



**Francisco Xavier Vasconcelos Pereira  
Furtado de Mendonça**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Caracterização Experimental de  
Êmbolos Produzidos por Soldadura por  
Fricção Rotacional e Conceção de  
Protótipo Funcional de END**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Telmo Jorge Gomes dos Santos  
Coorientador: Prof. João Pedro Oliveira

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António José Freire Mourão  
Vogais: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado  
Eng. Paulo Jorge Pereira  
Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



Caracterização Experimental de Êmbolos Produzidos por Soldadura por Fricção Rotacional e  
Conceção de Protótipo Funcional de END

Copyright © 2018 Francisco Xavier Vasconcelos Pereira Furtado de Mendonça

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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



# AGRADECIMENTOS

Sinto-me profundamente agradecido pelos conhecimentos adquiridos no desenvolver deste trabalho, técnicos e científicos, assim como das pessoas que conheci e com quem fui contactando ao longo do mesmo.

Ao meu orientador, agradeço o seu acompanhamento constante, as críticas construtivas, o entusiasmo e vontade incessante de querer levar o estudo mais longe, com mais e melhores resultados.

Ao meu coorientador, Prof. João Oliveira, por toda a ajuda, dicas técnicas e esclarecimentos científicos ao longo da investigação.

Aos Professor Jaime Pamies Teixeira e à Professora Carla Machado pelas dúvidas esclarecidas ao longo do trabalho e pelo apoio no manuseamento de equipamentos presentes no laboratório de caracterização de materiais do DEMI da FCT.

Em especial ao Eng. Patrick Inácio, ao Eng. Miguel Machado e ao Eng. Diogo Pereira, do NOVA NDT LAB da FCT, um profundo agradecimento por se terem mostrado incansáveis no auxílio das mais variadas tarefas e pela amizade demonstrada, sem quais a realização deste trabalho não teria certamente sido possível.

A todos os colegas e monitores dos laboratórios de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT, em especial ao Sr. António Campos, ao Sr. António Magalhães e ao Ricardo Pereira, que representaram sempre uma mão invisível e preciosa para levar este trabalho a bom porto.

Aos meus amigos e colegas de curso que me acompanharam, pelos momentos de descontração e alento que me deram.

Agradeço de forma muito especial à minha namorada, pelo amor, carinho e pelo apoio emocional, e incondicional, que demonstrou ao longo dos últimos dois anos.

Por fim, gostava de agradecer a toda a minha família. Em especial ao meu pai e avô, pelas longas conversas e valores que me incutiram, na ajuda a não perder o foco nesta importante meta pessoal e académica. Também os meus irmãos, que à sua maneira também contribuíram decisivamente para a realização deste trabalho.



# RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais de engenharia e tecnologias de produção conduz a novos desafios industriais, nomeadamente, para a deteção de defeitos *inline* com recurso a ensaios não destrutivos (END) customizados. O presente trabalho decorre de um problema industrial concreto, resultante de uma instabilidade no processo de soldadura por fricção rotacional (SFR) de êmbolos em liga de alumínio, que pode levar ao colapso de alguns desses componentes em serviço. O objetivo foi a caracterização experimental das soldaduras dos provetes e o desenvolvimento de um sistema de END, baseado no fenómeno de correntes induzidas (CI), para a inspeção destes componentes.

Com vista a validar a aplicabilidade dos END por CI na inspeção dos êmbolos caracterizou-se o material processado, com recurso a microscopia ótica e medição de durezas. Foi também realizada a conceção, produção e validação experimental de um protótipo funcional de END por CI para inspeção dos êmbolos. Verificou-se que os perfis de condutividade elétrica ao longo dos provetes permitem identificar claramente a zona soldada, mediante uma redução da condutividade, em virtude da redução do tamanho de grão nessa zona. Mostrou-se que esta medição apresenta melhor repetibilidade e maior rapidez quando comparada com os perfis de dureza, e foi possível concluir que os END por CI têm potencial para distinguir condições de soldadura resultantes de diferentes parâmetros de processo.

## Palavras-chave

Soldadura por Fricção Rotacional

Ensaio Não Destrutivo

Correntes Induzidas



# ABSTRACT

The development of modern engineering materials and processing technologies leads to new challenges regarding *inline* quality check for defect detection through customized nondestructive testing (NDT). The current work arises from a specific industrial problem, regarding a process instability in rotary friction welding (RFW) of aluminum alloy pistons that may lead to the collapse of some of these components while in service. The objective was to characterize experimentally the welded pistons, and to develop a custom-made NDT system for inspection of these components, based on eddy currents (EC) technic.

In order to validate the applicability of the EC NDT in the pistons inspection, the processed material was also characterized through optical microscopy and hardness measurements. A functional prototype for pistons inspection, through EC NDT, has also been designed, manufactured and experimentally validated. It was verified that the electrical conductivity profile of the welded pistons is able to identify the welded joint, due to a reduction in the conductivity, as a result of the grain size reduction in the interface. It has also been proved that this conductivity profile has a better repeatability and is a more and faster to obtain when compared with the hardness profiles, confirming the potential of the EC NDT technique to distinguish the quality of welds for different process parameters.

## Keywords

Rotary Friction Welding

Non Destructive Testing

Eddy Currents



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÍNDICE .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xix
NOMENCLATURA .....	xxi
1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 – Motivação .....	1
1.2 – Objetivos Científicos e Tecnológicos .....	3
1.3 – Trabalho Desenvolvido .....	3
1.4 – Estrutura da Dissertação .....	4
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....	7
2.1 – Introdução .....	7
2.2 – Tecnologias de Processamento no Estado Sólido .....	7
2.3 – Soldadura por Fricção .....	8
2.3.1 – Considerações Gerais e Princípio Físico .....	8
2.3.2 – Soldadura por Fricção Rotacional: Processo e Variantes .....	10
2.3.3 – Parâmetros de Processo e seus Efeitos .....	13
2.3.4 – Características da Junta Soldada .....	20
2.3.5 – Defeitos mais Comuns .....	22
2.4 – Ensaio Não Destrutivo .....	23
2.4.1 – Considerações Gerais .....	23
2.4.2 – Principais Técnicas de END .....	24
2.4.3 – Últimos Desenvolvimentos em END .....	25
2.5 – END por Correntes Induzidas .....	25
2.5.1 – Princípio de Funcionamento .....	25
2.5.2 – END por CI na Caracterização de Materiais Processados .....	28
2.6 – Síntese do Capítulo .....	31
3 – DESENVOLVIMENTO DE MEIOS LABORATORIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	33
3.1 – Introdução .....	33
3.2 – Adaptação da Mesa Automatizada .....	34
3.2.1 – Considerações Iniciais .....	34
3.2.2 – Requisitos Funcionais do Dispositivo .....	35
3.2.3 – Desenvolvimento e Produção do Dispositivo .....	36
3.2.4 – Validação Experimental .....	39
3.3 – Procedimentos Experimentais .....	40

3.3.1	– Descrição dos Provetes .....	40
3.3.2	– Identificação dos Provetes .....	41
3.3.3	– Metalografia .....	42
3.3.4	– Ensaio de Dureza de Vickers .....	44
3.3.5	– END por Correntes Induzidas .....	46
3.4	– Síntese do Capítulo.....	48
4	– DESENVOLVIMENTO, PRODUÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO FUNCIONAL DE END .....	51
4.1	– Introdução .....	51
4.2	– Requisitos Funcionais do Protótipo.....	51
4.3	– Conceção e Desenvolvimento da Componente Mecânica.....	52
4.4	– Produção do Protótipo .....	56
4.5	– Componente Eletrónica e de Controlo.....	57
4.6	– Validação Experimental.....	57
4.7	– Síntese do Capítulo.....	58
5	– RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS.....	59
5.1	– Introdução .....	59
5.2	– Análise Metalográfica.....	59
5.2.1	– Macrografias.....	59
5.2.2	– Micrografias.....	62
5.3	– Ensaio de Dureza e END por CI utilizando o Protótipo Funcional.....	73
5.4	– END por CI noutros provetes utilizando o Protótipo Funcional .....	80
5.5	– Ensaio de Dureza no Provede #7A (colapsado).....	87
5.6	– Síntese do Capítulo.....	88
6	– CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	89
6.1	– Introdução .....	89
6.2	– Conclusões e Comentários Finais .....	89
6.2.1	– Conclusões de carácter mais Científico.....	91
6.2.2	– Conclusões de carácter mais Tecnológico-Industrial .....	92
6.3	– Propostas para Desenvolvimentos Futuros.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	95
	ANEXOS .....	101

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Os três tipos de SFR: comparação do movimento (setas a amarelo) e tensão gerada (setas a preto) para os vários métodos de soldadura.....	10
Figura 2.2 – Ilustração sequencial do processo de SFR. a) Varões antes do contacto (um em rotação constante), b) Fricção entre varões atuada por uma força axial, c) Aquecimento/amaciamento e início de formação de uma rebarba, d) A rotação é desligada e a força axial incrementada, o que consolida a união.....	11
Figura 2.3 - Ilustração das variantes principais do processo de SFR num gráfico Parâmetros vs. Tempo. a) SFR por acionamento direto, b) SFR por Inércia.....	12
Figura 2.4 – Principais juntas metálicas de SFR estudadas e publicadas em artigos científicos na <i>Web of Science</i> (entre 2007-2016). a) SFR por acionamento-direto, b) SFR por inércia. ....	13
Figura 2.5 – Calor gerado ao longo do raio da secção. a) Modelo teórico, b) Modelo empírico. ....	15
Figura 2.6 – Temperaturas de interface durante a SFR normalizada relativamente à de fusão. ....	16
Figura 2.7 – Efeito da velocidade de rotação na tensão máxima de cedência em duas superligas. a) Superliga GH4169, b) Superliga Ti17.....	17
Figura 2.8 – Efeito da velocidade de rotação e da pressão axial na junta soldada. a) Variando a pressão axial, b) Variando a velocidade (menor para o maior, da esquerda para a direita). ..	18
Figura 2.9 – Tensão limite de cedência em varões soldados SFR variando a pressão de fricção e o tempo de fricção (numa superliga MA956, baseada em Fe). ....	19
Figura 2.10 – Junta soldada típica de SFR em varões. a) Em aço IN718, b) Em aço macio. ....	20
Figura 2.11 – Micrografia SEM de uma junta soldada por SFR, de uma liga de Ti, com identificação das diferentes zonas.....	21
Figura 2.12 – Diferentes zonas numa junta de SFR. i) Zona de contacto, ii) zona totalmente deformada e recristalizada, iii) Zona parcialmente deformada, iv) Zona termicamente afetada. ....	21
Figura 2.13 - Macro de uma junta de aços dissimilares, AISI4140 e AISI1050. a) Em bruto, com identificação das ZTAs, b) Em corte longitudinal. ....	22
Figura 2.14 - Princípio do método de CI ao aproximar uma sonda (bobina) de um meio condutor.....	26
Figura 2.15 – Representação do vetor Impedância (Z), [47]. a) No plano de Argand, b) No plano de resposta para diferentes materiais. ....	27
Figura 2.16 – Curvas de profundidade de penetração para diferentes ligas de Al.....	28

Figura 2.17 – Comparação da macrografia transversal de uma liga AA7075T6 processada por FSW (a 7 mm da superfície), respetivo perfil de dureza, perfil de condutividade elétrica e campo de condutividade ao longo da secção (identificando as diferentes zonas). .....	30
Figura 2.18 – Representação tridimensional da condutividade elétrica numa chapa de alumínio AA7075T6, previamente processada por <i>FSP (friction stir processing)</i> . a) Superfície processada e maquinada em rampa, b) Mapeamento da condutividade elétrica na superfície. ....	31
Figura 3.1 - Provetes #1 e #3 após corte com serra a) Provete #1 cortado em $\theta = 0^\circ$ , b) Provete #3 cortado em $\theta = 90^\circ$ . ....	43
Figura 3.2 - Exemplo de identificação dos provetes após corte e polimento com identificação das respetivas zonas de interesse a observar ao microscópio. a) Provete #3 depois do corte com serra, b) Indicação das zonas de interesse a observar. Nomenclatura: (1) zona de CS, (2) ZTMA/ ZTA à direita do CS, (3) ZTMA/ZTA à esquerda do CS, (4) MB da secção esquerda, (5) Zona 4 mm à direita do CS, (6) MB da secção direita. ....	43
Figura 3.3 - Regra usada para estabelecer a distância entre indentações. ....	45
Figura 3.4 – Distância percorrida nos ensaios de dureza (provete #3). ....	45
Figura 3.5 – Montagem laboratorial dos END por CI na mesa XYZ. ....	47
Figura 4.1 – Modelação tridimensional da solução desenvolvida, montada e com o provete a) Vista em perspetiva com indicação dos eixos de movimento; b) Vista frontal com cotas de avançamento. ....	53
Figura 4.2 – Vista tridimensional do desenho de conjunto do protótipo funcional modelado. Nomenclatura: Motor passo-a-passo de movimento longitudinal (1), braço basculante (2), guia linear para o suporte da sonda (3), tranca (4), suporte da sonda de CI (5), Motor passo-a-passo de movimento angular (6). ....	54
Figura 4.3 – Vista tridimensional em perspetiva do movimento do braço basculante. a) Braço posicionado para o ensaio, em cima do provete, b) Braço desviado para permitir a desmontagem do provete. ....	54
Figura 4.4 – Representação tridimensional semitransparente da componente móvel do protótipo. Nomenclatura: Acoplador que fixa o provete (1), motor passo de movimento rotacional (2), suporte móvel (3), encaixe deslizante para fixar o provete atrás (4), mola axial interna (5), provete (6). ....	55
Figura 4.5 – Vista tridimensional semitransparente da componente móvel do protótipo e respetivo mecanismo de fixação do provete. a) O encaixe desloca-se para trás com a pressão de dois dedos, b) Provete solto. ....	55
Figura 4.6 – Protótipo funcional produzido. a) Vista lateral com sonda montada para os ensaios, b) Vista em perspetiva com o braço basculante desviado. ....	56
Figura 4.7 – Vista de topo da arrumação dos componentes eletrónicos e DAQ. ....	57
Figura 5.1 - Macrografia do provete #1B cortado e após polimento. ....	60

