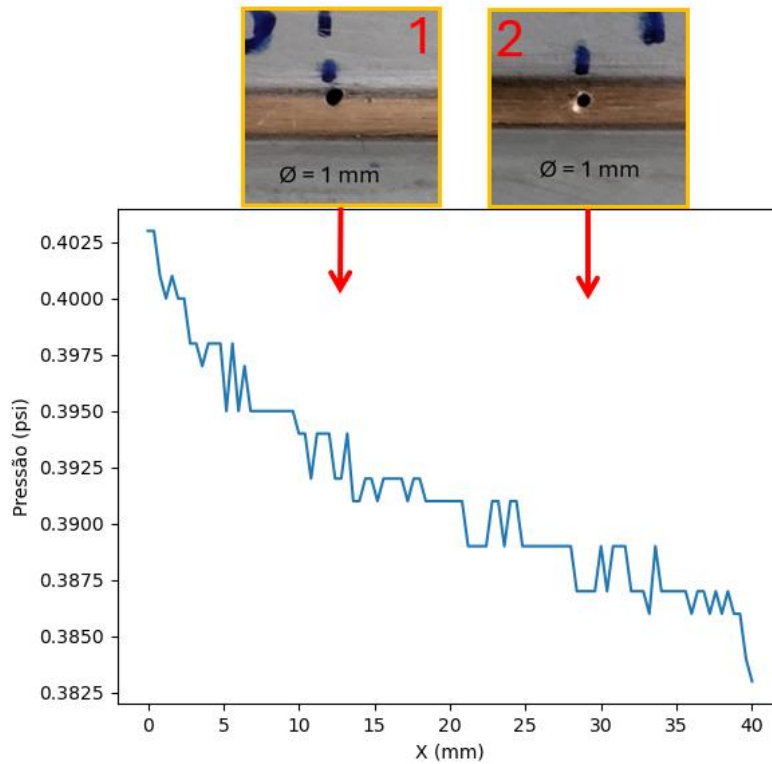


Figura 4.4 – Resultados experimentais da pressão em função da distância percorrida pelo componente fabricado na ausência de defeito

Como se pode observar, pela Figura 4.4, a única variação que ocorreu foi a diminuição constante da pressão em cerca de 0,02 psi. Neste caso, isto poderá acontecer porque o componente não é 100% estanque. No entanto, a variação da pressão não é considerável para ser classificado como um obstáculo ao ensaio. Desta forma, após a realização dos defeitos, foi realizado novamente o teste, estando os resultados apresentados na Figura 4.5.

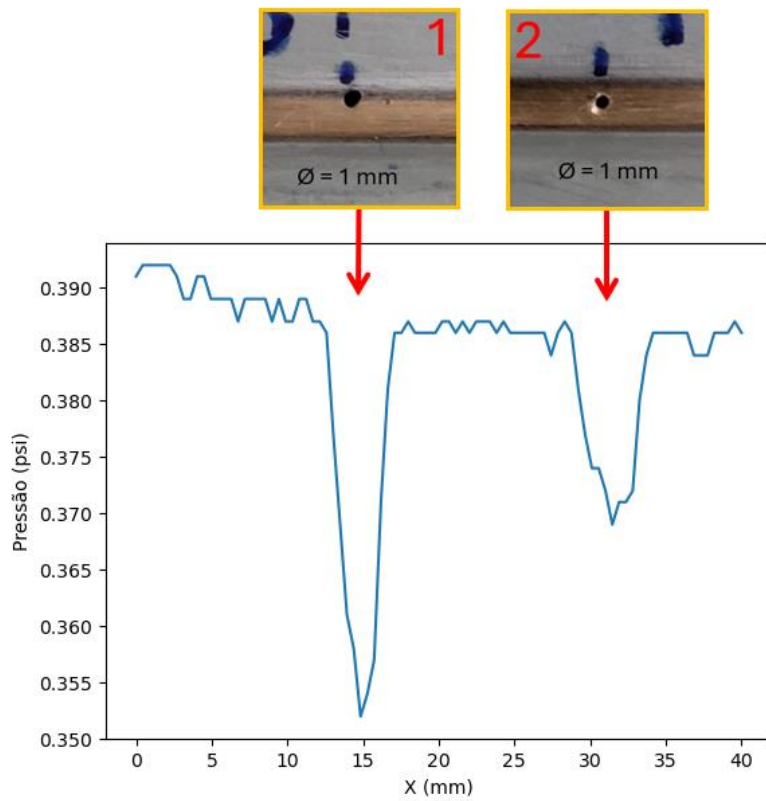


Figura 4.5 - Resultados experimentais da pressão em função da distância percorrida pelo componente fabricado na presença de defeito

Como se pode observar, os defeitos foram detetados, havendo variações consideráveis da pressão em relação ao ruído na presença de defeitos. Na Figura 4.6 está ainda representada a comparação entre os dois gráficos.

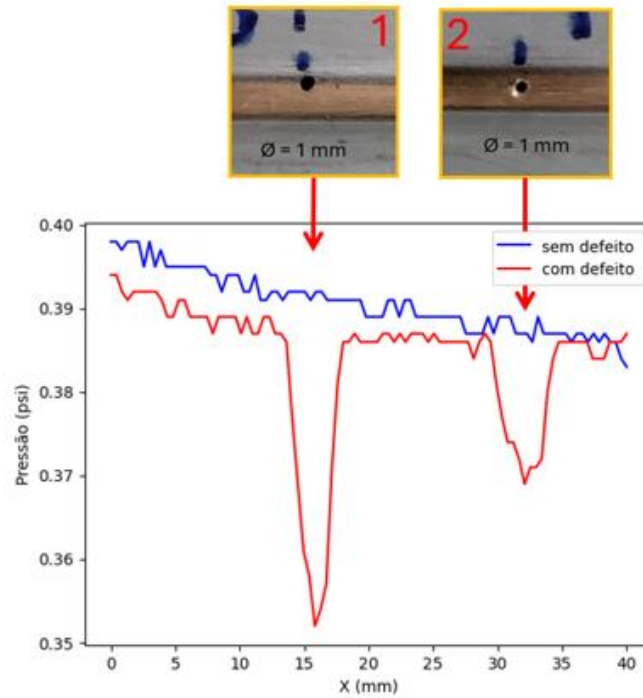


Figura 4.6 – Comparação dos resultados da variação de pressão no cordão com e sem defeito

4.2.2 Ensaio de Monitorização de Pressão na extremidade do cordão

Uma vez que não houve problemas aparentes na deteção de qualquer defeito com este método ao longo do cordão, realizou-se um ensaio na extremidade do cordão. Neste caso, o teste que se efetuou foi ligeiramente diferente. Não sendo possível detetar zonas com e sem defeito da mesma forma que o ensaio anterior, por não ser uma superfície contínua, optou-se por efetuar um ensaio no próprio ponto sem movimentação do componente acoplante. Pelo que, neste caso, foi necessário fazer um ensaio com defeito e um sem defeito para que se pudesse comparar valores ao invés de comparar as zonas com e sem defeito como efetuado anteriormente.

Para o ensaio da extremidade do cordão com defeito foi efetuado um defeito artificial passante como pode ser observado na Figura 4.7.

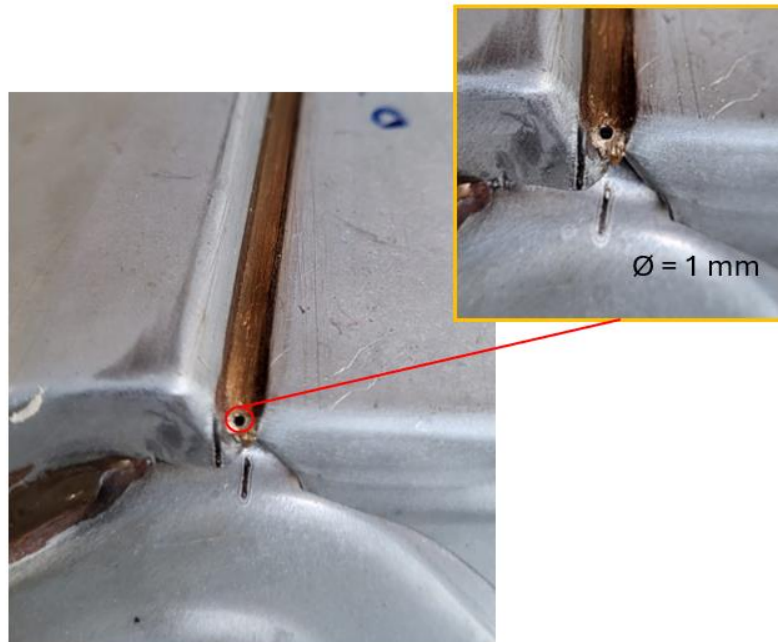


Figura 4.7 – Defeito artificial passante na extremidade do cordão LH TRAS

Desta forma, os resultados sem e com defeito estão representados na Figura 4.8.

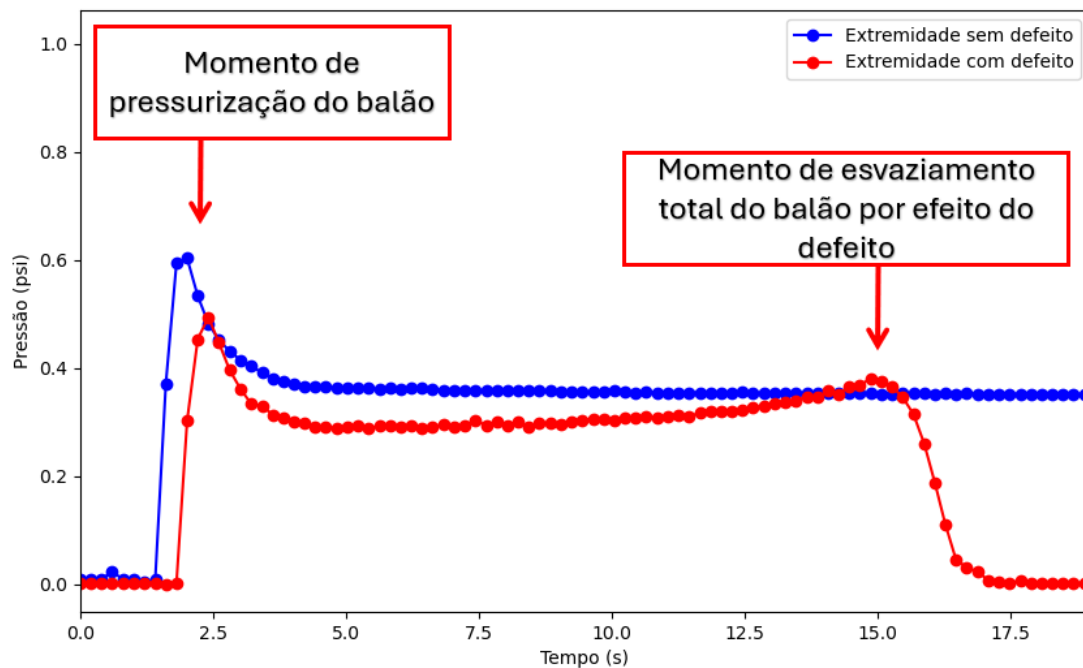


Figura 4.8 – Resultados experimentais da pressão em função do tempo, na extremidade do cordão

Na presença de defeito, consegue-se perceber que os valores da pressão não são constantes ao longo do tempo após a sua estabilização. Ao invés, estes aumentam continuamente até ao momento em que o balão esvazia por completo, o que é o comportamento típico do esvaziamento de um balão.

4.2.3 Uso do Braço robótico para Monitorização de Pressão ao longo do Cordão

Foi testada a possibilidade de automatização do movimento de monitorização de pressão de forma a testar a possibilidade de industrialização deste processo END. Para isso, foi utilizado um braço robótico (universal robot UR 10e) para colocar o componente fabricado sob o componente de teste, como se pode observar na Figura 4.9, bem como a respetiva legenda.