Figura 5.2 - Macrografias do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ).....	60
Figura 5.3 - Macrografia do provete #3A cortado e após polimento.....	61
Figura 5.4 - Duas macrografias do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ).....	61
Figura 5.5 - Macrografia do provete #4B cortado e após polimento.....	62
Figura 5.6 - Duas macrografias do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ).....	62
Figura 5.7 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse. Nomenclatura: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA à direita do CS; 3) ZTMA e ZTA à esquerda do CS.....	64
Figura 5.8 - Micrografia do provete #3A ampliada em 50x e 100x da zona 1.....	64
Figura 5.9 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.....	65
Figura 5.10 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 2. ....	65
Figura 5.11 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.....	66
Figura 5.12 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 3. ....	66
Figura 5.13 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ), na zona da união, com identificação de zona de interesse. Nomenclatura: 4) Zona mais 3 ou 4 mm à direita do CS. ....	66
Figura 5.14 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 4.....	67
Figura 5.15 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 500x da zona 4. ....	67
Figura 5.16 - Macrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse. Nomenclatura: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA à esquerda do CS; 3) ZTMA e ZTA à direita do CS.....	67
Figura 5.17 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.....	68
Figura 5.18 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 1 .....	68
Figura 5.19 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.....	69
Figura 5.20 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 2.....	69
Figura 5.21 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.....	69
Figura 5.22 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 3.....	70
Figura 5.23 - Macrografia do provete #4B (baixo), na zona da união, com identificação de mais três zonas de interesse. Nomenclatura: 4) MB da metade esquerda; 5) ZTA da metade à direita do CS; 6) MB da metade à direita do CS. ....	70
Figura 5.24 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 4.....	70
Figura 5.25 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 4.....	71

Figura 5.26 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 5.....	71
Figura 5.27 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 5.....	71
Figura 5.28 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 6.....	72
Figura 5.29 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 500x da zona 6. ....	72
Figura 5.30 - Ensaio de CI e dureza no provete #1A ( $\theta = 180^\circ$ ). ....	73
Figura 5.31 - Ensaio de CI e dureza no provete #1A ( $\theta = 0^\circ$ ). ....	74
Figura 5.32 - Ensaio de CI e dureza no provete #1B ( $\theta = 180^\circ$ ). ....	74
Figura 5.33 - Ensaio de CI e dureza no provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ). ....	75
Figura 5.34 - Ensaio de CI e dureza no provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ). ....	75
Figura 5.35 - Ensaio de CI e dureza no provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ). ....	76
Figura 5.36 - Ensaio de CI e dureza no provete #3B ( $\theta = 90^\circ$ ). ....	76
Figura 5.37 - Ensaio de CI e dureza no provete #3B ( $\theta = 270^\circ$ ). ....	77
Figura 5.38 - Ensaio de CI e dureza no provete #4A ( $\theta = 0^\circ$ ). ....	77
Figura 5.39 - Ensaio de CI e dureza no provete #4A ( $\theta = 180^\circ$ ). ....	78
Figura 5.40 - Ensaio de CI e dureza no provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ). ....	78
Figura 5.41 - Ensaio de CI e dureza no provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ). ....	79
Figura 5.42 – Perfil de condutividade do provete #2 a uma frequência de 400 KHz e alta resolução espacial e angular. ....	80
Figura 5.43 – Perfil de condutividade em 3D do provete #2 em torno de todo o perímetro, a uma frequência de 400 KHz e alta resolução espacial e angular. ....	80
Figura 5.44 – Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 200 KHz. ....	81
Figura 5.45 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 200 KHz. ....	81
Figura 5.46 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 300 KHz. ....	82
Figura 5.47 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a uma frequência de 300 KHz. ....	82
Figura 5.48 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 1 MHz. ....	83
Figura 5.49 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a uma frequência de 1 MHz. ....	83
Figura 5.50 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 200 KHz. ....	84

Figura 5.51 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 200 KHz. ....	84
Figura 5.52 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 500 KHz. ....	85
Figura 5.53 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 500 KHz. ....	85
Figura 5.54 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 1 MHz. ....	86
Figura 5.55 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 1 MHz. ....	86
Figura 5.56 – Ensaio de dureza no provete #7A ( $\theta = 180^\circ$ ).....	87
Figura 5.57 – Ensaio de dureza no provete #7A ( $\theta = 0^\circ$ ).....	87



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Requisitos funcionais utilizados na concepção e desenvolvimento do dispositivo. .	35
Tabela 3.2 - Composição química do material. ....	40
Tabela 3.3 - Parâmetros dos ensaios de dureza realizados. ....	46
Tabela 4.1 - Requisitos funcionais do protótipo funcional de END por CI. ....	52



# NOMENCLATURA

$\vec{Z}$	Vetor impedância elétrica [ $\Omega$ ]
$f$	Frequência [Hz]
$Im(\vec{Z})$	Parte imaginária do vetor impedância elétrica [ $\Omega$ ]
$Re(\vec{Z})$	Parte real do vetor impedância elétrica [ $\Omega$ ]
$X, x$	Comprimento [m]
$\varnothing$	Diâmetro [m]
$\delta$	Profundidade de penetração das correntes induzidas [m]
$\sigma$	Condutividade elétrica [ $S \cdot m^{-1}$ ] ou [% IACS]
CI	Correntes Induzidas
CST	<i>Computer Simulation Technology</i>
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EC	<i>Eddy Currents</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FIT	<i>Finite Integration Technique</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
$H_p$	Campo magnético primário
$H_s$	Campo magnético secundário
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>

ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PMMA	Polimetacrilato de Metilo
RFT	<i>Remote Field Testing</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US	Ultra-sons

# 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – Motivação

O presente trabalho centra-se na caracterização da soldadura por fricção rotacional (SFR) de componentes cilíndricos em liga de alumínio. A SFR, em Inglês *rotary friction welding* (RFW), é uma tecnologia de ligação no estado sólido com vantagens relativamente às técnicas de soldadura por fusão. A grande particularidade desta tecnologia é a ausência de material de adição, assim como a ausência de fusão do material base, já que a união dos dois materiais é promovida pela pressão aplicada e pelo aumento de temperatura resultante do calor gerado pelo atrito entre os dois componentes a unir. A SFR tem um vasto leque de aplicações, pois o fenómeno subjacente ao processo permite a junção de metais dissimilares ou de baixa soldabilidade, como alúminios de alta resistência, ligas de titânio ou superligas de níquel impossíveis de unir com recurso às técnicas de soldadura por fusão. Outra grande vantagem deste processo é a união rápida e eficaz de componentes com geometria cilíndrica (varões ou tubos), o que permite a eliminação de flanges ou a produção de componentes ocios em metal.

Não obstante a boa qualidade das juntas soldadas por SFR, a inspeção de produtos acabados com ensaios não-destrutivos (END) pode ser indispensável neste tipo de processos, prevenindo eventuais falhas em serviço. Os END compreendem o conjunto de técnicas que permitem

inspecionar um material ou produto acabado sem prejuízo das suas funções futuras. Existe uma grande variedade de END, nomeadamente os raios-X, os líquidos penetrantes, os ultra-sons, as correntes induzidas, a termografia, entre outros.

A motivação deste trabalho decorre de um problema industrial prático: uma empresa multinacional do setor automóvel recorre ao processo de SFR para a produção de êmbolos em liga de alumínio e necessita de um técnica de END expedita e fiável para avaliar a qualidade das juntas soldadas. Os êmbolos são parte integrante de um compressor de ar-condicionado e, com vista a tornar o conjunto mais leve e eficiente, os êmbolos produzidos são ocos e obtidos pela união de duas partes cilíndricas de fundo copado com recurso à SFR. Os êmbolos são posteriormente torneados e revestidos com um revestimento de teflon™. O objetivo da empresa é proceder à inspeção dos êmbolos após o torneamento, mas antes do revestimento, tendo em vista evitar custos desnecessários.

Verificou-se que alguns desses êmbolos podem colapsar em serviço, fraturando pela junta soldada. Presume-se que haja alguma variação nos parâmetros de soldadura, possivelmente fruto de um fator de ruído ou das condições do material, da qual resultam peças com algum tipo de defeito, o que leva ao seu colapso. Nesse sentido, no âmbito deste trabalho avaliou-se a possibilidade de proceder à inspeção das soldaduras com recurso a END por correntes induzidas (CI). Com efeito, em estudos anteriores desenvolvidos no âmbito da atividade de investigação do NOVA NDT Lab<sup>1</sup> do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do DEMI da FCT NOVA, esta técnica já se mostrou adequada para a inspeção de juntas soldadas ou processadas no estado sólido, nomeadamente por *friction stir processing* (FSP) e *friction stir welding* (FSW), em ligas de alumínio [1, 2, 3, 4]. Verifica-se que a condutividade elétrica do material diminui significativamente junto aos cordões de soldadura pelo efeito do refinamento de grão nestas zonas, o que representa uma barreira à passagem de corrente. Foi um dos objetivos deste trabalho verificar se é possível detetar este fenómeno nas amostras fornecidas pela empresa, podendo posteriormente esta variação da condutividade elétrica ser correlacionada experimentalmente com boas e más soldaduras.

---

<sup>1</sup> <https://sites.fct.unl.pt/labndt-demi/>

O trabalho desenvolvido assumiu duas vertentes principais:

1) A caracterização laboratorial das amostras fornecidas pela empresa com recurso a técnicas de caracterização de material como a microscopia ótica, ensaios de dureza e END por CI. Avaliou-se assim o efeito da SFR no material e averiguou-se a existência de zonas termicamente afetadas, a microestrutura do material base, presença de precipitados, óxidos ou a presença de defeitos;

2) A conceção, desenvolvimento e produção de um protótipo de END customizado, baseado no fenómeno de CI, para inspecionar os êmbolos soldados *inline*, extraíndo o seu perfil de condutividade.

## **1.2 – Objetivos Científicos e Tecnológicos**

Pretendeu-se com este trabalho alargar os conhecimentos da comunidade científica relativamente à SFR em ligas de alumínio, perceber melhor os seus efeitos no material base, a microestrutura da junta soldada e os seus perfis de dureza e de condutividade elétrica. A caracterização de material processado por SFR com END por CI é algo ainda pouco estudado e não disponível na literatura, nomeadamente a comparação e correlação entre os resultados desta técnica não destrutiva com outras técnicas de caracterização, como microscopia e dureza.

De um ponto de vista mais tecnológico, a conceção e produção de uma solução customizada de END, automatizada, com uma componente de controlo, de aquisição de sinal e uma interface com o utilizador, foi outro grande objetivo deste trabalho. Estudou-se a aplicabilidade ao problema industrial concreto e alargou-se o âmbito de aplicações dos END por CI.

## **1.3 – Trabalho Desenvolvido**

Tendo em vista o cumprimento dos objetivos definidos, o início deste estudo passou por uma revisão bibliográfica exaustiva das tecnologias envolvidas, nomeadamente do processo de soldadura por fricção rotacional (SFR) e os END por correntes induzidas. O conhecimento destes últimos pressupôs também a aprendizagem no manuseamento e calibração de alguns

equipamentos disponíveis nos laboratórios de Tecnologia Industrial e com os quais se desenvolveu este trabalho.

Numa fase posterior tiveram de se desenvolver alguns meios laboratoriais para a correta inspeção das amostras cilíndricas recebidas. Destaca-se aqui a adaptação de uma mesa XYZ de inspeção presente em laboratório, que envolveu a conceção e produção de um dispositivo funcional para se realizarem ensaios preliminares de correntes induzidas com vista a validar o fenómeno de decaimento da condutividade elétrica na junta soldada.

Numa fase seguinte, procedeu-se ao corte de alguns provetes para estudo metalográfico. Efetuou-se o seu polimento e ataque químico para observação ao microscópio e realizaram-se ensaios de dureza para diferentes parâmetros.

Depois de realizados todos os procedimentos experimentais avaliou-se um conjunto de requisitos funcionais para a conceção de um protótipo funcional de END. Procedeu-se à sua modelação geométrica e testaram-se algumas hipóteses de configuração. Findada esta fase, produziu-se o protótipo funcional com recurso a componentes poliméricos obtidos por manufatura aditiva FDM em impressora 3D *desktop*. Implementou-se um módulo eletrónico e de controlo no protótipo, desenvolveu-se um *virtual instrument* (VI) e uma interface em *LabVIEW* para comunicação com o utilizador durante os ensaios.

Por fim, validou-se experimentalmente o protótipo funcional produzido com a inspeção de provetes com sondas de CI para diferentes parâmetros de inspeção. Alguns melhoramentos mecânicos foram realizados no protótipo funcional com vista a otimizar o seu movimento suave e livre de oscilações. Validou-se com sucesso o conceito de inspeção com END por CI.

#### **1.4 – Estrutura da Dissertação**

A presente tese encontra-se estruturada em sete capítulos ao longo dos quais se distribuem as diferentes fases do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2 apresenta-se a pesquisa bibliográfica referente aos conceitos e tecnologias abordadas. Faz-se uma explicação da SFR, nomeadamente do seu princípio físico, variantes, parâmetros de processo, características da junta soldada e defeitos mais comuns. Seguidamente fez-se um enquadramento geral dos END, das suas principais técnicas, limitações e

aplicabilidade à caracterização de materiais processados. Focou-se por fim no método de CI que mais relevo tem para o presente trabalho, explicando-se o seu princípio físico, limitações do método e mais recentes avanços.

No Capítulo 3 descreve-se todo o desenvolvimento dos meios laboratoriais e procedimento experimental dos ensaios.

O Capítulo 4 descreve a concepção, produção e validação experimental do protótipo funcional de END para inspecionar os provetes cilíndricos unidos por SFR.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados experimentais obtidos neste trabalho: microscopia ótica, ensaios de dureza e correntes induzidas, assim como alguns comentários aos mesmos.

O Capítulo 6 relata as conclusões retiradas de todo o trabalho desenvolvido, científicas e tecnológicas, assim como propostas de desenvolvimento futuro.



## **2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

### **2.1 – Introdução**

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica relativamente às matérias deste trabalho. Sumariza-se a história, o princípio físico, os fenómenos, particularidades e os recentes avanços das tecnologias abordadas, nomeadamente da soldadura por fricção rotacional (SFR); as suas variantes, parâmetros de processo, fenómenos envolvidos e defeitos mais comuns.

Sintetizam-se também as principais técnicas de ensaios não-destrutivos (END), princípio físico e variantes, com especial foco nas correntes induzidas e na sua aplicabilidade à caracterização de materiais processados por via do mapeamento da condutividade elétrica.

### **2.2 – Tecnologias de Processamento no Estado Sólido**

As tecnologias de processamento no estado sólido apresentam grandes vantagens na produção industrial, nomeadamente pela ausência de fusão do material base (MB). Representam todo o tipo de tecnologias mecânicas que visam processar um dado material metálico com o intuito de uni-lo a outro, enformá-lo ou modificar determinada propriedade

---

física sem o aquecer para lá da sua temperatura de fusão. Dentro desta vasta gama, destacam-se alguns exemplos de processos avançados de fabrico no estado sólido muito utilizados atualmente, como a Soldadura por Fricção (SF), a *Friction Stir Welding* (FSW) [2, 5, 6, 7], o processamento de ligas NiTi com memória de forma [8, 9, 10] e a *Selective Laser Melting* (SLM) [5, 6, 7, 11, 12]. Todos eles com um vasto campo de aplicações; desde a indústria médica com os implantes ósseos, aparelhos ortodônticos ou vasodilatadores, até à indústria naval, ferroviária e aeroespacial por via dos materiais e superligas que incorporam nos seus projetos. Podendo estas ligas ser unidas recorrendo, por exemplo, à SFL ou até mesmo customizadas nas suas propriedades recorrendo a tecnologias de processamento no estado sólido [13, 14].

A grande vantagem destas tecnologias reside no facto de não fundirem o material base (MB) durante todo o processo, o que traz inúmeras vantagens como a diminuição da presença de defeitos na raiz tais como porosidades, lacunas, distorções ou tensões residuais resultantes da elevada entrega térmica dos processos que requerem fusão [15]. É também mais fácil e económica de implementar em muitos casos, pois não requer uma atmosfera controlada na maior parte dos casos nem o manusear de metal fundido.

Destaca-se a SF, o processo de soldadura sobre o qual incidirá este estudo e que já tem vindo a ser utilizada desde a segunda metade do Séc. XX, nomeadamente na antiga União Soviética (URSS) que começou a utilizar este processo na união de componentes com geometria tubular de diferentes ligas metálicas. A sua grande vantagem face à soldadura por fusão tradicional reside no facto de permitir a união de juntas dissimilares ou de baixa soldabilidade, como juntas Alumínio-Alumínio, Aço-Alumínio, Titânio-Titânio, Titânio-Alumínio ou Alumínio-Magnésio, entre outras, que não poderiam ser unidas recorrendo à soldadura por arco-elétrico [16, 17, 18, 19].

## **2.3 – Soldadura por Fricção**

### **2.3.1 – Considerações Gerais e Princípio Físico**

O termo *soldadura* é usado para designar todos os processos tecnológicos de ligação permanente de materiais, não envolvendo ligações químicas por adesivos. Os primeiros exemplos de aplicação deste processo remontam à Idade do Bronze e do Ferro. O processo consistia em concentrar calor entre as duas peças a ligar, provocando o seu aquecimento e

amacramento, ao mesmo tempo que se aplicava uma pressão, promovendo assim a sua ligação. O processo foi sofrendo algumas melhorias ao longo da Idade Média mas manteve-se como único processo de soldadura até ao Séc. XIX, altura em que se descobre o arco elétrico, abrindo portas para os processos de soldadura por fusão. Atualmente existem dezenas de variantes do processo de soldadura por fusão e soldadura no estado sólido, explorando diferentes fenómenos físicos de ativação energética nos materiais [20].

Neste contexto de desenvolvimento de novos processos de soldadura surge a SF, é um processo de união no estado sólido e é autogéneo, isto é, sem material de adição, em que a ligação metálica se realiza a temperaturas inferiores à de fusão dos materiais envolvidos. Existem algumas variantes da SF quanto ao processo mas o seu princípio físico é o mesmo em todos eles. Os dois componentes que se pretendem unir são friccionados entre si, gerando assim calor na interface. Este calor gerado irá amaciar o material na junção, o que dará início ao processo de união. O aumento da temperatura fará com que a interface entre em regime visco-plástico e comece a recristalizar, nessa altura o movimento de rotação entre as peças é cessado e a pressão entre elas é aumentada (forjamento) durante um determinado período de tempo para consolidar a união [21].

A definição do processo de SF é descrita na norma *C6.1-89* da *American Welding Society* (AWS) como: “A Soldadura por Fricção é um processo de união no estado sólido que promove a coalescência dos materiais sob forças de compressão entre peças em rotação, ou com movimento relativo entre elas, para produzir calor e deformar plasticamente o material entre as duas superfícies. Sob condições normais, as superfícies em contacto não fundem. Material de adição, pastas de fluxo e gás de proteção não são requeridos neste processo” [22].

Basicamente existem três grandes tipos de SF: a Rotacional, a Linear e a Orbital, ilustrados na Fig. 2.1. A Soldadura por Fricção Rotacional (SFR) é o método mais antigo e utilizado, tendo ainda duas variantes (*direct-drive* ou *inertia-drive*) sendo que os primeiros usos comerciais destas variantes datam da década de 40 e 60 do século passado, respetivamente. Na Soldadura por

Fricção Linear<sup>2</sup> (SFL), as peças friccionam-se entre si (tipicamente com um arranjo topo-a-topo) segundo um movimento linear e com amplitude constante no plano da junção. Este método tem vindo a ser utilizado desde a década de 80 do século passado. Outra variante deste processo é a Soldadura por Fricção Orbital (SFO), que é uma combinação dos dois métodos anteriores, baseia-se num movimento com trajetória orbital (2D), p. ex. circular, para friccionar as duas peças, rodando-as em torno dos seus eixos longitudinais, no mesmo sentido, e com a mesma velocidade angular. Quando o movimento cessa as duas metades têm de ser corretamente alinhadas para que se promova a união. Este método foi introduzido na década de 70.

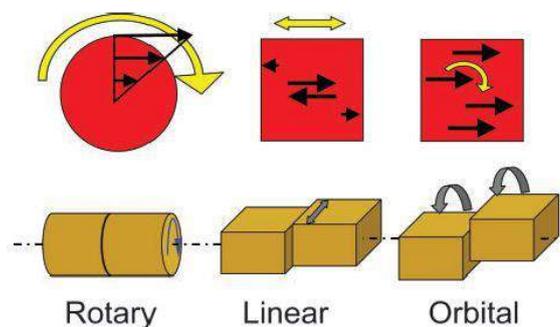


Figura 2.1 – Os três tipos de SF: comparação do movimento (setas a amarelo) e tensão gerada (setas a preto) para os vários métodos de soldadura [21].

### 2.3.2 – Soldadura por Fricção Rotacional: Processo e Variantes

A SFR é o mais comum dos processos de SF. O seu princípio básico é ilustrado na Fig. 2.2: Dois varões cilíndricos (ou tubos) são alinhados axialmente entre si com um pequeno espaço a separá-los, um deles é mantido estacionário e o outro em rotação constante; De seguida é aplicada uma pressão axial constante que põe os dois varões em contacto; Desta etapa em diante a literatura faz a distinção entre três importantes fases: a fase de aquecimento, a fase de fricção e a fase de forjamento.

---

<sup>2</sup> Chama-se a atenção para a ambiguidade deste termo resultante de uma tradução pouco feliz, segundo alguns autores, para a língua portuguesa. A Soldadura por Fricção Linear (SFL) pode ser também a denominação de outro processo mecânico, a *Friction Stir Welding* (FSW).

Na primeira fase, de aquecimento (*heat-up phase*), os dois varões são postos em contacto por uma determinada pressão axial. O binário entre os dois componentes sobe rapidamente, gerando calor por atrito e aumentando a temperatura na interface. Na fase de fricção, o aumento de temperatura promove o amaciamento do material, o que vai aliviando as tensões de escorregamento entre os varões e fazer com que a temperatura e binário desenvolvido vá gradualmente estabilizando para um valor constante. É atingido um patamar quase-estável (*steady-state*) de velocidade, binário e pressão axial. Eventualmente, e com o aumento de temperatura, o material começa a deformar plasticamente para fora da interface em regime visco-plástico, formando uma rebarba de material (efeito de *burn-off*) e levando consigo quaisquer óxidos ou contaminações das superfícies em contacto. Por fim, na fase de forjamento, o movimento entre os dois varões é cessado e a pressão axial é incrementada para consolidar a união (*forging phase*). Com efeito, a união é obtida por um forjamento local, com recristalização na interface, e abaixo da temperatura de fusão do material.

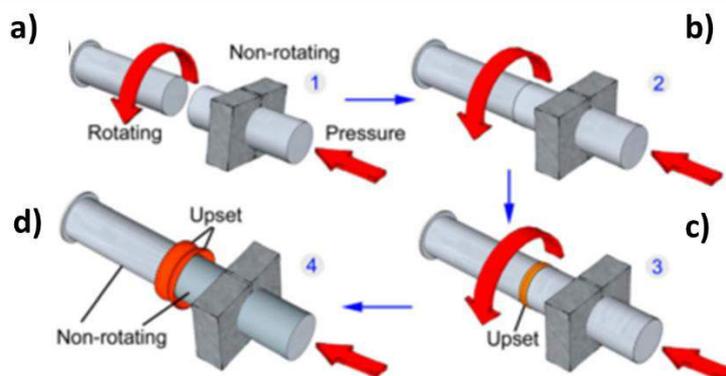


Figura 2.2 – Ilustração sequencial do processo de SFR [23].

- a) Varões antes do contacto (um em rotação constante), b) Fricção entre varões atuada por uma força axial, c) Aquecimento/amaciamento e início de formação de uma rebarba, d) A rotação é desligada e a força axial incrementada, o que consolida a união.

Existem duas variantes importantes do processo de SFR: por acionamento-direto (*direct-drive*) e por inércia (*inertia-drive*). As duas variantes processam-se de forma fisicamente igual ao descrito anteriormente, diferindo apenas na sua fonte de energia mecânica. Na variante de acionamento-direto é utilizada uma unidade motriz para dar o movimento de rotação, e que impõe e mantém uma velocidade constante durante todo o processo até ser desacionada na fase de forjamento (Fig. 2.3b). A SFR por Inércia, por sua vez, recorre a um volante de inércia que foi previamente acelerado por uma unidade motriz até uma determinada rotação pré-definida. Todo o processo se desenrolará de maneira semelhante ao primeiro mas com o

momento de inércia acumulado no volante de inércia (Fig. 2.3c), acabando por ser um processo energeticamente mais económico quando se pretende unir varões de grande diâmetro, razão pela qual é frequentemente utilizada na indústria mecânica pesada, com a naval ou aeronáutica. Por outro lado, a SFR por acionamento-direto é mais utilizada na indústria mecânica mais ligeira, nomeadamente a automóvel, como por exemplo na produção de hastes de válvulas [24].