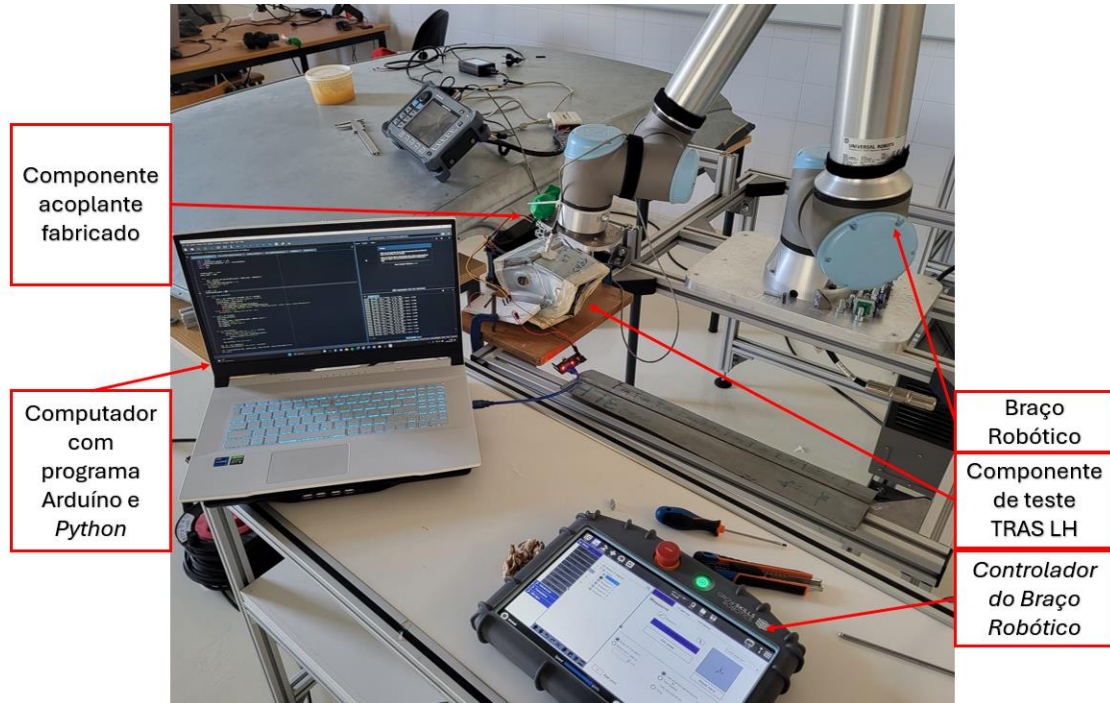


Figura 4.9 – Montagem Experimental para testar a automatização do processo de Monitorização de Pressão

Para prender o componente fabricado ao robô foi impresso em resina uma nova versão do componente, com uma alteração que permite ligar o mesmo a um perfil extrusão de alumínio 30 x 30 mm, que está representado na Figura 4.10, também com a respetiva legenda.

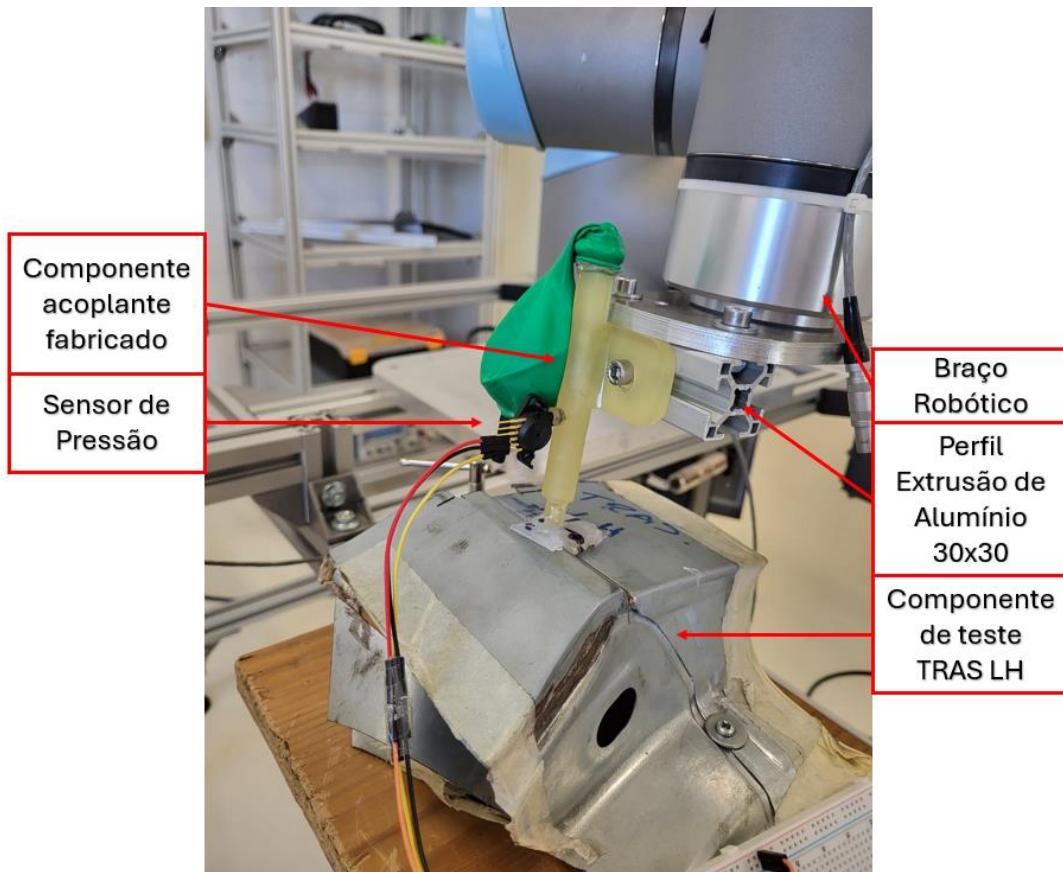


Figura 4.10 – Montagem do componente acoplante fabricado ao robô

Foi criado um programa para o robô, com deslocamento linear de 5 m/s para testar os defeitos artificiais produzidos no componente TRAS LH. O programa foi corrido uma vez no sentido positivo do eixo x que está representado na Figura 4.3 a vermelho, e logo de seguida uma segunda vez em sentido negativo desse mesmo eixo. No gráfico representado na Figura 4.11, está o resultado inerente a este ensaio, com a respetiva numeração dos defeitos 1 e 2 e a divisão entre movimentos representada pela linha a tracejado. Os defeitos foram detetados mais uma vez sem qualquer problema.

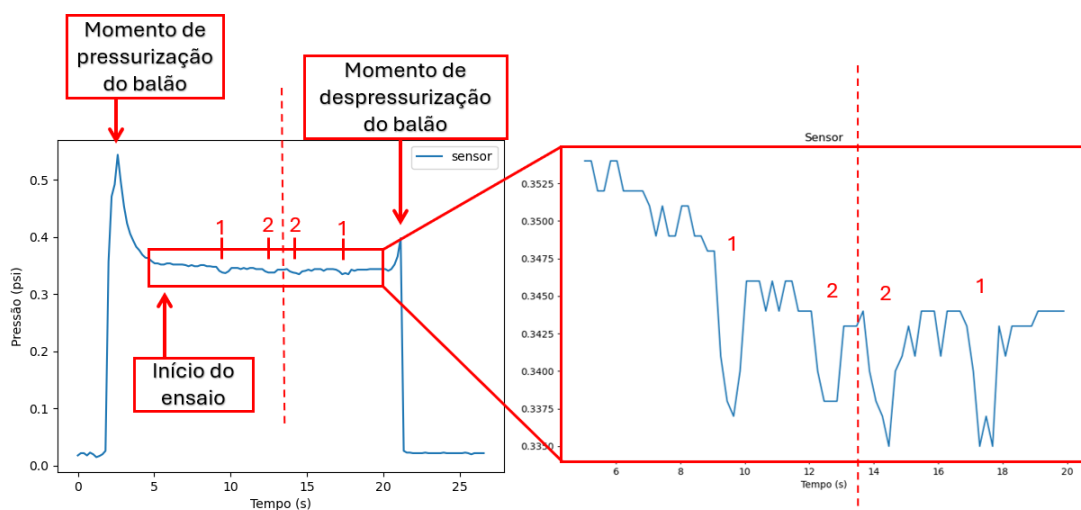


Figura 4.11 - Resultados experimentais da pressão em função do tempo ao longo do cordão com o braço robótico

4.2.4 Uso do Braço robótico para Monitorização de Pressão na Extremidade do Cordão

Foi realizado um teste para avaliar se o braço robótico (universal robot UR 10e) também seria viável para a inspeção de extremidades. No entanto, neste caso, é um pouco mais difícil de avaliar se o componente é estanque, uma vez que não é possível saber ao certo onde é que a força está a ser aplicada ao contrário do que ocorre no teste manual. Dessa forma, fez-se o ensaio por comparação ao manual através da sobreposição de gráficos. Isto porque caso o balão esvazie muito mais rápido é devido à existência de saídas de ar indesejadas. Os resultados estão apresentados na Figura 4.12, onde se pode averiguar que o tempo de esvaziamento do balão foi bastante semelhante com um ligeiro desfasamento no início.

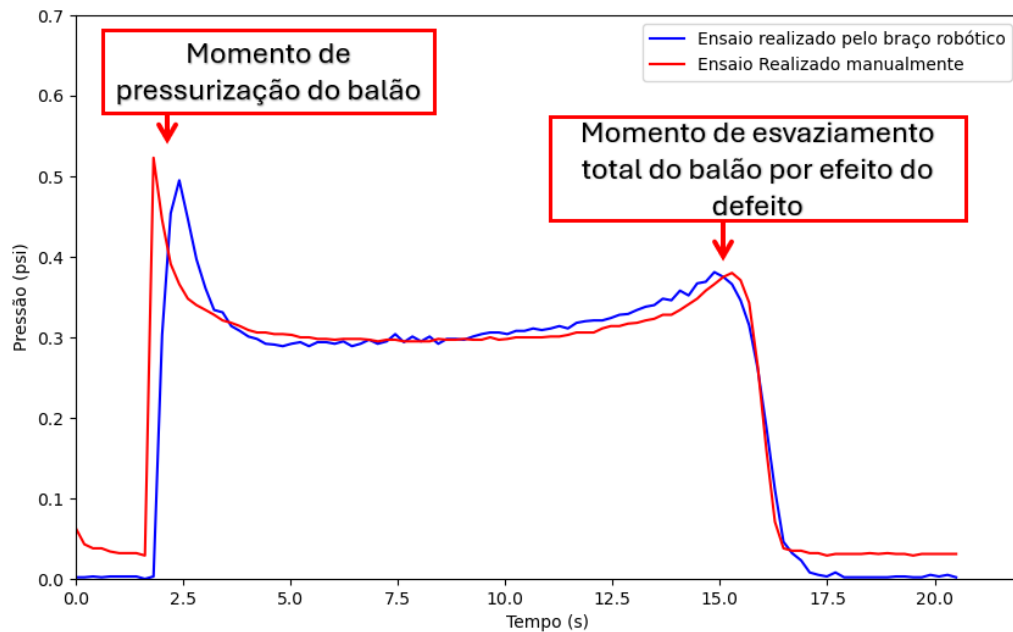


Figura 4.12 – Gráfico de comparação de ensaios realizados à extremidade do cordão com e sem o braço robótico

4.3 Validação Experimental das Sondas de CI

Pretende-se com esta dissertação testar um novo método de utilização pontual de sondas de CI. Neste caso, uma vez determinadas as bobinas a serem utilizadas e constituída a sua estrutura de suporte, foi necessária primeiro uma validação de cada uma destas bobinas, ou seja, se podiam ser utilizadas para este tipo de aplicação. Para este efeito, foi criada uma montagem experimental que utiliza um braço robótico (universal robot UR 10e), pois este permite ajustar a posição de cada uma das sondas em relação ao cordão, através da criação de diferentes programas. A montagem referida encontra-se na Figura 4.13.