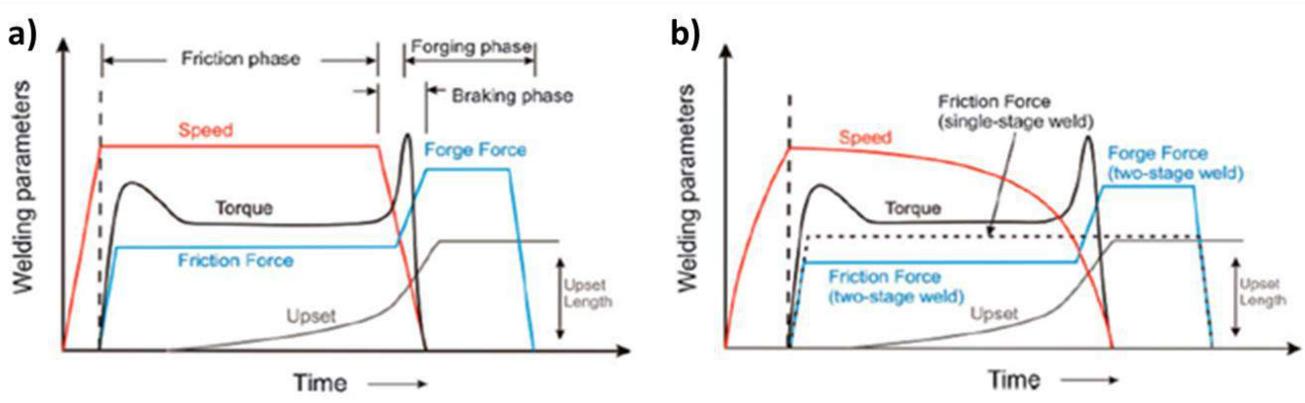


Figura 2.3 - Ilustração das variantes principais do processo de SFR num gráfico Parâmetros vs. Tempo [24].

a) SFR por acionamento direto, b) SFR por Inércia.

Desde 1960 ambas as variantes do processo têm vindo a ser desenvolvidas e utilizadas na união de vários aços, superligas de níquel, ligas de alumínio, ligas de titânio ligas de cobre e diferentes combinações de juntas dissimilares (Fig. 2.4). Possuem um alargado campo de aplicações, produzindo componentes desde flanges, abraçadeiras, tubos de perfuração (*drilling pipes*), até peças mais complexas. Na indústria automóvel, componentes como hastes das válvulas, engrenagens, eixos de transmissão ou veios de amortecedores, assim como peças mais críticas e complexas de motor de avião, como uniões turbina-veio. A SFR elimina a necessidade de recurso a flanges ou ligações aparafusadas, o que permite reduzir substancialmente a complexidade de sistemas mecânicos e pontos de outra forma frágeis.

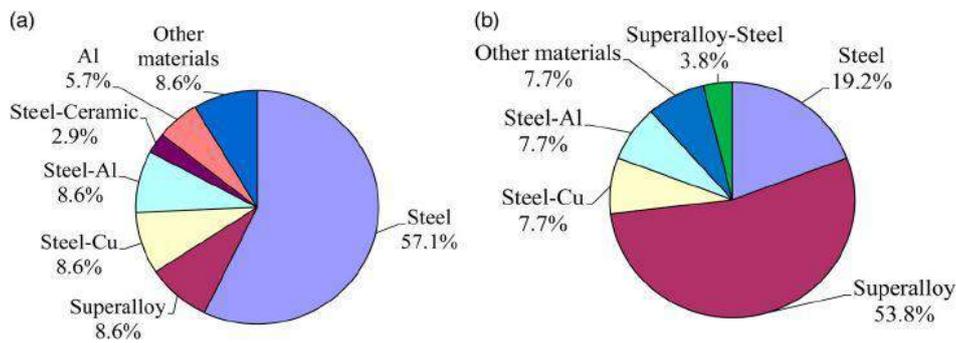


Figura 2.4 – Principais juntas metálicas de SFR estudadas e publicadas em artigos científicos na *Web of Science* (entre 2007-2016) [24].  
a) SFR por acionamento-direto, b) SFR por inércia.

### 2.3.3 – Parâmetros de Processo e seus Efeitos

Os parâmetros essenciais do processo de SFR são:

- 1) Velocidade de Rotação ( $\omega$ ) – Do varão móvel, medida em rev./min.;
- 2) Pressão Axial ( $P_f$ ) – Pressão aplicada entre os dois varões (tipicamente em MPa) e que se subdivide em pressão de fricção e pressão de forjamento, dependendo da fase do processo;
- 3) Tempo de Fricção ( $t_f$ ) – Tempo de duração do contacto entre as duas peças (em s), podendo também ser feita a subdivisão em tempo de fricção e tempo de forjamento;

Note-se que estes são os parâmetros base de todo processo, no entanto alguns autores referem outras variáveis como o encolhimento (ou retração) axial (em Inglês, *axial shortning*). No entanto, este fenómeno é *de per si* uma consequência direta do processo e não um parâmetro base. Com efeito, em aplicações em que esta retração final dos varões é pertinente, máquinas de SFR sofisticadas têm como *input* esta variável.

Relativamente aos parâmetros referidos, os valores dependem fortemente do tipo de aplicação e do tipo material (ou materiais) que se pretende unir com recurso a esta técnica. Existem modelos analíticos e manuais de boas práticas que auxiliam na sua escolha, no entanto, com o constante surgimento de novas ligas metálicas é difícil precisar exatamente quais os melhores parâmetros a utilizar sem antes se fazer um exaustivo estudo experimental de

soldadura com essas novas ligas, especialmente em juntas dissimilares que tendem a formar intermetálicos.

O processo baseia-se em energia mecânica que é convertida em calor. Os seus parâmetros de processo controlam simplesmente a taxa de calor gerado por atrito na interface. Note-se que esta taxa de calor gerado não é constante ao longo de toda a área de secção dos varões, variando também ao longo das diferentes fases do processo. É importante fazer uma distinção entre as duas fases, de fricção e forjamento, e dar especial atenção aos parâmetros de processo em cada uma delas, pois a cada uma estão associados importantes fenómenos térmicos, de deformação plástica e de recristalização.

### **Calor gerado por atrito**

O calor gerado vai depender diretamente da pressão axial aplicada, da velocidade de rotação, da área e do coeficiente de atrito. A equação 2.1 representa uma regra empírica utilizada e que descreve este fenómeno, onde  $P_N$  [Pa] é a pressão axial aplicada,  $\omega$  [rev./min.] é a velocidade de rotação e  $dq$  [W/m<sup>2</sup>] a taxa de calor gerada por unidade de área para uma dada distância  $r$  [m] ao eixo de rotação:

$$dq = \mu \cdot P_N \cdot r \cdot \omega \quad (2.1)$$

Em que  $\mu$  [-] é o coeficiente de atrito. Como a velocidade de rotação é constante na variante de SFR por acionamento-direto, a equação para o calor gerado por atrito pode ser expressa como:

$$q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \mu \cdot P_N \cdot \omega \quad (2.2)$$

Pois na prática a pressão aplicada não está igualmente distribuída na interface e acaba por ser um pouco menor nas extremidades, sendo a máxima quantidade de calor gerada entre 1/2 a 2/3 do raio do varão (Fig. 2.5), como demostram alguns estudos publicados e que estudaram este fenómeno [15, 25, 24].

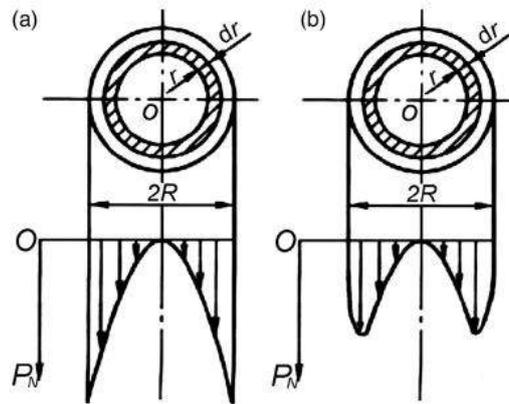


Figura 2.5 – Calor gerado ao longo do raio da secção [24].  
a) Modelo teórico, b) Modelo empírico.

Na SF a temperatura é possivelmente o fator mais importante, afetando a deformação do material durante a soldadura e a microestrutura final formada. A temperatura máxima atingida na SFR durante o período *steady-state* (temperatura constante), na fase de fricção, é muito elevada mas inferior à de fusão (entre 75% a 0,95% da  $T_m$ )<sup>3</sup>. Alguns estudos publicados concluem que o tipo de material tem pouco efeito na temperatura normalizada da interface, com exceção das ligas de titânio. É possível que devido à sua baixa difusividade térmica e pronunciada diminuição da resistência mecânica a altas temperaturas, resulte nas relativamente baixas temperatura de interface para ligas de Ti.

<sup>3</sup> A denominação  $T_m$  refere-se aqui, e nos artigos científicos consultados, a *melting temperature*. Em português: temperatura de fusão.

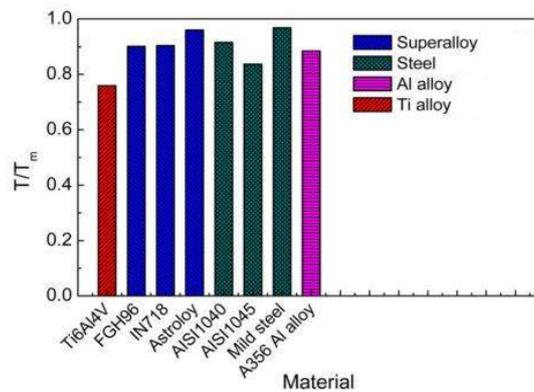


Figura 2.6 – Temperaturas de interface durante a SFR normalizada relativamente à de fusão [24].

### Velocidade de Rotação

Tipicamente, e baseado na literatura disponível, as velocidades de rotação variam muito de aplicação para aplicação, podendo assumir valores na ordem das 10.000 rev./min. ou superiores. A escolha deste parâmetro é pertinente pois vai influenciar grandemente a taxa de aquecimento do material, principalmente durante a fase de fricção, o que vai permitir à interface atingir uma condição de temperatura quase-estável mais rapidamente, aumentando assim a taxa de formação de rebarba (*burn-off*) e encolhimento axial [26].

A escolha deste parâmetro não deve ser independente dos restantes parâmetros, mas por norma não é o mais crítico na qualidade final da junta desde que selecionado dentro de uma gama aceitável de valores [24], dependendo em grande parte da liga que se pretende unir. Um aumento da velocidade de rotação incrementa dois fenómenos importantes: o calor gerado por atrito e a taxa de deformação plástica do material, sendo que estes dois têm efeitos opostos no tamanho final de grão na junta. O primeiro fenómeno promove um amaciamento e crescimento de grão, ao passo que o segundo restringe este efeito e promove o seu refinamento. Assim, a microestrutura final na junção é resultado do efeito combinado destes dois fenómenos. No entanto, verifica-se que até certo ponto o efeito da taxa de deformação plástica, com o aumento da velocidade, predomina sobre o efeito do calor gerado, o que resulta num grão mais refinado na interface e, conseqüentemente, numa melhor resistência mecânica final [27].

Adicionalmente, Serdar Mercan et al. [28] concluíram num estudo de resistência à fadiga em ligas de aço que para altas velocidades de rotação (e baixas pressões e tempos de fricção) levam a um melhor limite de fadiga. Adicionalmente, para as ligas em questão, uma menor velocidade de rotação (e elevadas pressões e tempos de fricção) resulta numa melhor tensão de

cedência final. A Fig. 2.7 ilustra a variação da tensão limite de cedência com o aumento da velocidade de rotação em duas superligas diferentes, baseadas em níquel e titânio.

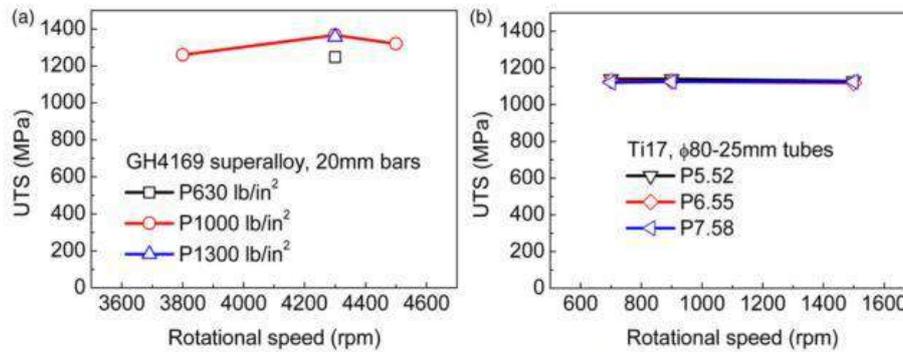


Figura 2.7 – Efeito da velocidade de rotação na tensão máxima de cedência em duas superligas [24].  
a) Superliga GH4169, b) Superliga Ti17.

Em soldadura com juntas dissimilares, em que há formação de intermetálicos, a escolha da velocidade é particularmente importante. O problema é não só a espessura da camada de intermetálicos (que deve ficar abaixo dos 3  $\mu\text{m}$ ) mas também a sua morfologia. Com o aumento da velocidade de rotação a morfologia destes intermetálicos (p. ex.  $\text{TiFe}_2$  numa junta de titânio) muda de um padrão disperso para laminar, o que vai afetar grandemente a resistência final da junção. Xun Li et al. [29] conduziram um estudo numa junta titânio-aço em que foram testadas diferentes velocidades de rotação (400-1800 rev./min.) e concluíram que a resistência mecânica final aumenta até 600 rev./min., decaindo depois para velocidades superiores. Devendo-se este facto à morfologia dos intermetálicos TiFe na interface.

Em suma, uma adequada velocidade de rotação é importante com vista a promover uma boa plastificação e aquecimento da interface, consolidando a união na fase de forjamento. No entanto, se esta rotação for excessiva pode desencadear fenómenos indesejados como formação de intermetálicos (em juntas dissimilares) ou juntas menos resistentes, como resultado da excessiva deformação plástica de material, originando rebarbas com morfologias distorcidas.

### Pressão Axial

As pressões axiais, de fricção e forjamento, estão entre os parâmetros mais críticos em SFR, não havendo propriamente uma regra teórica que dite qual utilizar. A sua escolha é indissociável dos respetivos tempos (de fricção e forjamento). Por norma, a pressão de forjamento é pelo

menos o dobro da pressão de fricção. De forma similar à velocidade de rotação, a pressão axial afeta diretamente o gradiente de temperatura, havendo uma relação de proporcionalidade entre este parâmetro e o encolhimento axial (*burn-off*) no final do processo [27, 30].

A velocidade de rotação e a pressão axial devem estar dentro de uma gama apropriada de valores para cada material e não devem ser escolhidos independentemente um do outro. O seu efeito combinado afeta a forma e espessura da junta final, sendo este efeito comum para todos os materiais, ilustrando-se esta variação na Fig. 2.8 [24]. Uma pressão de fricção excessiva gerará demasiado calor, resultando em crescimento de grão nas zonas periféricas à junta soldada, enfraquecendo-a.

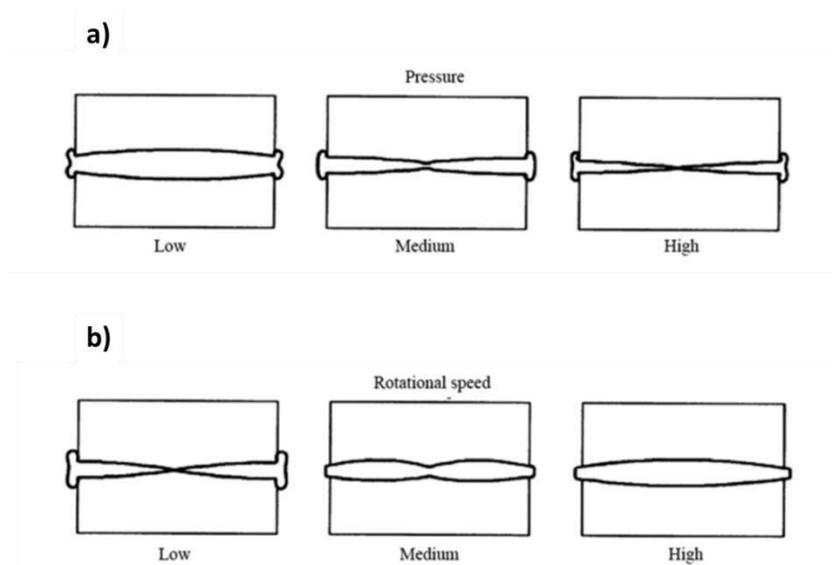


Figura 2.8 – Efeito da velocidade de rotação e da pressão axial na junta soldada [24].  
 a) Variando a pressão axial, b) Variando a velocidade (menor para o maior, da esquerda para a direita).

Para uma boa escolha combinada de parâmetros, o aumento da pressão axial de fricção consolida melhor a união, resultando numa melhor resistência mecânica. O encolhimento axial e a resultante rebarba serão superiores no final do processo como consequência. Outra vantagem de pressões axiais maiores é, em juntas dissimilares, restringir a espessura de intermetálicos na junção, como comprovado num estudo publicado por Wei Go et al. na união de uma liga de alumínio 7A04 com uma liga de magnésio AZ31, [16, 19].

### Tempo de Fricção

Assim como referido anteriormente, os tempos de fricção são de extrema importância a par das pressões axiais. Por norma, o tempo na fase de fricção é duas vezes o de forjamento, sendo o tempo de fricção mais relevante no resultado final da junta soldada. É a pressão de fricção que vai regular quanto o material vai aquecer até atingir a temperatura quase-estável antes da fase de forjamento. Em materiais que sofram transformações de fase ou crescimento significativo de grão, como os aços-carbono, o tempo de fricção é de extrema importância [24]. A Figura 2.9 ilustra os resultados experimentais do processo de SFR, numa superliga baseada em Fe, para diferentes tempos de fricção e pressões axiais.

O encolhimento axial está também diretamente ligada ao tempo de fricção. Com o incremento de  $t_f$  o encolhimento axial é superior, pois a expulsão de material plastificado aumenta. Há também uma clara redução da geometria (coroa) na interface com aumento do tempo de fricção e um resultante incremento no tamanho da rebarba formada.

Palanivel R. et al. [31] comprovaram, num estudo em tubos de titânio unidos por SFR, que o tamanho de grão diminui com ao aumento do tempo de fricção devido à recristalização dinâmica que ocorre na interface. Este fenómeno aumenta a resistência mecânica do material na junta quando comparado com o MB. No entanto, se o tempo de fricção for superior a um determinado valor (32 s, no caso prático concreto) a tensão máxima de cedência decai devido ao crescimento de grão na ZTA, como resultado de uma exposição prolongada ao calor gerado na fricção [31-32].

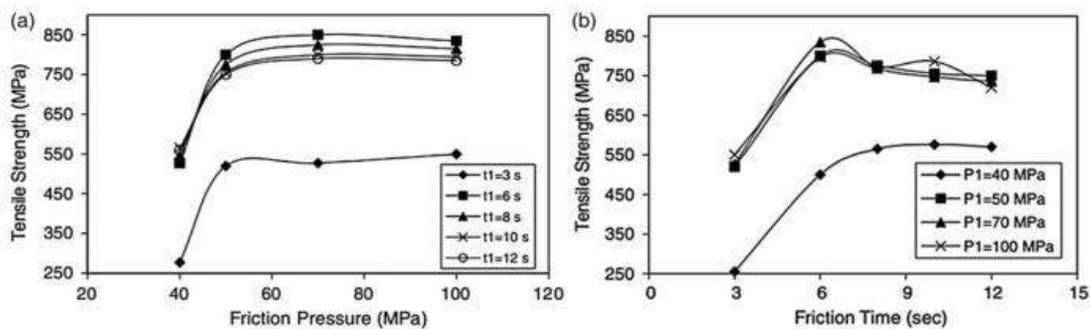


Figura 2.9 – Tensão limite de cedência em varões soldados SFR variando a pressão de fricção e o tempo de fricção (numa superliga MA956, baseada em Fe) [24].

### 2.3.4 – Características da Junta Soldada

Macroscopicamente, as juntas apresentam duas rebarbas encurvadas, axissimétricas e ao longo do perímetro, como resultado do efeito combinado da rotação e da extrusão sofrida na interface a alta temperatura (Fig. 2.10). O processo pode ser efetivamente visto como um processo em que o material é forjado localmente sob grandes taxas de deformação e a alta temperatura. Como consequência disso, o fenómeno de recristalização dinâmica é comum a todo o tipo de materiais [33, 34].

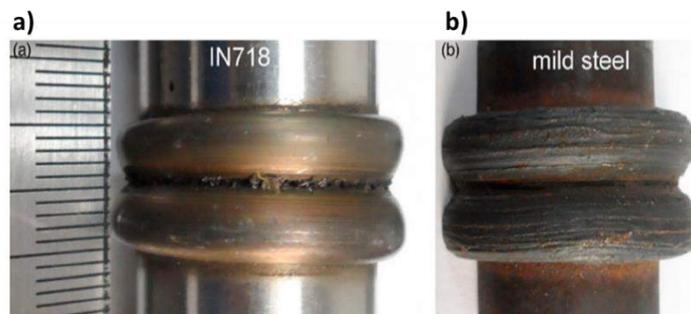


Figura 2.10 – Junta soldada típica de SFR em varões [24].

a) Em aço IN718, b) Em aço macio.

Tipicamente a junta soldada apresenta três zonas distintas entre si: (1) Centro de soldadura (CS) ou zona de contacto; (2) Zona termomecanicamente afetada (ZTMA); (3) Zona termicamente afetada (ZTA). Estas zonas diferem no seu aspeto, comprimento e propriedades como resultado das transformações no estado sólido que ocorrem durante o processo.

Se os parâmetros forem corretamente escolhidos, o CS caracteriza-se por uma zona fortemente deformada plasticamente – é nesta zona que a ação do atrito ocorre com maior intensidade, fazendo com que fragmentos de metal passem de uma superfície para outra. A taxa de deformação é controlada pela velocidade de rotação. Esta zona tem uma microestrutura de grão bastante refinado devido às altas tensões de deformação e recristalização completa, como lustrado na Fig. 2.11.

A ZTMA engloba toda a zona que foi parcialmente deformada plasticamente e afetada termicamente, estendendo-se desde o CS até ao fim da rebarba, aproximadamente (Fig. 2.12). Na zona mais deformada o material foi sujeito a uma considerável deformação plástica mas não esteve em contacto direto com outra superfície. As altas temperaturas e deslocamentos dão origem a uma recristalização dinâmica, e esta zona caracteriza-se por grãos finos e equiaxiais.

A ZTA caracteriza-se pela sua exposição à temperatura mas não a deformação plástica. Depende muito do tipo de material e da sua condutividade térmica, podendo os seus picos de temperatura dar origem a transformações de fase (p. ex. em aços). O crescimento de grão também pode ocorrer substancialmente nesta zona [19, 35, 36].

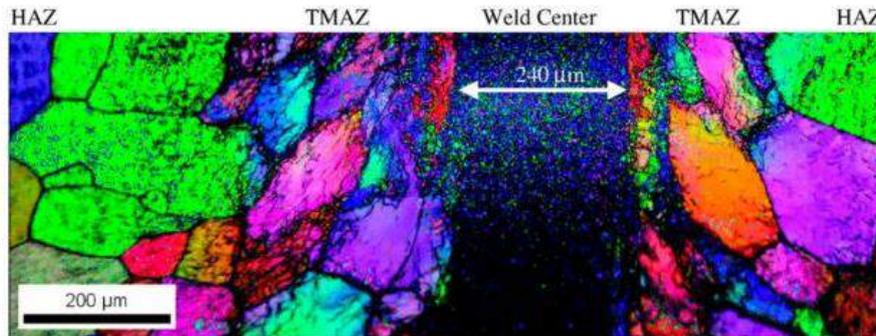


Figura 2.11 – Micrografia SEM de uma junta soldada por SFR, de uma liga de Ti, com identificação das diferentes zonas [24].

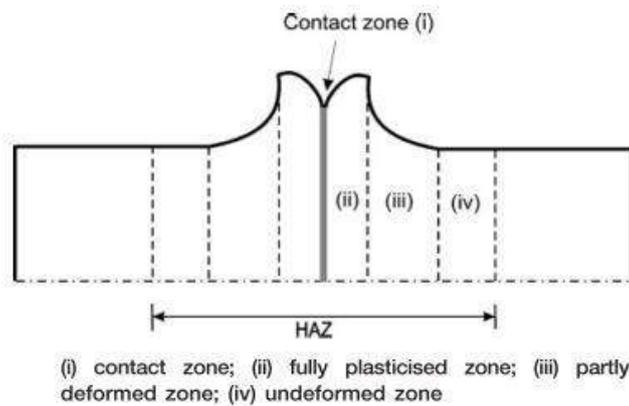


Figura 2.12 – Diferentes zonas numa junta de SFR [24].

- i) Zona de contacto, ii) zona totalmente deformada e recristalizada, iii) Zona parcialmente deformada, iv) Zona termicamente afetada.

Uma atenta inspeção visual à junta soldada pode fornecer importantes informações quanto à sua robustez, antes de se utilizarem outros métodos de inspeção mais invasivos. Deve apresentar rebarbas bem pronunciadas, axissimétricas (para juntas similares) e com alguma espessura, indicando que a união foi bem consolidada. Observando a sua secção transversal (ver Fig. 2.13) deve ser visível a olho nu a linha de interface (CS) e as diferentes zonas da junta soldada, através das ligeiras descolorações ou tonalidades que apresenta.

Se a interface apresentar algum tipo de defeito na raiz, como delaminações, fissuras ou poros, isto poderá indicar insuficiente entrega térmica por via de uma má prescrição de parâmetros de soldadura. Para juntas similares a resistência mecânica é comparável ou superior à do MB. A falha ocorre geralmente no MB, na ZTA ou mesmo na ZTMA, dependendo do tipo de material. Uma fratura na interface indica uma má seleção de parâmetros de soldadura ou insuficiente entrega térmica.