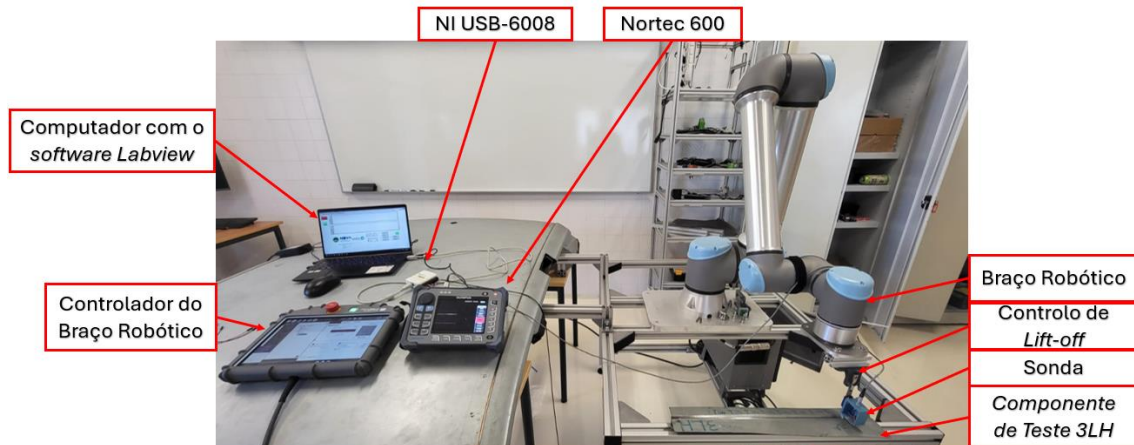


Figura 4.13 – Montagem experimental para testagem de sondas de Correntes Induzidas

As sondas utilizadas foram as apresentadas com a respetiva numeração da Tabela 4 sem o defeito padrão como ilustrado na Figura 3.17.

4.3.1 Inspeção de um cordão de SBL com as sondas produzidas

Foi necessário testar cada uma das sondas, uma vez que apesar das bobinas já serem comercializadas, não há registos do seu uso em cordões de soldadura. Para isso, foi utilizado um pedaço de cordão de SBL já com 7 defeitos artificiais realizados com diferentes orientações em [41], denominado de 3LH, e que se encontra nas Figura 4.14 e Figura 4.15 com os defeitos ampliados. Foram realizados ensaios que serviram para perceber quais das sondas escolhidas e produzidas poderiam detetar defeitos num cordão de SBL e a que frequências.

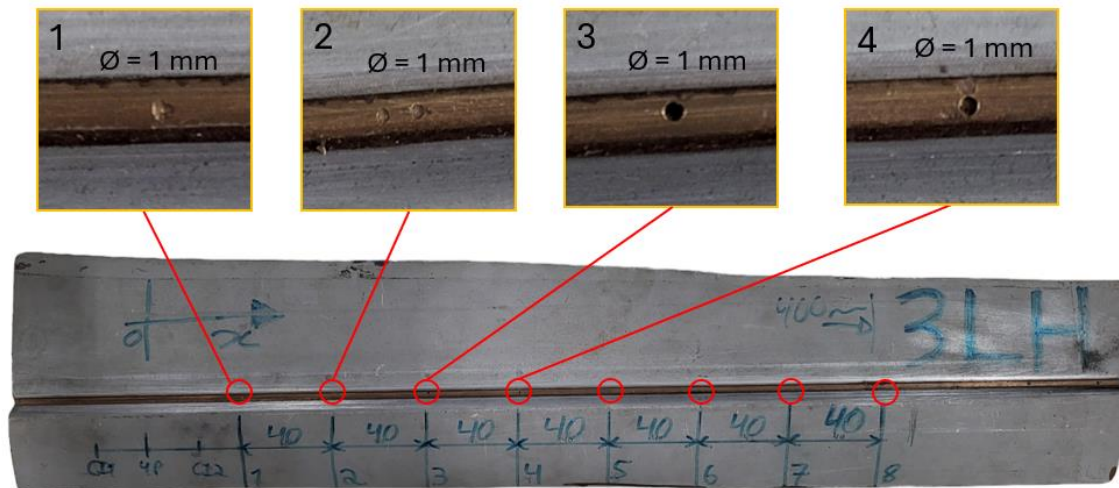


Figura 4.14 – Defeitos artificiais no componente de teste 3LH do 1 ao 4

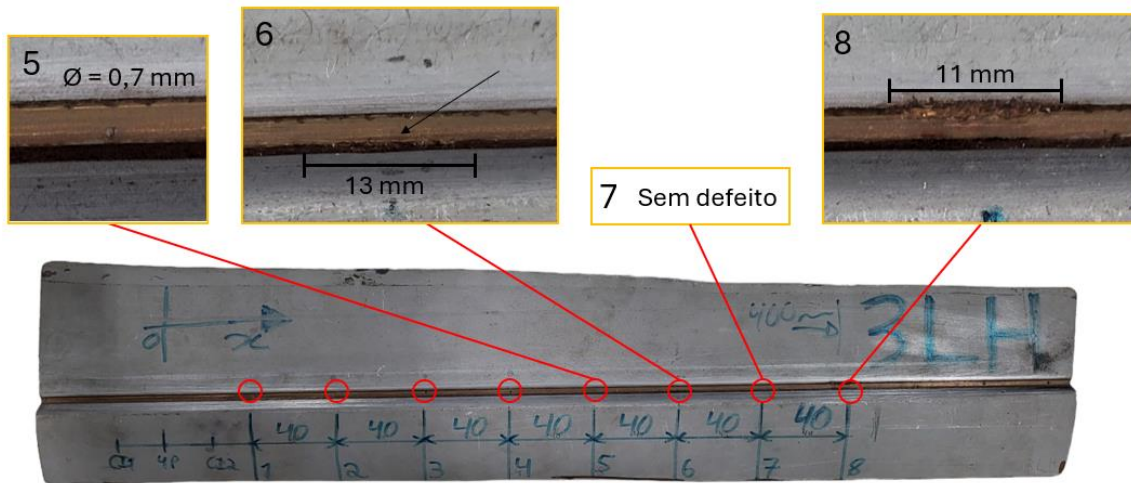


Figura 4.15 – Defeitos artificiais no componente de teste 3LH do 5 ao 8

Para além disso, foi adicionado um defeito extra abaixo da superfície, representado na Figura 4.16, para testar a utilidade das sondas na deteção de defeitos em profundidade.

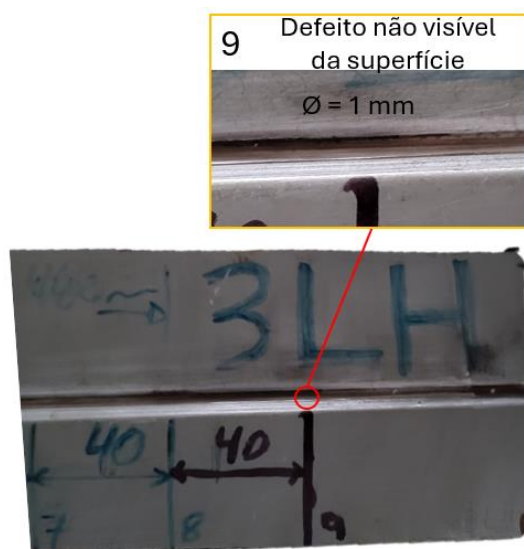


Figura 4.16 - Defeito artificial extra no componente de teste 3LH 9

A colocação das bobinas no cordão de soldadura foi efetuada na sua forma mais conveniente, ou seja, com a sua superfície maior paralela ao cordão, como está representado na Figura 4.17, com a) e b) sendo as vistas frontal e superior, respetivamente. A colocação foi feita assim, para que a zona soldada ficasse virada para cima de forma que os fios não afetassem os testes.

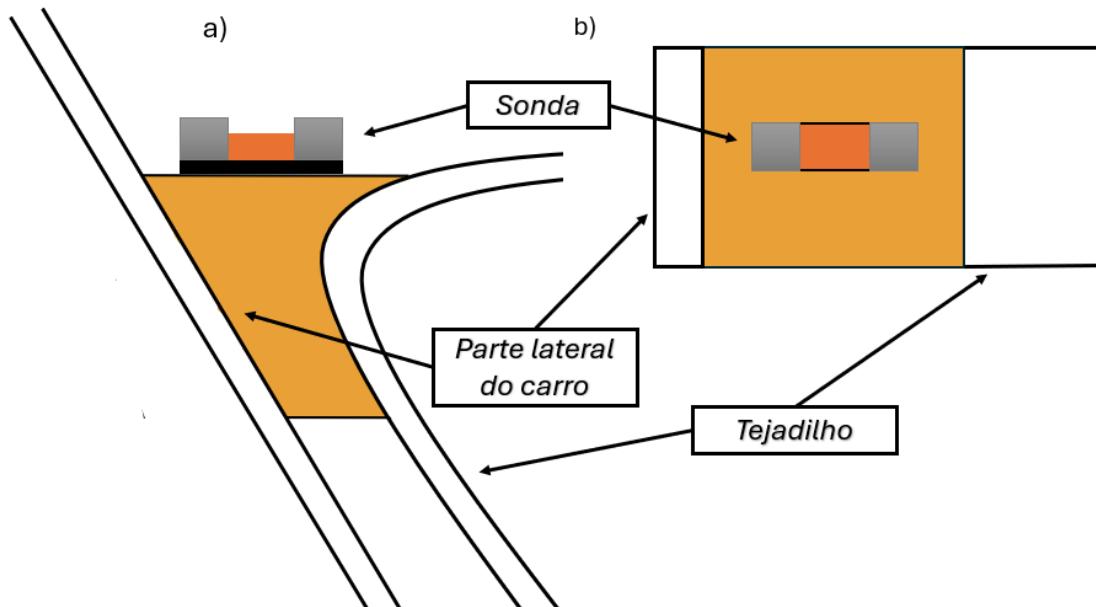


Figura 4.17 – Posicionamento da bobina sob o cordão de soldadura durante o ensaio
a) Vista frontal, b) vista de cima

Foram então testadas as bobinas de 1 a 6 nas frequências 100 kHz, 500 kHz e 1000 kHz.

Nas Figura 4.18 e Figura 4.19 encontram-se os resultados relativos à sonda 4 para os 8 defeitos nas frequências de 500 e 1000 kHz, respetivamente.

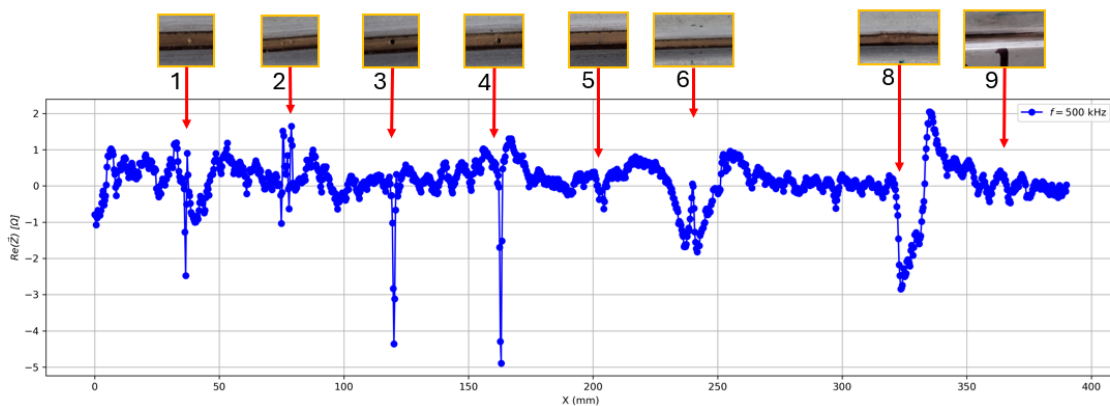


Figura 4.18 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz

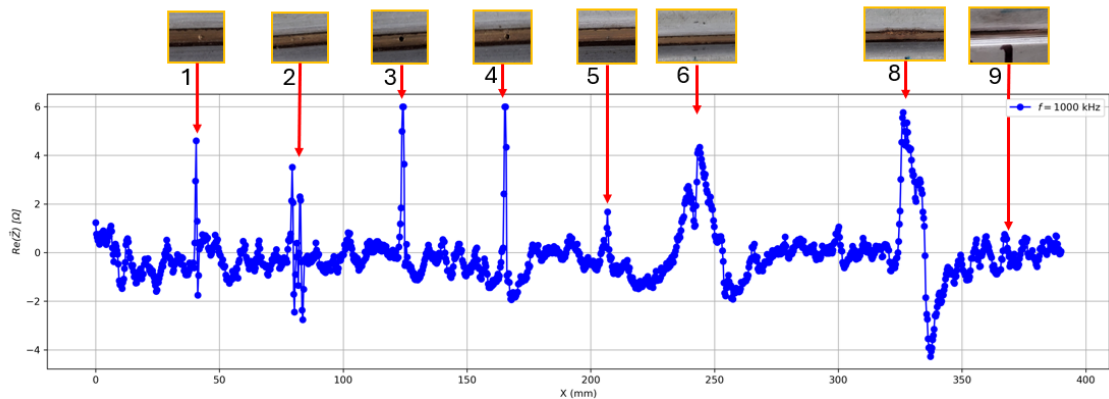


Figura 4.19 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz

É de notar que esta sonda produziu os melhores resultados, na medida em que foi possível detetar qualquer defeito com a exceção do defeito 9. O defeito 5, foi ligeiramente evidenciado a uma frequência de 1000 kHz, e é necessário salientar que esta foi a única sonda que mostrou variações para este defeito. Adicionalmente, não foi possível detetar qualquer defeito a 100 kHz.

Das restantes sondas salienta-se ainda a sonda 2 que, para uma frequência de 100 kHz, foi a única que apresentou uma pequena variação para o defeito 9, apesar de, mais uma vez, não ser uma variação tão clara que em circunstâncias de desconhecimento de defeito não possa ser confundido com ruído. Isto está representado pelo gráfico da Figura 4.20.

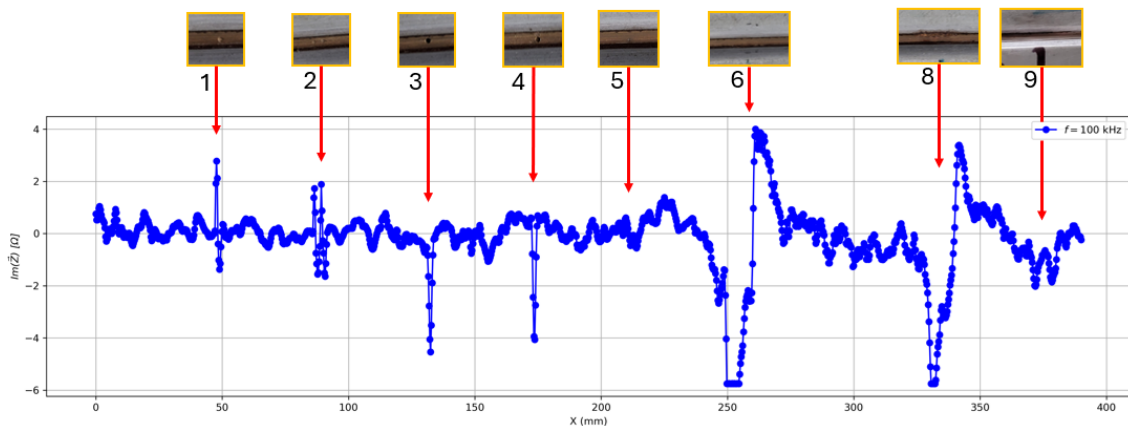


Figura 4.20 - Resultado experimental da sonda 2 a 100 kHz

Relativamente às restantes sondas, a sonda 1 não apresenta bons resultados em nenhuma das frequências devido à elevada quantidade de ruído que impede que os defeitos, na ausência do conhecimento da sua posição, sejam detetados de forma clara. Neste caso, foi possível detetar apenas de forma clara os defeitos 3, 4, 6 e 8 para as frequências de 500 e 1000 kHz e 8 para a frequência de 100 kHz.

Para as sondas 3 e 4, cujas características gerais são bastante semelhantes entre si, não foi possível detetar quaisquer variações na presença de defeitos na frequência de 100 kHz.

Por fim, foram testadas as sondas 5 e 6. No entanto, não foi possível obter qualquer respostas entre as frequências de 100 kHz a 12 MHz.

Os gráficos relativos aos restantes ensaios mencionados, mas não apresentados aqui estão presentes no Apêndice 3.

Apesar das sondas, com exceção da primeira, fornecerem resultados bastante idênticos a nível dos defeitos, ou seja, clara precissão dos defeitos 1 a 4, 6 e 8, é de notar que a sonda 4 foi a única capaz de detetar uma variação um pouco mais clara do defeito 5 dando a entender que poderia existir um problema naquele trecho do cordão.

De forma a tentar melhorar os resultados obtidos pela sonda 4 foi utilizado um pedaço de cordão de SBL como material padrão para tentar reduzir ainda mais o ruído em relação à detecção de defeitos. Desta forma, montou-se o material padrão na sonda como ilustra a Figura 3.16.

Foi testada novamente a sonda 4 para as frequências de 500 e 1000 kHz e na Figura 4.21 e Figura 4.22 encontram-se os resultados relativos à frequência de 500 e 1000 kHz, respetivamente. Não se obteve novamente resposta para a frequência de 100 kHz.

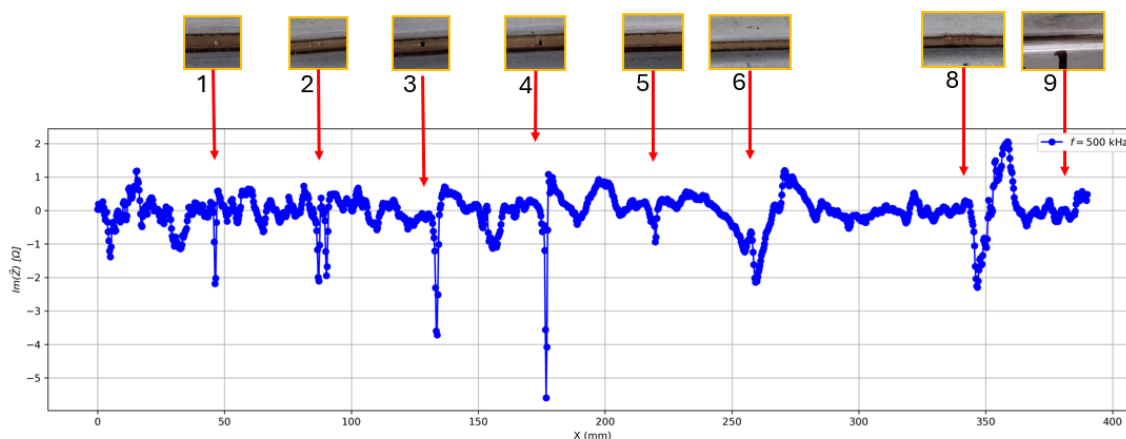


Figura 4.21 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz com material padrão de referência

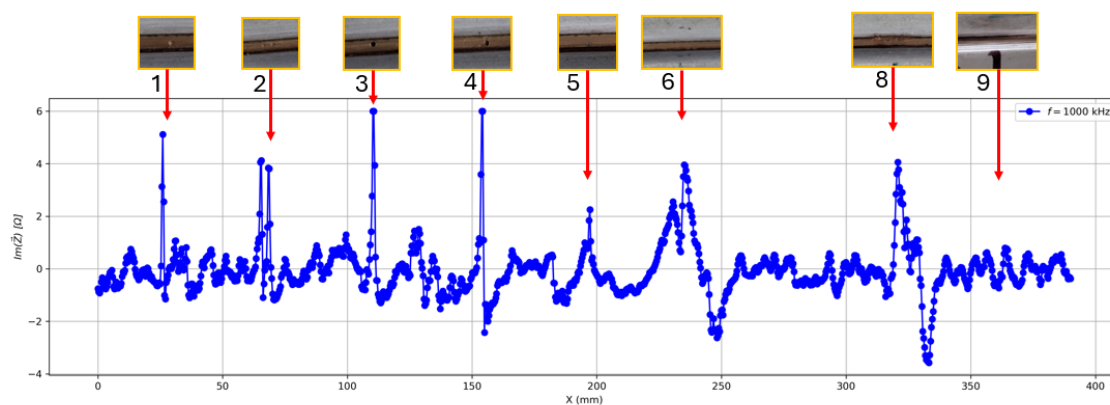


Figura 4.22 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz com material padrão de referência

Os resultados foram bastante semelhantes aos anteriores não havendo muita discrepância.

Uma questão abordada foi ainda o facto de a sonda, apesar de ter sido colocada na sua forma mais conveniente, poderá não ter sido a sua forma mais eficiente. Isto acontece porque a sua colocação como está apresentada na Figura 4.17, faz com que os enrolamentos das bobinas

fiquem colocados de forma que a indução do campo magnético primário fique paralelo à superfície do cordão, o que poderá diminuir drasticamente as correntes induzidas no material de teste. Desta forma, para testar se haveria diferença, a sonda foi novamente testada nas frequências de 500 e 1000 kHz, no componente 3LH, no entanto com o posicionamento que se encontra na Figura 4.23 com vista frontal e de cima em a) e b), respetivamente.

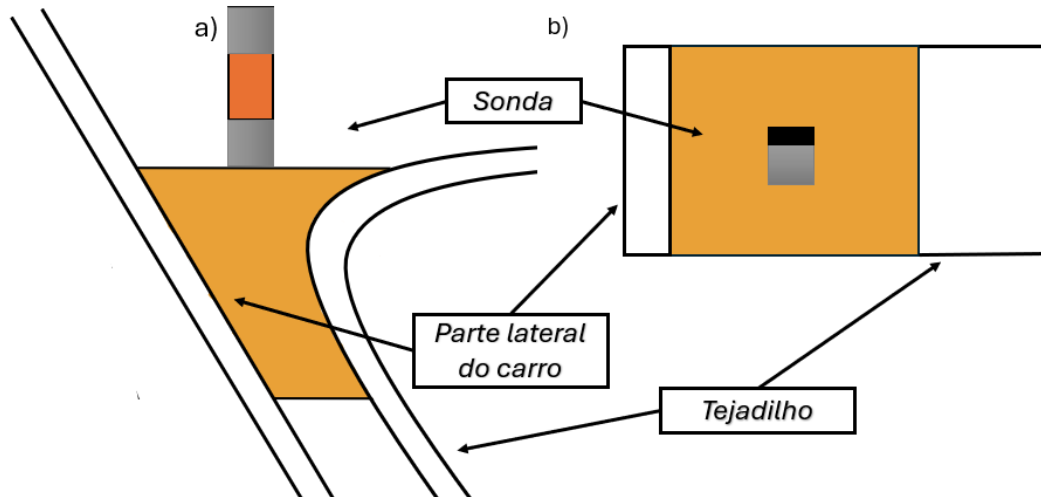


Figura 4.23 - Posicionamento da bobina sob o cordão de soldadura durante o ensaio
a) Vista frontal, b) vista de cima

Os resultados estão apresentados nas Figura 4.24 e Figura 4.25.