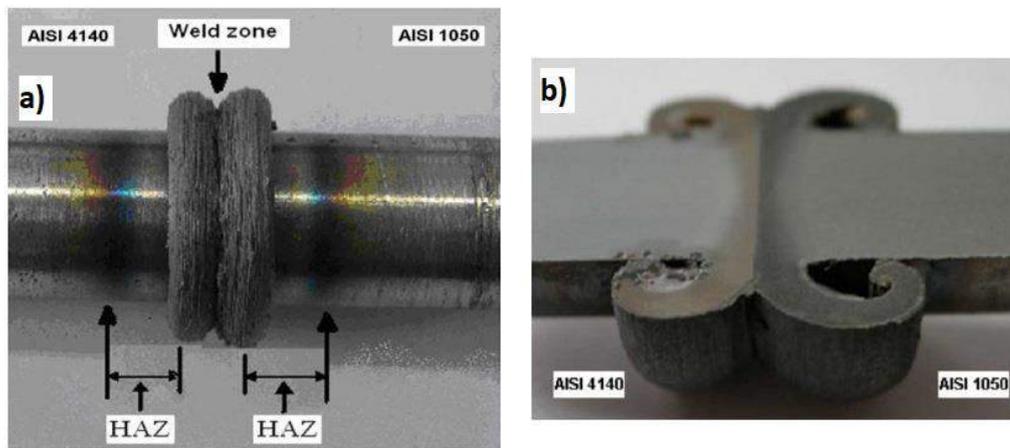


Figura 2.13 - Macro de uma junta de aços dissimilares, AISI4140 e AISI1050 [35].  
 a) Em bruto, com identificação das ZTAs, b) Em corte longitudinal.

### 2.3.5 – Defeitos mais Comuns

Embora seja um processo bastante limpo e livre de distorções, contaminações ou defeitos típicos da soldadura por fusão, alguns fenômenos anormais no estado sólido podem ocorrer, mesmo com uma correta escolha de parâmetros. São exemplo disso as transformações de fase alotrópicas, principalmente em ligas de titânio, aços e superligas. Em juntas dissimilares a formação de intermetálicos também pode representar um problema, reduzindo bastante a resistência mecânica final. Alguns estudos de soldadura em atmosfera controlada ou isolada foram conduzidos com vista a minorar este fenômeno [37-38]. Sabe-se que o mesmo tem uma relação direta com o tempo de fricção.

Para além dos fenômenos referidos, podem também ocorrer inclusões de óxidos ou o aparecimento de micróporos se as condições de soldadura não forem boas a uma suficiente e continua plastificação de material na interface. É comum este fenômeno em superligas devido à sua alta resistência mecânica mesmo a elevadas temperaturas. Algumas juntas dissimilares são eficazmente unidas por SFR com recurso a uma *interlayer* de óxidos de alumínio, cobre ou

mesmo prata, com vista a reduzir estas inclusões ou a formação de intermetálicos indesejados [16, 37].

## **2.4 – Ensaios Não Destrutivos**

### **2.4.1 – Considerações Gerais**

Os ensaios não destrutivos (END) representam um conjunto de técnicas e metodologias que permitem caracterizar um determinado componente, material ou sistema sem prejuízo da sua integridade ou funções. São uma importante prática na manutenção, deteção de defeitos e controlo da integridade de vários equipamentos e componentes. O seu vasto campo de aplicações tem vindo a crescer muito ao longo das últimas décadas, desde controlo de qualidade durante o fabrico até à inspeção em serviço de equipamentos em diferentes fases de funcionamento.

Os END são uma técnica utilizada há muitos séculos, contudo o seu grande desenvolvimento e exploração data de 1920. Com o surgimento de novos processos de fabrico, materiais e tecnologias de produção surgem também novos defeitos com diferentes morfologias, sendo indispensável a sua deteção e controlo na manutenção de equipamentos ou máquinas. Os END são assim uma importante ferramenta na prevenção de avarias, acidentes, prejuízos materiais e até humanos.

Os fenómenos em que se baseiam vão desde inspeção visual, radiologia, espectroscopia, acústica ou indução magnética. Os últimos desenvolvimentos na nanotecnologia de computação, controlo, automação e manufatura aditiva, vieram abrir um novo horizonte de possibilidades aos END. Hoje em dia são já uma tecnologia bastante consolidada e desenvolvida, materializando-se não só em equipamentos comerciais como também na conceção de soluções customizadas (*tailor-made*) de controlo de qualidade para aplicações industriais específicas ou manutenção de equipamentos.

### 2.4.2 – Principais Técnicas de END

As técnicas de END são muito variadas e baseiam-se em princípios físicos diversos e que constituem variantes de cinco principais métodos:

- Métodos baseados em inspeção visual – Baseados na observação do utilizador e que engloba os líquidos penetrantes, partículas magnéticas, endoscopia e termografia;
- Métodos radiológicos – Que exploram todos os fenómenos da absorção, reflexão e transmissão da radiação. São exemplos desses a radiografia com raios-X e com raios  $\gamma$ , a radiografia digital e a tomografia computadorizada com raios-X (TAC);
- Métodos baseados em ultrassons (US) – Baseiam-se no fenómeno acústico da reflexão de ultrassons (eco) com vista a detetar defeitos ou descontinuidades no material. Estes possuem algumas variantes: os US convencionais de eco pulsado, os *phased array*, os *US creeping*, os *time-of-flight diffraction* (TOFD) US, entre outros. Todos eles partem da transmissão de uma onda ultrassonora, por efeito piezoelétrico no interior de uma sonda, que penetra e propaga através do material a inspecionar. Sendo que depois diferem em características próprias de comparação, medição e análise dos ecos sonoros refletidos na descontinuidade ou defeito [39, 40, 41].
- Métodos baseados em correntes induzidas (CI) – Recorre ao fenómeno eletromagnético de indução para detetar defeitos superficiais e subsuperficiais. Consiste na medição da impedância aos terminais de uma bobina (sonda) de cujo campo magnético é afetado pela presença de um defeito. Destacam-se as CI convencionais de corrente alternada sinusoidal, as CI pulsadas, as CI medidas com GMR e com SQUID, entre outras [42, 43, 44].
- Métodos baseados em fenómenos biológicos: Células bacterianas (CB). Este inovador e mais recente método de END utiliza colónias de CB para a deteção de micro e nano defeitos superficiais. As mesmas são depositadas no material a inspecionar e deixadas estar por um período de tempo para que se alojem nos defeitos. É depois emitido um feixe de luz UV rasante para eliminar o excesso de CB à superfície, ficando apenas as que se alojaram nos defeitos ou descontinuidades.

Estas são depois reveladas por técnicas de microscopia de fluorescência ou com um revelador próprio [45, 46].

### **2.4.3 – Últimos Desenvolvimentos em END**

Nas últimas décadas não se tem assistido a um aparecimento de novas técnicas de END do ponto de vista do seu fundamento, com exceção das CB que se baseiam num novo fenómeno biológico. Antes se tem assistido a uma consolidação e melhoramento das técnicas já existentes e novas variantes dessas mesmas técnicas. Todas as técnicas de END possuem um limiar de detetabilidade com consequência do fenómeno físico específico em que se baseiam. Com efeito os novos desenvolvimentos em END visam colmatar ou reduzir esse limite. São exemplo disso as *phased array* nos ultrassons ou o surgimento de novas sondas de CI, como as IOnic [47], otimizadas para inspeção de cordões por FSW.

O crescente aparecimento de novas tecnologias produtivas, novos materiais e superligas, aliado aos apertados requisitos de segurança e manutenção, torna indispensável o recurso a técnicas de END mais eficazes, fiáveis e que permitam inspeção em serviço. Como por exemplo na inspeção de materiais compósitos ou componentes multimaterial, p. ex. nas asas de um avião ou em pás de um moinho eólico [48, 49]. O surgimento destes novos materiais traz consigo uma morfologia diferente de defeitos dos que habitualmente se viam em materiais ou processos mais convencionais. Os mais recentes esforços de desenvolvimento vão no sentido de aperfeiçoar as técnicas END existentes, nomeadamente com recurso a tecnologias de processamento inteligente de informação, fusão de dados de múltiplos sensores, modelação, tratamento de sinal e redução de ruído.

## **2.5 – END por Correntes Induzidas**

### **2.5.1 – Princípio de Funcionamento**

O seu fenómeno físico baseia-se na lei geral da indução eletromagnética, descoberto por Faraday (1791-1867) nos seus estudos sobre eletricidade e magnetismo. Os END por correntes

induzidas consistem na medição da impedância de uma, ou várias bobinas, que constituem a sonda, e que são afetadas pelo material condutor que estão a inspecionar.

O princípio do método de CI é ilustrado na figura 2.14. A bobina (sonda) é percorrida por uma determinada corrente elétrica alternada, sendo que essa corrente gera um campo magnético primário ( $H_p$ ). Quando esse campo magnético entra em contacto com um meio condutor (a superfície do material a inspecionar, no caso) induz uma corrente elétrica no mesmo e, essa corrente elétrica por seu turno, vai gerar um campo magnético secundário ( $H_s$ ) que se opõe ao primeiro ( $H_p$ ). Com efeito, essa interferência vai fazer variar a impedância inicial da bobina que constitui a sonda. É esta variação que é medida e permite executar diversas ações de controlo como por exemplo, a medição da condutividade elétrica e permeabilidade magnética, variações de espessura, existência de um defeito ou descontinuidade e corrosão.

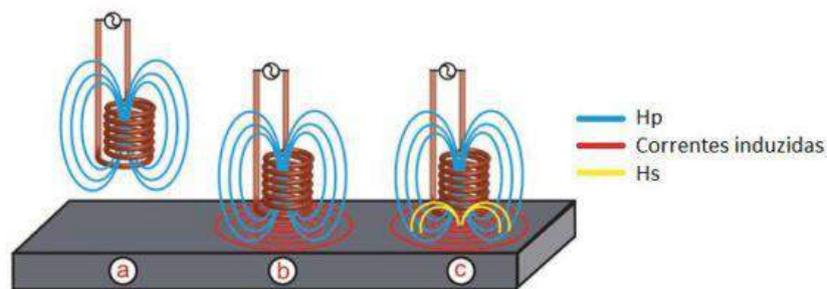


Figura 2.14 - Princípio do método de CI ao aproximar uma sonda (bobina) de um meio condutor [50].

As grandezas elétricas descritas estão representadas na figura 2.15 para diferentes materiais e condições de inspeção. Cada material condutor (magnético ou não) terá um valor de impedância, que poderá ser mais resistivo (alumínios) ou indutivo (aços). No caso de existir alguma perturbação causada por um defeito ou descontinuidade, a trajetória das correntes induzidas será alterada e, como consequência, o valor da impedância sofrerá alterações significativas no plano de impedância.

Tipicamente, este plano de resposta é o ambiente gráfico dos aparelhos comerciais de CI disponíveis, podendo estes ser ajustados e calibrados (em ganho, ângulo e frequência) para o tipo de material e profundidade que se pretende inspecionar. As correntes induzidas circulam paralelamente às superfícies e perpendicularmente aos campos magnéticos ( $H_p$  e  $H_s$ ), sendo que os fatores que mais as afetam são a condutividade elétrica do material ( $\sigma$ ), a permeabilidade magnética ( $\mu$ ), a posição e distância da sonda ao meio condutor (*lift-off*) e o efeito de bordo.

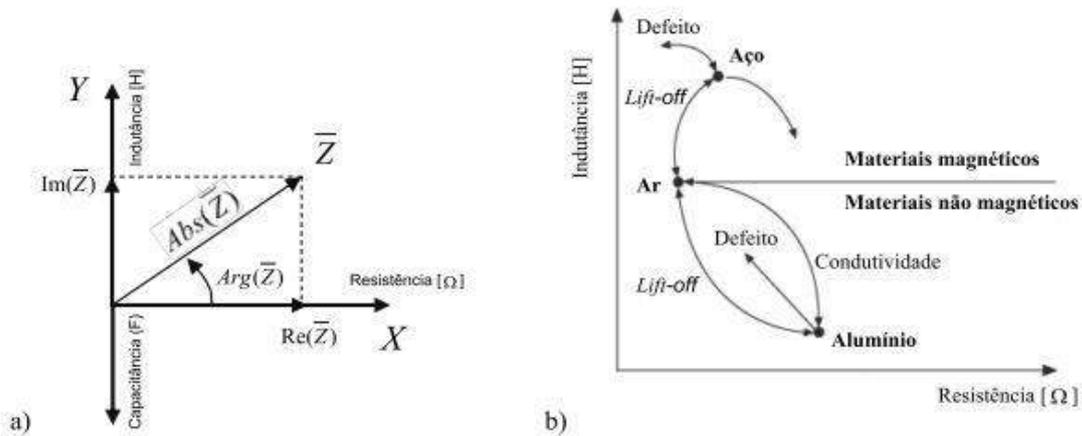


Figura 2.15 – Representação do vetor Impedância (Z), [47].  
 a) No plano de Argand, b) No plano de resposta para diferentes materiais.

As CI têm como característica própria o chamado “efeito pele”, pois estas não se distribuem uniformemente ao longo da secção do material. São mais intensas junto à superfície e vão perdendo essa intensidade com a profundidade de penetração até se anularem. Assim sendo, o valor da intensidade da corrente depende diretamente da profundidade,  $x$  [m], de acordo com a Eq. 2.3, onde  $I_0$  [ $A \cdot m^2$ ] é a intensidade da corrente à superfície,  $f$  [ $s^{-1}$ ] a frequência de excitação,  $\mu$  [ $H \cdot m^{-1}$ ] é a permeabilidade magnética e  $\sigma$  [%IACS]<sup>4</sup> a condutividade elétrica.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2.3)$$

Devido a este fenómeno as CI são eficazes apenas na deteção de defeitos superficiais ou sub-superficiais, sendo que os defeitos perpendiculares à superfície são mais facilmente detetáveis que os paralelos. A profundidade máxima de inspeção convencionou-se como sendo a profundidade para a qual a intensidade da corrente ( $I_x$ ) é aproximadamente igual a  $e^{-1}$  (0,37 = 37%) da intensidade da corrente à superfície,  $I_0$ . O que, substituindo na Eq. 2.3, resulta na seguinte relação:

---

<sup>4</sup> *International Annealed Copper Standard*: medição da condutividade elétrica como percentagem da condutividade de um padrão de cobre puro a 25°C, o que corresponde a  $5.8 \times 10^7$  Siemens/metro.