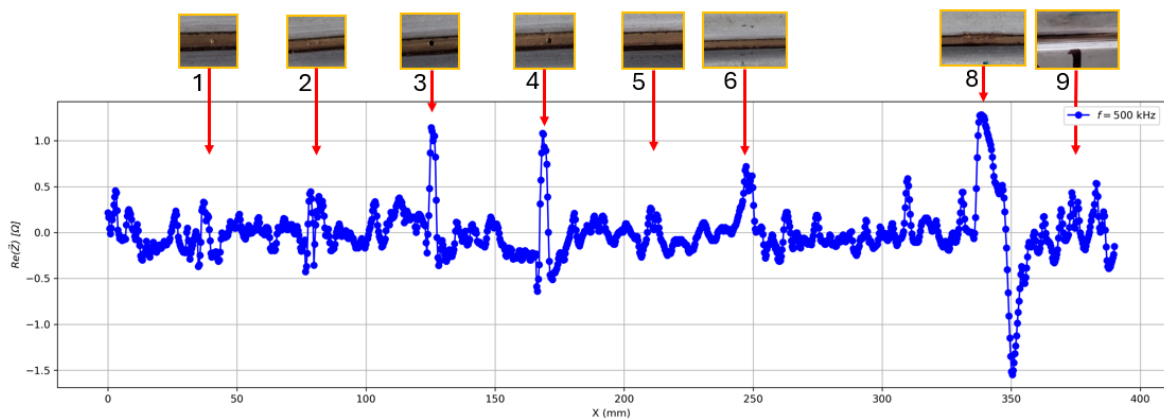


Figura 4.24 - Resultado experimental da sonda 4 a 500 kHz numa nova posição

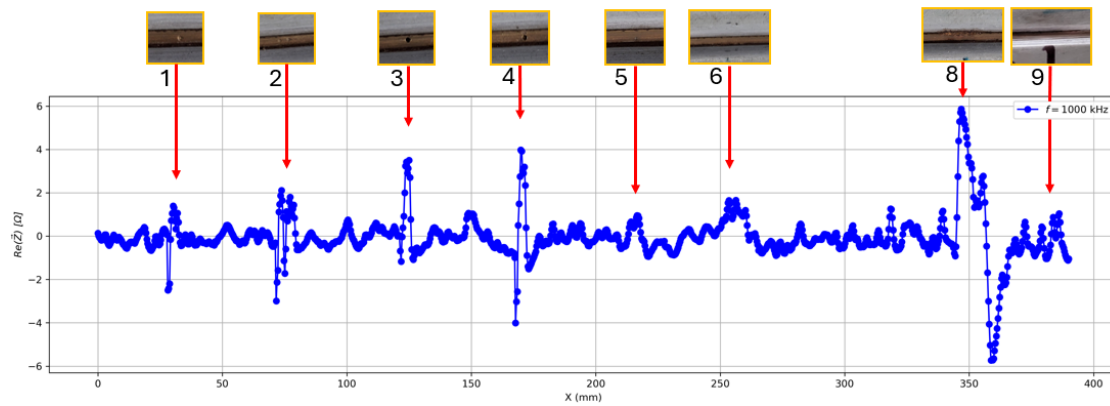


Figura 4.25 - Resultado experimental da sonda 4 a 1000 kHz numa nova posição

Os resultados permitiram concluir que o posicionamento novo da sonda não afetou positivamente a deteção de defeitos ao contrário do previsto.

4.3.2 Testagem de um novo método de inspeção a partir da leitura pontual da impedância

Uma vez que no ensaio anterior a sonda que mostrou melhores valores foi a sonda 4, esta foi utilizada daqui em diante para os testes restantes. Este ensaio tem por objetivo testar a capacidade de avaliar cordões através de um novo método de medição da impedância de forma pontual, que funciona da seguinte forma:

- 1º Colocar a sonda em cima do cordão de SBL sem defeitos;
- 2º Colocar a sonda em cima do cordão de SBL com defeito;
- 3º Colocar novamente a sonda em cima de uma outra zona do cordão de SBL sem defeitos;
- 4º Averiguar se a impedância da primeira e da terceira etapa são idênticas e se difere muito do valor da segunda etapa.

Desta forma, foram realizados dois testes no cordão de SBL 3LH, utilizado no ensaio anterior, de forma a testar este novo método. Para ambos, foi utilizado um pedaço do cordão sem defeito para a 1ª e 3ª etapa. A principal diferença entre os testes ocorreu na 2ª etapa: no primeiro teste, foi utilizado o pedaço 7, que não apresentava defeito. Isto serviu para perceber se ao testar duas partes sem defeito do mesmo cordão a impedância seria parecida e se quando comparado a um teste com defeito se haveria uma grande diferença. Por outro lado, no segundo teste foi testado o mesmo procedimento, no entanto para o defeito 4.

Sendo assim, na Figura 4.26, pode-se observar os resultados inerentes ao primeiro teste e na Figura 4.27 pode-se observar os resultados inerentes ao teste com o ponto com o defeito 4, ambas a 1 MHz. Cada teste foi feito duas vezes seguidas de forma a certificar que não havia nenhuma imprecisão nos valores iniciais.

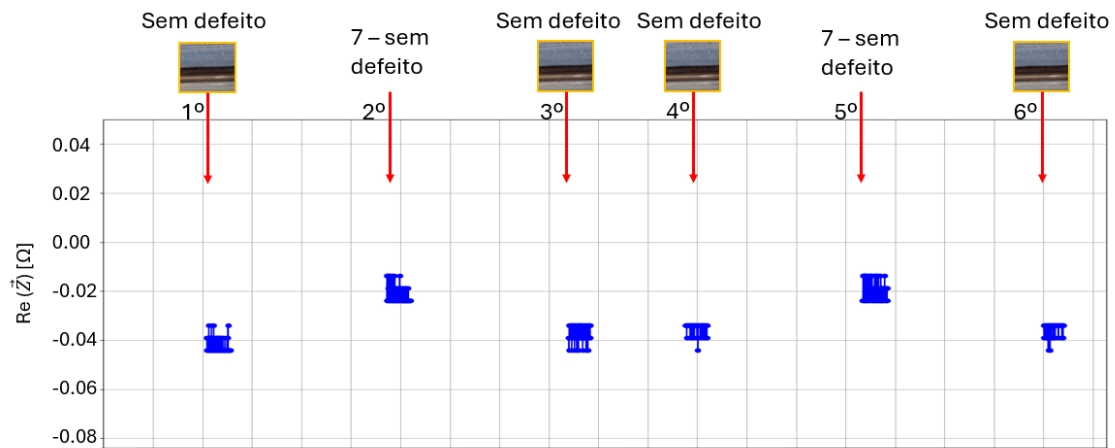


Figura 4.26 – Resultados experimentais da sonda 4 pelo método de medição pontual da impedância, para duas zonas sem defeito

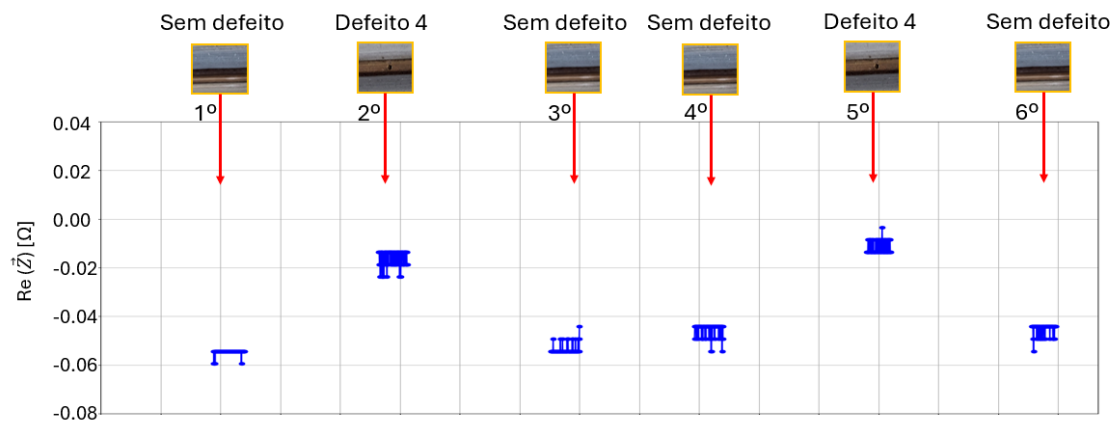


Figura 4.27 - Resultados experimentais da sonda 4 pelo método de medição pontual da impedância, para uma zona sem defeito e uma zona com defeito

Como se pode observar, tanto na ausência como na presença de defeito no cordão, existe uma diferença de impedância para a zona padrão, no entanto, a variação é maior no ensaio com defeito relativamente ao sem defeito, o que pode significar algo positivo neste método.

4.4 Discussão de Resultados

O objetivo principal desta dissertação foi o desenvolvimento de um sistema de testagem de extremidades de cordões de SBL através da utilização de dois processos END distintos: Monitorização de Pressão e Correntes Induzidas. Ao longo do capítulo 4 são analisados e descritos estes mesmos processos, bem como são apresentados os resultados inerentes a cada um dos ensaios. Desta forma esta secção encontra-se dividida numa interpretação dos resultados para os dois métodos.

4.4.1 Medição da Pressão

Nesta secção, discutem-se os resultados obtidos pela aplicação do método de testagem não destrutivo por averiguação de variações de pressão, especificamente voltado para a avaliação da presença de defeitos em extremidades de cordões de Soldadura em juntas Brasadas a Laser.

A abordagem inicial escolhida foi a realização manual dos ensaios, devido ao facto deste método de testagem ser ainda novo e nunca ter sido testado. Dessa forma, era necessário avaliar se o resultado seria o esperado ou não, antes de se proceder a toda uma montagem num braço robótico para uso industrial.

Os resultados obtidos para o ensaio manual foram considerados bons, tanto ao longo do cordão como também para a extremidade do mesmo, na medida em que os defeitos realizados artificialmente foram detetados da forma esperada. Isto vai de acordo àquilo que se pretendia averiguar, uma vez que o ponto fulcral desta dissertação é averiguar a possibilidade de detetar defeitos nas extremidades de cordões. É, contudo, ainda de notar, que os defeitos realizados no cordão são de 1 mm, pelo que para defeitos menores, a sua deteção poderá ser não tão viável.

Numa fase posterior, após a verificação de que os resultados para o ensaio manual eram os esperados, foram efetuados os mesmos ensaios com recurso a um braço robótico, de forma a avaliar a possibilidade de realizá-los industrialmente. Os valores obtidos da variação da pressão aquando da existência de defeito mostraram que é possível a utilização do braço robótico de forma prática, sem muitos problemas de estancagem. Isto demonstra a possibilidade de avaliação da extremidade do cordão em ambiente industrial, no entanto, para garantir que é útil, seria necessário avaliar vários exemplares para perceber como se poderia melhorar o componente de acoplamento para satisfazer essa necessidade.

A utilização do braço robótico apresentou algumas limitações que podem ser melhor avaliadas em desenvolvimentos futuros. Nomeadamente, o facto de que sempre que o robô se liga, alterar ligeiramente a sua posição, fazendo com que a realização do ensaio possa ser comprometida sempre que é necessário ligar e desligar o robô. Outra melhoria que poderá ser implementada no protótipo em si, passa pela utilização de molas a fazer força na cola para baixo de forma que o protótipo fique no ângulo certo e ajude o sistema a ficar estanque, especial com uso robótico.

4.4.2 Correntes Induzidas

Os ensaios experimentais realizados para o método das correntes induzidas tinham como finalidade testar e validar novas sondas e novos métodos de deteção de defeitos superficiais e sub-superficiais em cordões de SBL. A análise dos resultados obtidos permite avaliar a eficácia dos métodos propostos e identificar as limitações e potencialidades de cada técnica.

Um ponto importante nesta fase da dissertação foi a escolha do tipo de sonda mais apropriada. Dessa forma, foi feita uma pesquisa bibliográfica e consultadas várias referências, tendo acabado por se utilizar sondas em ponte, devido às suas características vantajosas tal como é referido em [50]. Estas são sondas que tanto podem funcionar como sondas de acionamento como também de captação, funcionando no modo diferencial. Isto permite melhorar a adaptabilidade das sondas para necessidades específicas. Adicionalmente este tipo de sondas permite detetar defeitos a partir de variações que ocorram no campo magnético, através da medição de desequilíbrios entre bobinas ligadas por ponte, que permite uma maior sensibilidade para pequenas variações no material.

Após a construção bem-sucedida das sondas, os resultados indicaram que a sonda 4 apresenta um melhor potencial para avaliação da existência de defeitos em cordões de soldadura. Isto acontece apesar desta sonda não apresentar grandes diferenças para com as sondas de 1 a 3. Uma potencial causa deste efeito poderá ter sido o método de soldadura utilizado não ter sido o

mais apropriado. Para além disso, podemos afirmar que os resultados obtidos com a utilização desta sonda se apresentaram os mesmos com ou sem a utilização de material padrão. Este achado vai contra aquilo que seria o expectável uma vez que a utilização do material padrão serviria para que os campos magnéticos criados em cada uma das bobinas fossem idênticos e se anulassem na ausência de defeito, reduzindo drasticamente o ruído.

Adicionalmente, foi testada a possibilidade da utilização das sondas numa nova posição, de forma que os enrolamentos da bobina ficassem paralelos à superfície do cordão. Esta nova abordagem permite que os mesmos fiquem colocados de forma que a indução do campo magnético primário fique perpendicular à superfície do cordão, o que por sua vez, poderá aumentar as correntes induzidas no material de teste. Os resultados obtidos neste ensaio permitiram concluir que não existiu alteração positiva na capacidade de deteção de defeitos ao contrário do que seria expectável.

Em comparação com outras fontes bibliográficas que desenvolvem o mesmo tema, os resultados mostraram-se mais satisfatórios em relação aos obtidos por Machado et al [41]. com a utilização do mesmo componente de teste, 3LH. Nessa dissertação, são utilizadas sondas com um longo período de produção e que são mais dispendiosas e que apesar de terem um melhor sinal em relação ao ruído alguns defeitos não chegam sequer a ser detetados. Este facto vem provar que a utilização de sondas já comercializadas, como as utilizadas nestes ensaios, é vantajosa, uma vez que permite obter melhores resultados, utilizando material menos dispendioso. Sendo que o objetivo deste método é ser aplicado a larga escala na indústria, a utilização de componentes mais acessíveis torna a implementação deste tipo de sistema de testagem mais possível, e, portanto, deve ser futuramente explorado em maior profundidade.

Um outro aspeto importante que foi explorado inicialmente para esta dissertação foram os SMD revestidos por ferrite em contrapartida com os usados neste documento que foram não revestidos. A ferrite é utilizada, geralmente, de forma que a bobina não esteja sujeita a campos magnéticos exteriores. No entanto, esta pode inadvertidamente bloquear os campos magnéticos gerados pela própria bobina, impedindo que os mesmos alcancem o material. Desta forma, o *shield* vai ter o efeito oposto. Assim, os resultados obtidos não foram apelativos no sentido em que a deteção de defeitos era inconstante para o mesmo teste. Para além disso, a sensibilidade destas bobinas era praticamente inexistente no sentido em que praticamente não detetava variações aquando da presença e ausência de peças metálicas.

Em relação ao novo método testado de leitura de impedância pontual com o objetivo de posteriormente se testar em extremidades de cordões, os resultados apresentaram a possibilidade de testagem com este método se se considerar que a variação da impedância foi significativamente maior para uma zona com defeitos em relação a uma zona sem defeitos.

4.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foram conduzidos ensaios experimentais para validar as técnicas propostas para a deteção de defeitos em cordões de SBL. Inicialmente, o método de monitorização de pressão foi testado para avaliar a sua capacidade de identificar defeitos passantes ao longo do comprimento e nas extremidades dos cordões de soldadura. Os resultados indicaram que a metodologia é eficaz na deteção de defeitos, com a pressão variando significativamente na presença de falhas, validando assim a abordagem adotada.

Posteriormente, foram realizados ensaios utilizando sondas de CI para investigar a capacidade de deteção de defeitos à superfície ou perto desta, em diferentes frequências e posicionamentos. A análise dos resultados permitiu identificar as sondas que apresentaram melhor desempenho, destacando a sonda 4 como a mais eficaz na deteção de defeitos ao longo do cordão de soldadura. Esta foi, de seguida, utilizada para realizar e testar uma nova abordagem de medição pontual da impedância. Contudo, a abordagem revelou limitações na consistência dos valores de

impedância, sugerindo que este método pode não ser totalmente fiável para a deteção precisa de defeitos, especialmente em zonas críticas como as extremidades do cordão.

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

Esta dissertação investigou métodos inovadores de END para a detecção de defeitos em soldadura por SBL, com foco na monitorização de pressão e na aplicação de CI. Iniciou-se com uma revisão do estado da arte, seguida pela definição dos objetivos que nortearam a investigação. O trabalho experimental consistiu na conceção e validação de um protótipo para monitorização de pressão e na avaliação de sondas de CI, tendo como meta a detecção precisa de defeitos, especialmente nas extremidades dos cordões de soldadura.

A investigação confirmou a viabilidade do método de monitorização de pressão para a detecção de defeitos passantes, tanto ao longo do cordão de soldadura como nas suas extremidades, demonstrando-se uma técnica eficaz e com potencial para aplicações industriais. Foram ainda realizados ensaios com recurso a um braço robótico, que provaram a possibilidade de utilização futura deste método de forma automatizada. No entanto, é de notar que o ensaio apenas foi realizado para um exemplar, devido à disponibilidade limitada de componentes, o que limita significativamente os resultados. Para validar plenamente este processo, será necessário utilizar o protótipo em múltiplos cantos equivalentes de diferentes cordões de soldadura, assegurando a consistência dos resultados em diversas condições.

Adicionalmente considera-se que um estudo seria necessário para adaptar o sistema a ambientes industriais, permitindo a repetibilidade e precisão necessárias em larga escala.

Os ensaios com as sondas de CI evidenciaram a capacidade de detecção de defeitos superficiais, especialmente com a sonda 4. Para além disso, os testes para validar as sondas foram realizados num cordão com defeitos artificiais já efetuados noutra estudo, e os resultados mostraram a potencialidade destas sondas mais baratas obterem melhores resultados que as sondas utilizadas nesse estudo com maior tempo de produção.

Por fim, foi testada uma nova metodologia de leitura pontual da impedância com o objetivo de criar um método do uso de CI que possibilitasse a detecção de defeitos em extremidades de cordões. Este mostrou-se promissor se se considerar que a variação da impedância que ocorreu no ensaio com defeito foi bastante superior à variação que ocorreu no sem defeito. No entanto, teria de ser testada de forma mais aprofundada para avaliar a sua aplicabilidade prática em cenários industriais, onde a precisão é fundamental.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Para os desenvolvimentos futuros, recomenda-se a testagem do componente acoplante desenvolvido noutros cordões de SBL equivalentes para viabilizar a estanquidade aquando da testagem do protótipo em diferentes geometrias de extremidades. Posteriormente, a automatização do método de monitorização de pressão surge como um passo essencial caso o objetivo seja a sua integração e aplicação em escala industrial. Neste caso um passo importante seria a contínua pressurização do componente.

Para além disso, propõe-se a otimização das sondas de CI através, por exemplo, da utilização de outros métodos de soldadura uma vez que pode ter sido um dos fatores limitativos nesta dissertação atendendo ao tamanho das mesmas. Isto tendo em vista melhorar a estabilidade das leituras de impedância e reduzir o ruído, tornando a detecção de defeitos mais fiável, especialmente em extremidades de cordões de soldadura. Seria também benéfico, não só expandir os ensaios para incluir uma maior variedade de cordões e defeitos, a fim de validar as técnicas em diferentes condições operacionais e materiais, como também testar as várias sondas em posições que coloquem as espiras das bobinas em paralelo com o cordão.

Finalmente, a combinação dos métodos de monitorização de pressão com as técnicas de CI poderia oferecer uma abordagem mais robusta para a detecção de defeitos, maximizando as vantagens de ambas as técnicas e proporcionando uma solução mais abrangente para a inspeção de cordões de soldadura por SBL na indústria automóvel.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Machado MA, Rosado LFSG, Mendes NAM, Miranda RMM, dos Santos TJG. New directions for inline inspection of automobile laser welds using non-destructive testing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2022;118:1183–95. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08007-0>.
- [2] Wang W, Cai Y, Wang H-P, Carlson BE, Poss M. Quality inspection scheme for automotive laser braze joints n.d. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04779-8>/Published.
- [3] Oliveira JP, Zeng Z. Laser welding. *Metals (Basel)* 2019;9. <https://doi.org/10.3390/met9010069>.
- [4] Yuserny MY, Aiman MH, Quazi MM, Ishak M, Shamini J. Viability of the Novel Process of Indirect Laser Brazing. vol. 51. n.d.
- [5] Cui L, Chen B, Qian W, He D, Chen L. Microstructures and mechanical properties of dissimilar Al/steel butt joints produced by autogenous laser keyhole welding. *Metals (Basel)* 2017;7. <https://doi.org/10.3390/met7110492>.
- [6] Wang J, Fu X, Zhang L, Zhang Z, Liu J, Chen S. A short review on laser welding/brazing of aluminum alloy to steel n.d. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06607-4>/Published.
- [7] Krishnaja D, Cheepu M, Venkateswarlu D. A Review of Research Progress on Dissimilar Laser Weld-Brazing of Automotive Applications. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 330, Institute of Physics Publishing; 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012073>.
- [8] Ungers M, Fecker D, Frank S, Donst D, Märgner V, Abels P, et al. In-situ quality monitoring during laser brazing. *Phys Procedia*, vol. 5, Elsevier B.V.; 2010, p. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.077>.
- [9] LARSSON J. Laser development at Volvo | Laser Focus World n.d. <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216429/laser-development-at-volvo> (accessed January 26, 2024).
- [10] Dwivedi SK, Vishwakarma M, Soni PA. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Mater Today Proc* 2018;5:3690–8. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.620>.
- [11] Cheng L, Mi G, Li S, Wang C, Hu X. Defects diagnosis in laser brazing using near-infrared signals based on empirical mode decomposition. *Opt Laser Technol* 2018;100:12–20. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.050>.
- [12] Huang W, Kovacevic R. Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012;63:235–48. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3902-0>.
- [13] Hua S, Li B, Shu L, Jiang P, Cheng S. Defect detection method using laser vision with model-based segmentation for laser brazing welds on car body