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2.4)$$

Na Figura 2.16 apresentam-se as curvas de penetração das CI para diferentes ligas de alumínio. Como é perceptível, esta decai com o aumento da frequência, como demonstrado pela equação anterior.

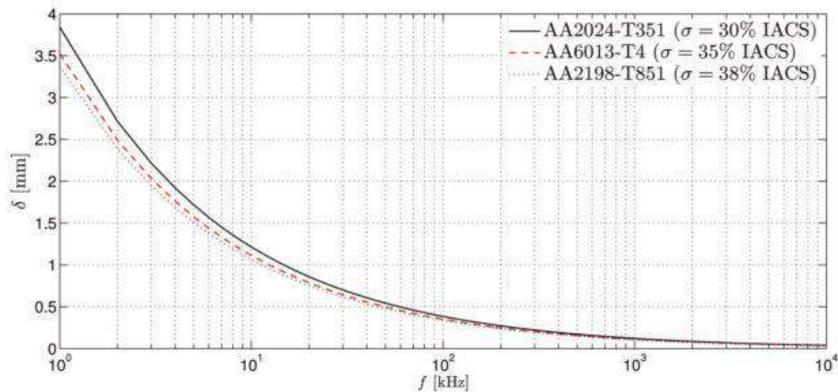


Figura 2.16 – Curvas de profundidade de penetração para diferentes ligas de Al [47].

Existem dois tipos de sondas quanto ao modo de funcionamento, as absolutas e as diferenciais. Nas primeiras a sonda funciona como elemento excitação e recepção, avaliando-se a variação total da impedância da bobina. No modo diferencial existem duas sondas, sendo que uma delas pode estar em contacto com um padrão e a outra em contacto com a peça. É a medida da variação de impedância entre as duas sondas que indica a presença ou não de um defeito.

## 2.5.2 – END por CI na Caracterização de Materiais Processados

As CI são uma técnica expedita e em constante desenvolvimento na área dos END mas o seu campo de aplicações não se resume apenas à deteção de defeitos. São também utilizadas com sucesso na caracterização de materiais após processos de fabrico, pois permitem avaliar mudanças metalográficas relacionadas com esses processos.

Tipicamente, quando se pretende analisar a microestrutura do material recorre-se à microscopia ótica, a mesma permite identificar as zonas termicamente afetadas, zonas fortemente deformadas, a sua extensão e as transformações de fase que ocorreram. Também

existem outras variantes mais sofisticadas de microscopia como os *scanning electron microscopes* (SEM) que analisam o material com um feixe de eletrões que interage com os átomos de material da amostra, revelando assim sinais de informação relativamente à morfologia e composição da superfície da amostra. Também a difração por raios-X, que permite analisar a cristalografia das fases, os precipitados e assim identificar a sua estequiometria [51].

Por outro lado, do ponto de vista da caracterização mecânica, os ensaios de dureza de dureza de Vickers representam um procedimento relativamente simples na medição dessa propriedade, avaliando a capacidade do material em resistir à deformação plástica por parte de uma fonte externa. Mas o que todas estas técnicas de caracterização têm em comum é o facto de serem invasivas e danificarem, ou destruírem por completo, o componente que se pretende analisar.

Os END em geral, e concretamente o método de CI, representa aqui uma ferramenta muito útil e com provas dadas na caracterização de materiais processados, quer em laboratório quer em serviço. O seu fenómeno físico subjacente permite não só a deteção de defeitos mas também fazer medições de espessura, estado de corrosão, permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material. De facto, a condutividade elétrica dos materiais é sempre alterada em processos como a FSW ou SFR. Santos et al. [4] estudaram este fenómeno na caracterização de ligas de alumínio processadas, correlacionando esta propriedade elétrica dos materiais processados com os fenómenos ocorridos e a condição metalográfica do material [2, 3, 4, 47, 52]. Um exemplo desses estudos pode ser contemplado na Figura 2.17, para uma placa em liga de alumínio da série AA7000, soldada por FSW. No presente trabalho explorar-se-á esta possibilidade na caracterização do processo de SFR através da medição de campos de condutividade elétrica.

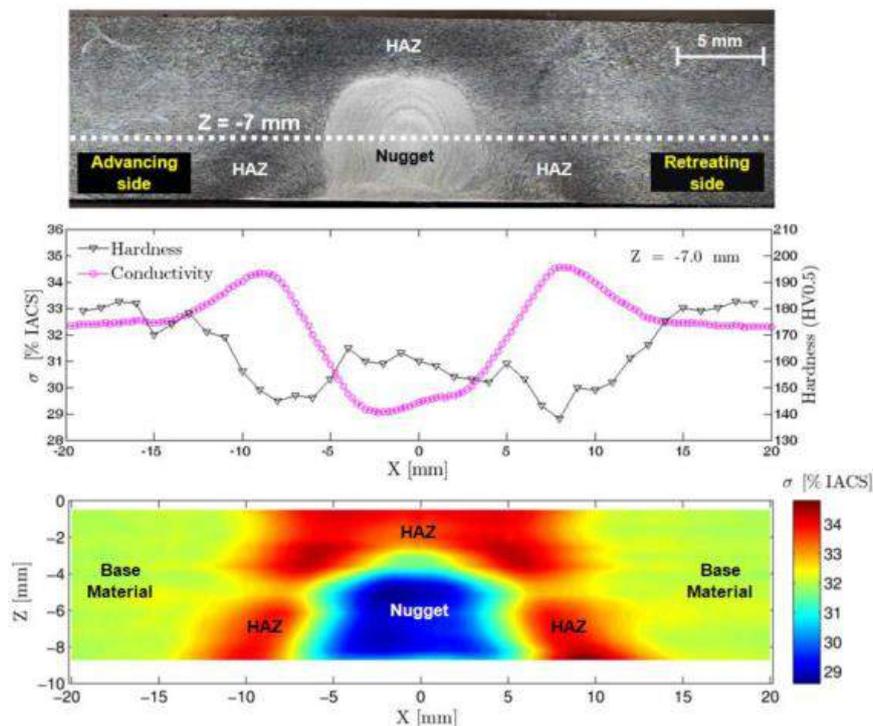


Figura 2.17 – Comparação da macrografia transversal de uma liga AA7075T6 processada por FSW (a 7 mm da superfície), respetivo perfil de dureza, perfil de condutividade elétrica e campo de condutividade ao longo da secção (identificando as diferentes zonas) [4].

O conhecimento da condutividade elétrica, através do seu mapeamento em materiais processados pode assim complementar, ou mesmo substituir, outras técnicas de caracterização na inspeção de componentes em serviço. Outro campo de aplicações da condutividade elétrica é também a possibilidade de se utilizar esta propriedade para desenvolver parâmetros de processo em tecnologias de processamento no estado-sólido (como a FSW ou FSP), melhorando o desempenho do processo e dos componentes processados.

Note-se que todos os métodos baseados em CI detetam descontinuidades ou defeitos no material com base em mudanças locais da condutividade elétrica no material, na Figura 2.18 apresenta-se um mapeamento da condutividade elétrica numa placa de alumínio processada por FSP. Como efeito, é necessário um conhecimento prévio das variações no campo de condutividade elétrica devido ao processamento com vista a distinguir o material base de eventuais descontinuidades [1, 53, 54].

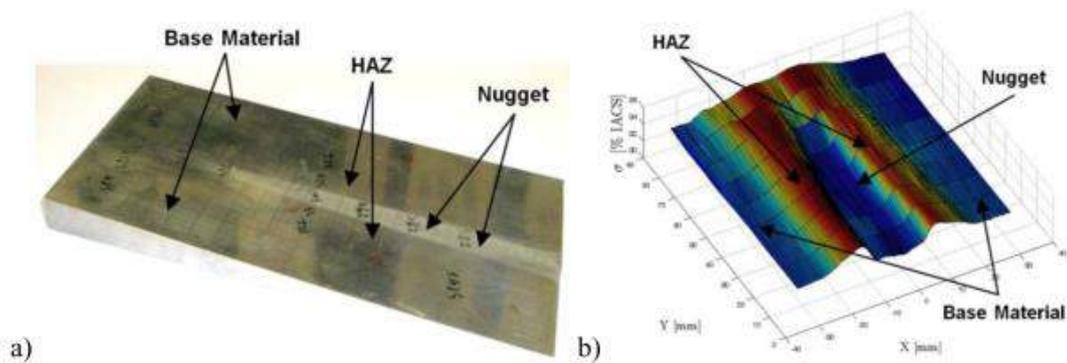


Figura 2.18 – Representação tridimensional da condutividade elétrica numa chapa de alumínio AA7075T6, previamente processada por FSP (*friction stir processing*) [4].  
 a) Superfície processada e maquinada em rampa, b) Mapeamento da condutividade elétrica na superfície.

A caracterização por via das CI revela-se assim uma ferramenta muito útil e expedita, e que permite inspecionar uma área grande material em pouco tempo. Aplicado à SF permite distinguir eficazmente as diferentes zonas de soldadura, pois o seu fenómeno baseia-se na mobilidade dos eletrões no material e esta depende essencialmente do tamanho de grão ou existência de precipitados. Como tal, em zonas em que houve crescimento de grão (ZTA) a condutividade vai ser maior, ao passo que em zonas de grão mias refinado, ou fortemente deformadas plasticamente, a condutividade vai ser menor, pois os limites de grão constituem um obstáculo à passagem de eletrões.

## 2.6 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se a pesquisa bibliográfica relacionada com as matérias deste trabalho, nomeadamente a SFR: o seu princípio físico, variantes do processo, parâmetros, características da junta soldada e defeitos mais típicos. Também se abordaram os END, nomeadamente por CI, o seu fenómeno físico e a sua aplicabilidade recente na caracterização de processos avançados de fabrico. Como foi referido anteriormente, são tecnologias bem desenvolvidas e estudadas, no entanto, a aplicação dos END por CI na caracterização do processo de SFR apresenta elevado potencial que ainda está por explorar do ponto de vista industrial.

A inspeção não destrutiva de cordões de SFR requer uma abordagem dedicada à natureza do problema. Uma abordagem que tenha em conta: i) o tipo de material que constitui os cordões

de SFR; ii) as alterações do campo de condutividade intrínsecas ao processamento no estado-sólido do material; iii) a dimensão, morfologia e dimensão dos possíveis defeitos ou descontinuidades existentes. Nesse sentido, torna-se necessário proceder ao desenvolvimento de meios laboratoriais e de um protótipo funcional para aplicar e testar o desempenho dos END por CI na caracterização de SFR de êmbolos em liga de alumínio.

# **3 – DESENVOLVIMENTO DE MEIOS LABORATORIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

## **3.1 – Introdução**

Neste capítulo resume-se o trabalho preliminar de análise e desenvolvimento dos meios laboratoriais para caracterização dos provetes com END por CI. Estes trabalhos envolveram a adaptação de um equipamento já existente em laboratório e a conceção de um dispositivo funcional de maneira a permitir inspecionar a geometria cilíndrica dos provetes.

Adicionalmente, explicitam-se as metodologias e procedimentos experimentais no âmbito deste trabalho, como os métodos mais invasivos (microscopia ótica e ensaios de microdureza) e os END com correntes induzidas.

## 3.2 – Adaptação da Mesa Automatizada

### 3.2.1 – Considerações Iniciais

Com vista a se inspecionarem os referidas êmbolos de liga de alumínio fornecidas pela empresa, nomeadamente com sondas de CI, foi necessário proceder à adaptação dos meios laboratoriais existentes, nomeadamente, tendo em conta a geometria cilíndrica dos êmbolos. Tipicamente este tipo de ensaios são realizados em superfícies planas ou ao longo de uma linha, e como tal o equipamento automatizado existente em laboratório está adaptado para varrimentos no plano XY. Desta forma, a geometria cilíndrica dos provetes representou desde logo um desafio e a necessidade de se desenvolver um dispositivo ou protótipo que permita fazer varrimentos ao longo de um perímetro circular.

Como foi referido, existiam em laboratório diversas mesas automatizadas com movimento no plano XYZ para este tipo ensaios com sondas de CI, uma delas desenvolvida por um ex-aluno, o engenheiro Gonçalo Sorger [55]. A mesma consiste de um tampo que é móvel e efetua um movimento no plano, faseado e controlado, permitindo fazer varrimentos em XY. Esta integra também um braço móvel e que segura a sonda para uma determinada cota Z que é fixa. A mesa, apresentada na Figura 3.1, é totalmente automatizada e controlada por *drivers* e motores passo-a-passo, uma placa DAQ de aquisição de dados, da *National Instruments*, e um *virtual instrument* (VI) dedicado em *LabVIEW*. A mesma é controlada por PC e possui uma interface com o utilizador, que permite definir os parâmetros prévios de ensaio, nomeadamente: o curso de varrimento da sonda, a resolução espacial na direção X e Y, assim como o ponto de início do ensaio. Dispõe ainda de uma segunda DAQ para fazer a aquisição do sinal de impedância da sonda, que está ligada ao equipamento comercial *Nortec 500* de CI. O sinal é enviado para o VI em *LabVIEW* que gera o perfil de condutividade do material em tempo real, na interface gráfica.