- surface. *Measurement* (Lond) 2021;178. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109370>.
- [14] Xu F, Li X, Shi Y, Li L, Wang W, He L, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review. *Micromachines* (Basel) 2018;9. <https://doi.org/10.3390/mi9110580>.
- [15] Zang Y, Zhang F, Di CA, Zhu D. Advances of flexible pressure sensors toward artificial intelligence and health care applications. *Mater Horiz* 2015;2:140–56. <https://doi.org/10.1039/c4mh00147h>.
- [16] Eaton WP, Smith JH. *Micromachined pressure sensors: review and recent developments*. vol. 6. 1997.
- [17] Song P, Ma Z, Ma J, Yang L, Wei J, Zhao Y, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors. *Micromachines* (Basel) 2020;11. <https://doi.org/10.3390/mi11010056>.
- [18] Kumar SS, Pant BD. Design principles and considerations for the “ideal” silicon piezoresistive pressure sensor: A focused review. *Microsystem Technologies* 2014;20:1213–47. <https://doi.org/10.1007/s00542-014-2215-7>.
- [19] Using the Piezoresistive Effect and Measuring Pressure n.d. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18253> (accessed January 28, 2024).
- [20] Ma Z, Zhang Y, Zhang K, Deng H, Fu Q. Recent progress in flexible capacitive sensors: Structures and properties. *Nano Materials Science* 2023;5:265–77. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.11.002>.
- [21] Hua T, Xiang Z, Xia X, Li Z, Sun D, Wu Y, et al. A Sensitivity-Optimized Flexible Capacitive Pressure Sensor with Cylindrical Ladder Microstructural Dielectric Layers. *Sensors* 2023;23. <https://doi.org/10.3390/s23094323>.
- [22] Sharma A, Ojha A. *A Study on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Sensors & their Applications*. vol. 1. 5th ed., International Journal of Engineering and Advanced Technology; 2012, p. 80–6.
- [23] Mimura M, Akagi T, Kohmoto R, Fujita Y, Sato Y, Ikeda T. Measurement of vitreous humor pressure in vivo using an optic fiber pressure sensor. *Sci Rep* 2023;13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45616-z>.
- [24] Mohankumar P, Ajayan J, Yasodharan R, Devendran P, Sambasivam R. A review of micromachined sensors for automotive applications. *Measurement* (Lond) 2019;140:305–22. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.064>.
- [25] Van Volkenburg T, Ayoub D, Alemán Reyes A, Xia Z, Hamilton L. Practical Considerations for Laser-Induced Graphene Pressure Sensors Used in Marine Applications. *Sensors* 2023;23. <https://doi.org/10.3390/s23229044>.
- [26] Pandey M, Tatiya S, Bhattacharya S, Singh S. Sensors in the Joining and Welding Process in Automobile Manufacturing. *Energy, Environment, and Sustainability*, Springer Nature; 2019, p. 241–56. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3290-6_13.

- [27] Stewart M. Piping standards, codes, and recommended practices. *Surface Production Operations*, Elsevier; 2016, p. 17–158. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-808-2.00002-x>.
- [28] Papavinasam S. Monitoring – External Corrosion. *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*, Elsevier; 2014, p. 715–50. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397022-0.00011-x>.
- [29] Stewart M. Pressure testing and nondestructive examination. *Surface Production Operations*, Elsevier; 2016, p. 885–96. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-808-2.00012-2>.
- [30] Moonens M, Wyart E, De Baere D, Hinderdael M, Ertveldt J, Jardon Z, et al. On the influence of capillary-based structural health monitoring on fatigue crack initiation and propagation in straight lugs. *Materials* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12182965>.
- [31] Judelyn L. Patero. Electromagnetic Induction: Unraveling Faraday’s Laws and Their Applications in Generators and Transformers. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology* 2023;814–9. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-12376>.
- [32] Sophian A, Taylor D, Rudlin J, Tian G. Electromagnetic and eddy current NDT: A review. vol. 43. 2001.
- [33] García-Martín J, Gómez-Gil J, Vázquez-Sánchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors* 2011;11:2525–65. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- [34] Nondestructive Evaluation Physics: Electricity n.d. <https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/capacitance.xhtml> (accessed January 7, 2024).
- [35] Cheng W. Interpretation of Impedance in the Light of Energy Dissipation and Eddy Current Nondestructive Evaluation of Pipe Wall Thickness. *IEEE Trans Instrum Meas* 2022;71. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3147310>.
- [36] Bhagi P. *Eddy Current Testing: Basics*. 2011.
- [37] Machado MA, Rosado LS, Santos TG. Shaping Eddy Currents for Non-Destructive Testing Using Additive Manufactured Magnetic Substrates. *J Nondestr Eval* 2022;41. <https://doi.org/10.1007/S10921-022-00882-1>.
- [38] Faraj MA, Samsuri F, Abdalla AN, Rifai D, Ali K, Al-Douri Y. Investigate the effect of lift-off on eddy current signal for carbon steel plate. *MATEC Web of Conferences*, vol. 225, EDP Sciences; 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822506005>.
- [39] Rosado L. *Non-Destructive Testing Based on Eddy Currents - Detector de Falhas em Soldaduras*. 2009.
- [40] Eddy Current Inspection Method. *NONDESTRUCTIVE INSPECTION METHODS, BASIC THEORY*, ndtsUPPLY; 2016, p. 4.1-4.118.
- [41] Machado M. *Development of Non-Destructive Testing by Eddy Currents for Highly Demanding Engineering Applications*. 2018.
- [42] Ditchburn RJ, Burke SK. Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection. *NDT & E International* 2005;38:690–700. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.001>.

- [43] Machado MA, Rosado LS, Mendes NM, Miranda RM, Santos TG. Multisensor inspection of laser-brazed joints in the automotive industry. *Sensors* 2021;21. <https://doi.org/10.3390/s21217335>.
- [44] Nakano S, Nakazawa T, Matsumoto Y, Otsuki E. Power loss analysis of SMD power inductors. 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE; 2011, p. 1687–91. <https://doi.org/10.1109/APEC.2011.5744822>.
- [45] Lu Y, Bowler JR, Theodoulidis TP. An analytical model of a ferrite-cored inductor used as an eddy current probe. *J Appl Phys* 2012;111. <https://doi.org/10.1063/1.4716189>.
- [46] Sollier T, Buvat F, Pichenot G, Prémel D. EDDY CURRENT MODELING OF FERRITE-CORE PROBES, APPLICATION TO THE SIMULATION OF EDDY CURRENT SIGNALS FROM SURFACE BREAKING FLAWS IN AUSTENITIC STEEL. n.d.
- [47] Barrancos A, Batalha RL, Rosado LS. Towards Enhanced Eddy Current Testing Array Probes Scalability for Powder Bed Fusion Layer-Wise Imaging. *Sensors* 2023;23:2711. <https://doi.org/10.3390/s23052711>.
- [48] Yun E-J, Kim J-W, Han Y-O, Kim H-C, Jung M-H, Park NK. Development and characteristics of solenoid-type SMD RF chip inductors. *Current Applied Physics* 2010;10:962–6. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.11.081>.
- [49] Krishnaja D, Cheepu M, Venkateswarlu D. A Review of Research Progress on Dissimilar Laser Weld-Brazing of Automotive Applications. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;330:012073. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012073>.
- [50] Machado MA. Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review. *Sensors* 2024;24:5819. <https://doi.org/10.3390/s24175819>.

Apêndice 1. Código Arduino (C)

```
const int pressureInput = A3;
const int pressureZero = 40.96;
const int pressureMax = 983.04;
const int pressuretransducermaxKPA = 10;
const int baudRate = 9600;
const int sensorreadDelay = 200;
float pressureValue = 0;
void setup() {
  Serial.begin(baudRate);
}
void loop() {
  pressureValue = analogRead(pressureInput);
  pressureValue = ((pressureValue - pressureZero) * pressuretransducermaxKPA) /
(pressureMax - pressureZero) * 0.145;
  float timeInSeconds = micros() / 1e6;
  Serial.print(timeInSeconds);
  Serial.print(",");
  Serial.println(pressureValue, 3);
  delay(sensorreadDelay);
}
```

Apêndice 2. Código de *Python* para o teste da Monitorização de Pressão

```
import serial
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.animation import FuncAnimation
import time
import sys
arduino_port = 'COM4'
baud_rate = 9600
try:
    ser = serial.Serial(arduino_port, baud_rate, timeout=1)
    time.sleep(2)
except serial.SerialException as e:
    print(f"Error: {e}")
    sys.exit()
x_vals = []
sensorValue_data = []
def read_from_arduino():
    try:
        line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
        print(f"Debug: Raw line from Arduino: {line}")
        sensorValues = line.split(',')
        if len(sensorValues) == 2:
            x_vals.append(float(sensorValues[0]))
            sensorValue_data.append(float(sensorValues[1]))
            print(f"Debug: Appended values - Time: {sensorValues[0]}, Sensor Value:
{sensorValues[1]}")
    except Exception as e:
        print(f"Error reading from serial: {e}")
def update_plot(frame):
    read_from_arduino()
    plt.cla()
    plt.plot(x_vals, sensorValue_data, label='sensor')
    plt.xlabel('Tempo (s)')
```

```
plt.ylabel('Pressão (psi)')
plt.legend()
def on_close(event):
    with open('arduino_data.txt', 'w') as txtfile:
        txtfile.write('time\tsensor\n')
        for x, s1 in zip(x_vals, sensorValue_data):
            txtfile.write(f'{x}\t{s1}\n')
    ser.close()
    fig.savefig('final_plot.png')
fig, ax = plt.subplots()
fig.canvas.mpl_connect('close_event', on_close)
ani = FuncAnimation(fig, update_plot, interval=100, cache_frame_data=False)
plt.show()
```

Apêndice 3. Gráficos de resultados dos testes das Correntes Induzidas no cordão de SBL com sondas produzidas com SMD

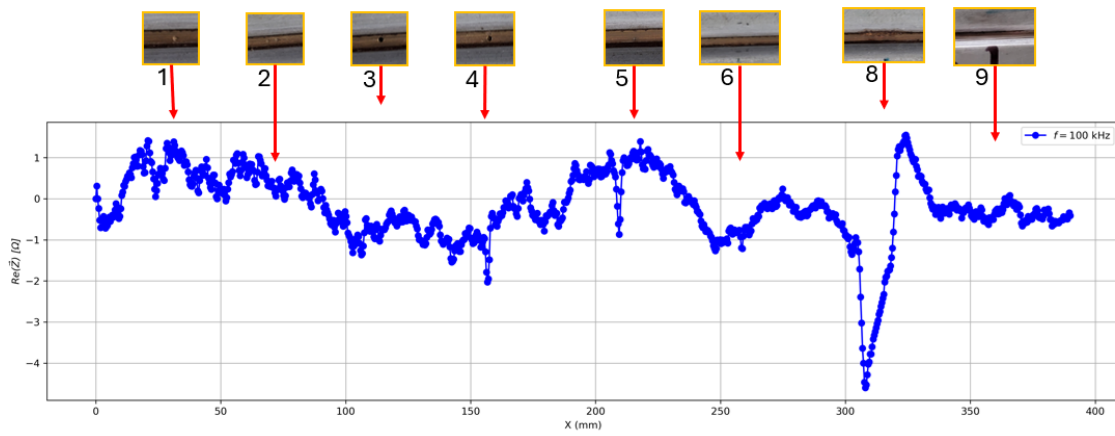


Figura A 1 - Resultado experimental da sonda 1 a 100 kHz

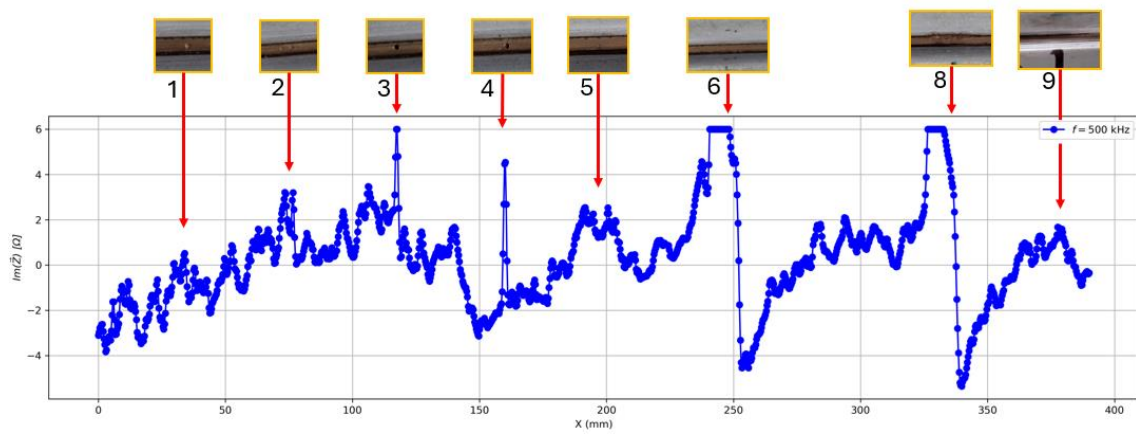


Figura A 2 - Resultado experimental da sonda 1 a 500 kHz

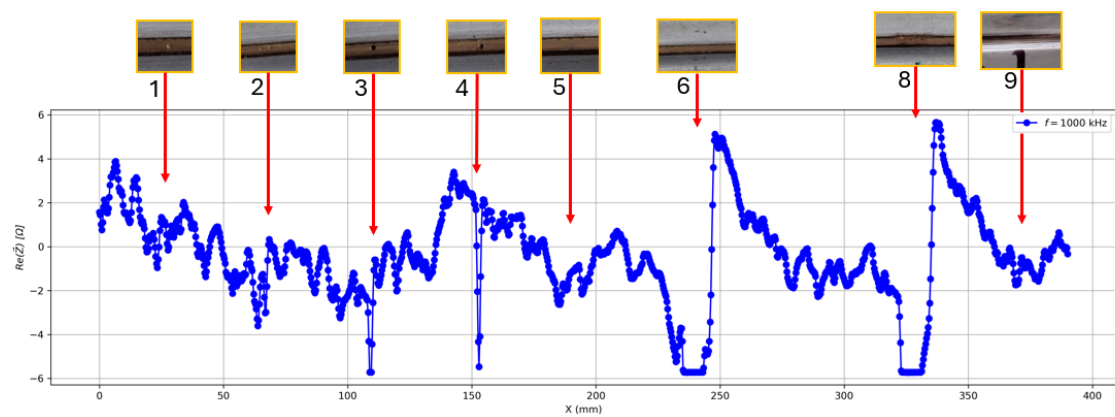


Figura A 3 - Resultado experimental da sonda 1 a 1000 kHz

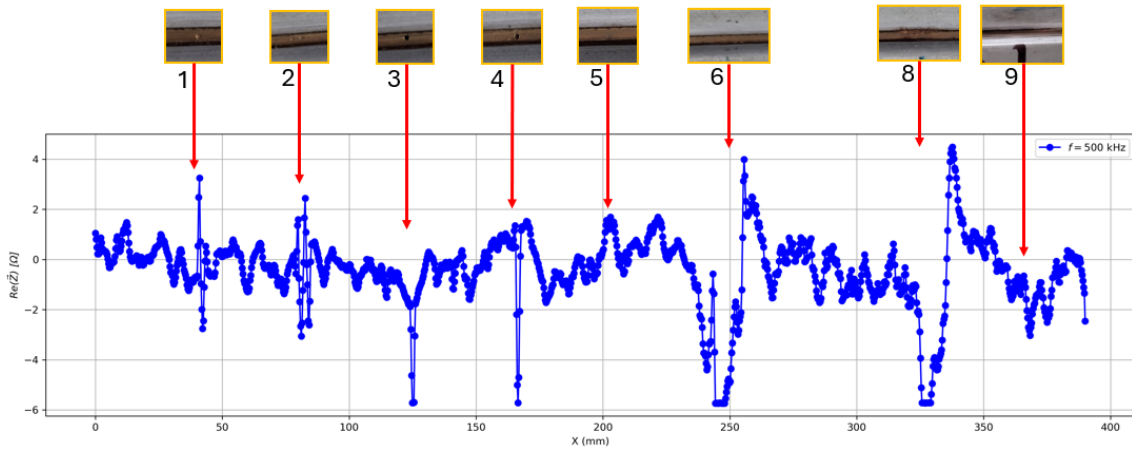


Figura A 4 - Resultado experimental da sonda 2 a 500 kHz

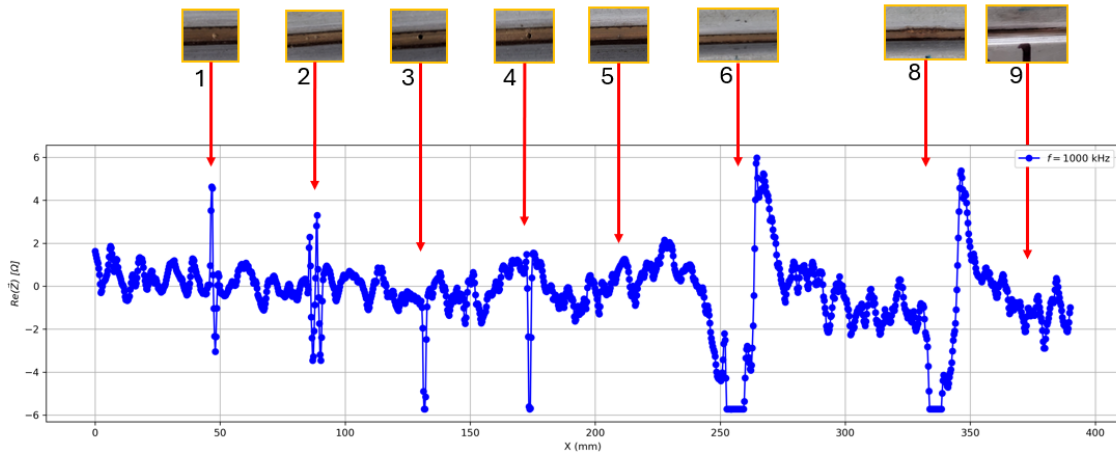


Figura A 5 - Resultado experimental da sonda 2 a 1000 kHz

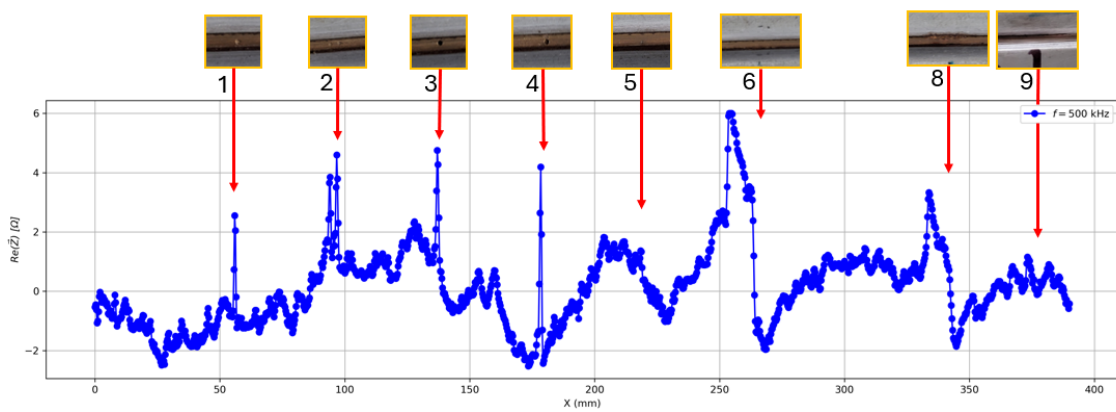


Figura A 6 - Resultado experimental da sonda 3 a 500 kHz

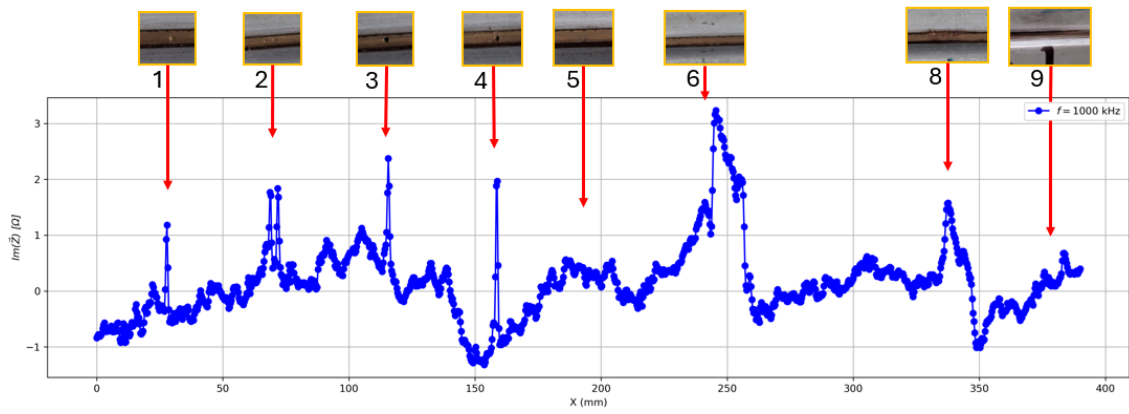
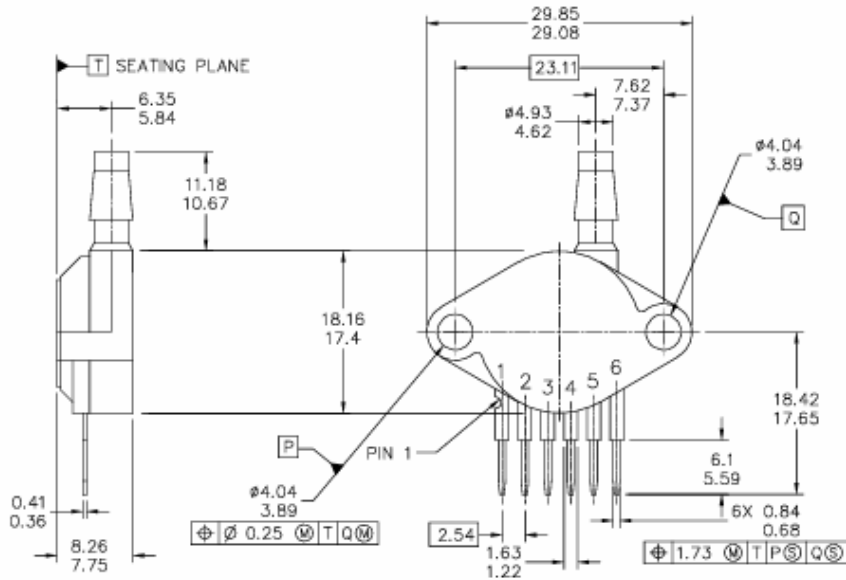


Figura A 7 - Resultado experimental da sonda 3 a 1000 kHz

Anexo 1. Ficha Técnica do Sensor de Pressão

Pressure

PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.		MECHANICAL OUTLINE		PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B		DOCUMENT NO: 98ASB42796B		REV: G	
		CASE NUMBER: 867B-04		28 JUL 2005	
		STANDARD: NON-JEDEC			

PAGE 1 OF 2

**CASE 867B-04
ISSUE G
UNIBODY PACKAGE**



PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. 867B-01 THRU -3 OBSOLETE, NEW STANDARD 867B-04.

STYLE 1:

- PIN 1: V OUT
 2: GROUND
 3: VCC
 4: V1
 5: V2
 6: V EX

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B	DOCUMENT NO: 98ASB42796B	REV: G	
	CASE NUMBER: 867B-04	28 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 2 OF 2

**CASE 867B-04
 ISSUE G
 UNIBODY PACKAGE**

Anexo 2. Características de operação do sensor MPX5010GP

Pressure

Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P1 > P2$. Decoupling circuit shown in Figure 3 required to meet specification.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range	P_{OP}	0	—	10 1019.78	kPa mm H ₂ O
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	5.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽²⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0	0.2	0.425	Vdc
Full Scale Output ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.475	4.7	4.925	Vdc
Full Scale Span ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	4.275	4.5	4.725	Vdc
Accuracy ⁽⁵⁾	—	—	—	±5.0	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	450 4.413	—	mV/mm mV/mm H ₂ O
Response Time ⁽⁶⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁷⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁸⁾	—	—	±0.5	—	% V_{FSS}

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.
2. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
3. Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
4. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
5. Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C .
6. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
7. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
8. Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

MPX5010