Foi a partir deste equipamento preexistente que se desenvolveu um dispositivo funcional para permitir varrimentos em perfis cilíndricos. Pretendeu-se que fosse compatível com a mesa, sendo fixado a esta e aproveitando o seu movimento em XY, dotando adicionalmente a mesa XYZ de ensaios de mais um grau de liberdade, rotação em  $\theta$ . O dispositivo deverá fixar as amostras pela sua linha de eixo, perfeitamente paralela ao plano XY da mesa, e ao mesmo tempo permitir a sua livre rotação.

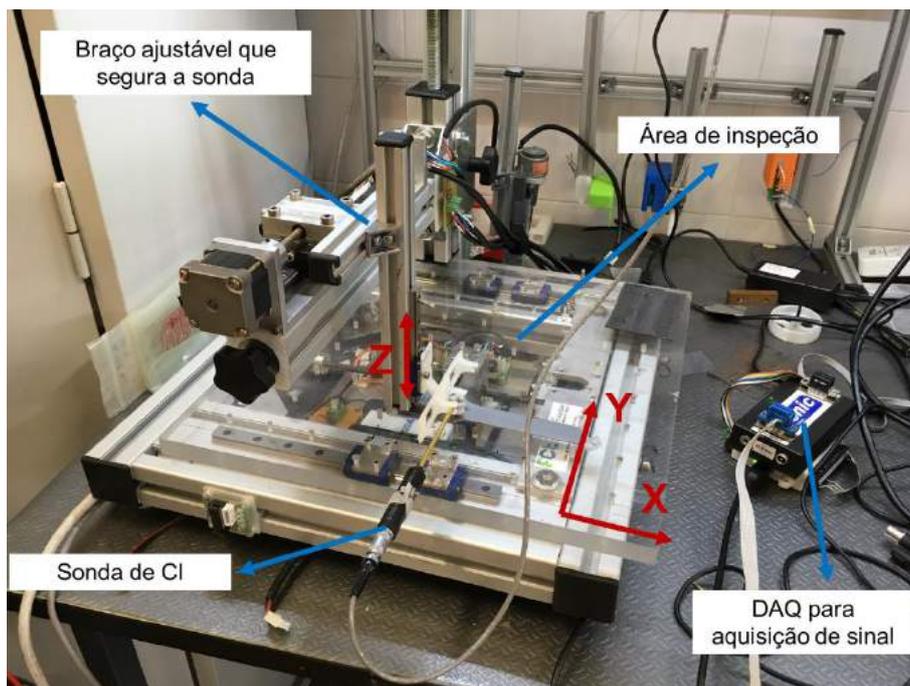


Figura 3.1 - Mesa XYZ presente em laboratório para ensaios de CI.

### 3.2.2 – Requisitos Funcionais do Dispositivo

Na seguinte tabela, 3.1, sintetizam-se os requisitos funcionais selecionados para a concepção do dispositivo funcional que foi integrado na mesa automatizada, para assim dotá-la de movimento angular, adicionalmente ao seu movimento no plano XYZ.

Tabela 3.1 - Requisitos funcionais utilizados na concepção e desenvolvimento do dispositivo.

Requisito	Comentário
Fixação concêntrica dos provetes	Permitir a fixação segura dos provetes, em um ou dois pontos, pela sua linha de eixo de maneira a manter a concentricidade depois de rodados.
Rotação faseada, em $\theta$ graus, entre 0-360°	O dispositivo deve permitir a rotação dos provetes livremente, ao longo de 360°, com movimento suave e faseado.
Robustez	Deve ter uma construção robusta, compacta e com o menor número de peças possível, de modo a minorar o aparecimento de folgas e oscilações.
Montagem/Desmontagem Fácil	Permitir uma rápida montagem/desmontagem no tempo da mesa XYZ.

Compatibilidade com a mesa XYZ preexistente	Tem de ser compatível com a mesa XYZ existente, permitindo fazer ajustes, alinhamentos de posição e não interferir com os seus componentes móveis.
Automação	É necessário ser automatizado, definindo-se apenas os parâmetros de ensaio prévios.
Custo de produção moderado	O custo total deve ser reduzido e com os recursos materiais existentes, nomeadamente com recurso a impressão 3D FDM.
Integração no VI da mesa XYZ e <i>interface</i> dedicada	O seu controlo deve estar integrado no VI existente e ter uma interface gráfica dedicada (GUI) que permita ao utilizador definir os parâmetros de ensaio de forma intuitiva.

### 3.2.3 – Desenvolvimento e Produção do Dispositivo

Tendo em conta os requisitos definidos, idealizaram-se e testaram-se algumas configurações diferentes para o dispositivo em *SolidWorks*, cuja versão final é apresentada na Figura 3.2. Visto ser um dispositivo que tem por finalidade END por CI, o seu movimento deve ser o mais preciso e suave possível pois o mínimo ressalto ou vibração pode gerar um efeito de *lift-off* na sonda. Optou-se por uma construção inteiramente em PLA<sup>5</sup> com recurso à impressora 3D FDM de polímeros, Prusa™ i3, disponível em laboratório. Com apenas um elemento de ligação em metal (bronze), um casquilho entre o motor passo-a-passo e o acoplador que segura amostra pela parte frontal. O dispositivo final produzido e impresso em PLA pode ser contemplado na Figura 3.3.

---

<sup>5</sup> O poliláctico (PLA ou ácido poliláctico) é um polímero constituído por moléculas de ácido láctico, com propriedades semelhantes as do tereftalato de polietileno (PET) e é biodegradável.

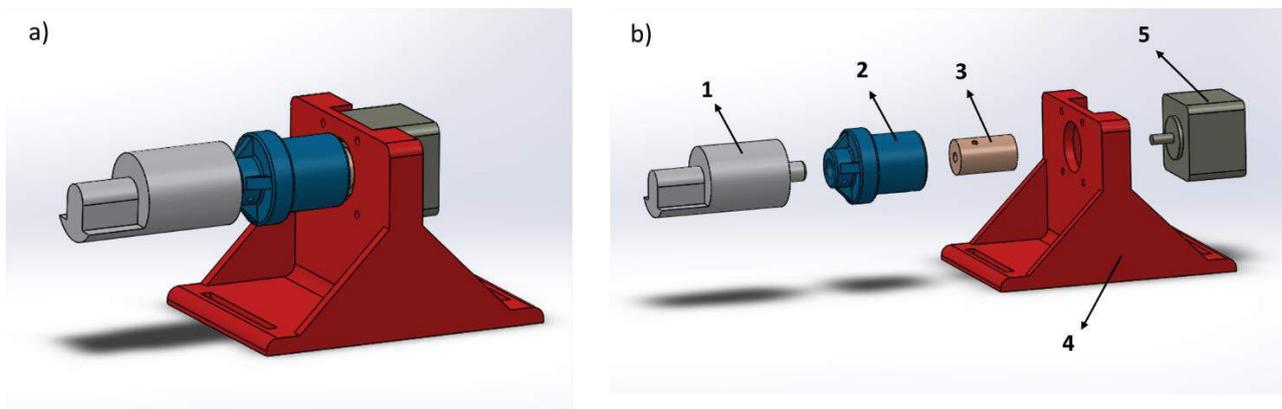


Figura 3.2 – Modelação geométrica do dispositivo para ensaios preliminares por CI.  
a) Desenho de conjunto em perspectiva, b) Desenho de conjunto com vista explodida.  
Nomenclatura: 1) Provete, 2) Acoplador, 3) Casquilho de bronze, 4) Base de suporte, 5) Motor passo-a-passo.

Utilizou-se um motor passo-a-passo *STH-39D1126* de 200 passos ( $1.8^\circ/\text{passo}$ ) para impor uma rotação controlada e faseada ao provete durante os ensaios. O motor bipolar é alimentado por um driver *L298N* que transmite o sinal digital proveniente de uma placa DAQ-6501 de aquisição de dados, da *National Instruments*, e que faz parte da mesa XYZ e é controlada por PC (ligação USB). Adaptou-se o VI existente para controlar o motor adicional e executar um movimento síncrono com o eixo X. Desenvolveu-se também uma nova interface gráfica para este tipo de geometrias, ilustrada na Fig. 3.4.

A movimentação pretendida para inspecionar os provetes consiste em: i) Fazer uma aquisição de sinal por varrimento ao longo do comprimento do provete (eixo X da mesa = eixo L do provete); ii) Recuar a sonda para o ponto de início novamente; iii) Rodar o provete em  $\theta$  graus, predefinidos; iv) Iniciar novo varrimento em X. Repetindo esta sequência em torno de todo o perímetro do provete é feito um mapeamento da condutividade elétrica em todo o êmbolo, como pretendido.

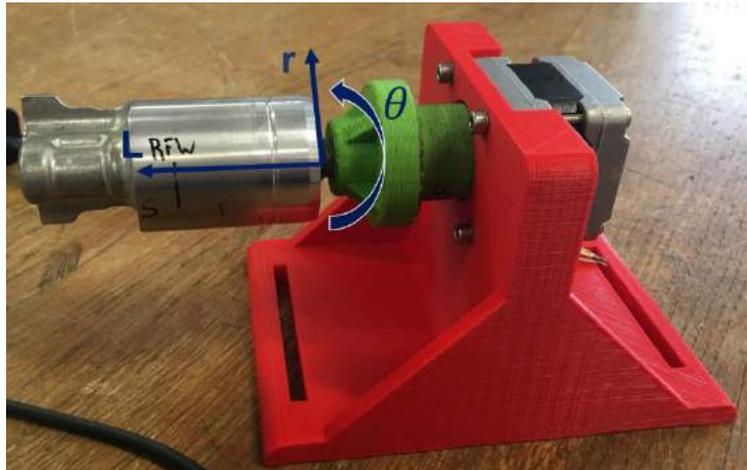


Figura 3.3 - Dispositivo funcional produzido com o provete #3 montado e identificação do referencial definido.

Verificou-se numa primeira abordagem, em testes preliminares que o motor aquecia consideravelmente com o decorrer do ensaio, e que depois de alguns minutos o calor era suficiente para ser transmitido pelo seu veio e pelo casquilho de bronze até ao acoplamento em PLA (a verde) e causar posteriores empenos e excentricidades no seu movimento rotacional. Note-se que este aquecimento é típico e inevitável nos motores passo-a-passo, pois quando estão parados numa determinada posição esta situação corresponde a um “bloqueio elétrico” por parte dos seus enrolamentos. Com vista a atenuar este fenómeno, redesenhou-se o acoplamento tornando-o mais robusto e comprido, maquinou-se um casquilho mais longo e espesso com intuito de dissipar melhor o calor proveniente do motor e reduzindo-se ainda a tensão de alimentação do *driver* com um regulador de tensão.

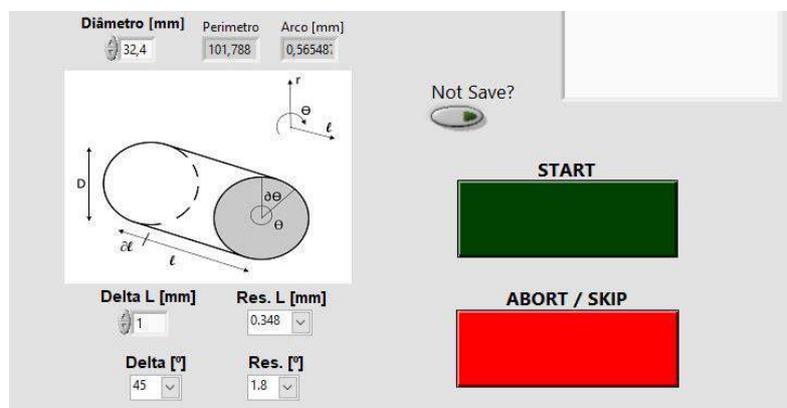


Figura 3.4 - Interface desenvolvida em LabVIEW para os ensaios de CI em provetes cilíndricos.

### 3.2.4 – Validação Experimental

Depois de garantida a robustez e o movimento mecânico suave do dispositivo, procedeu-se à montagem do mesmo na mesa XYZ, assim como de todo o aparato laboratorial periférico necessário a este tipo de ensaios (Fig. 3.5). Nesta etapa foi testada toda a compatibilidade do dispositivo com a mesa, quer a nível mecânico quer a nível eletrónico e de *software*, e executados vários ensaios (sem sonda) para aferir e afinar o movimento síncrono do dispositivo conforme pretendido. Adaptou-se o VI da mesa XYZ e criou-se uma nova interface para tornar intuitivo o procedimento para este tipo ensaios, permitindo assim a inspeção de qualquer tipo de provetes com geometria cilíndrica. É necessário digitar apenas no programa o valor do diâmetro ( $D$ ) da amostra, o curso de varrimento ( $\Delta L$ ), o curso de varrimento angular ( $\Delta\theta$ ) e a respetiva resolução espacial para cada uma das direções ( $L$  e  $\theta$ ), iniciando-se depois o ensaio.

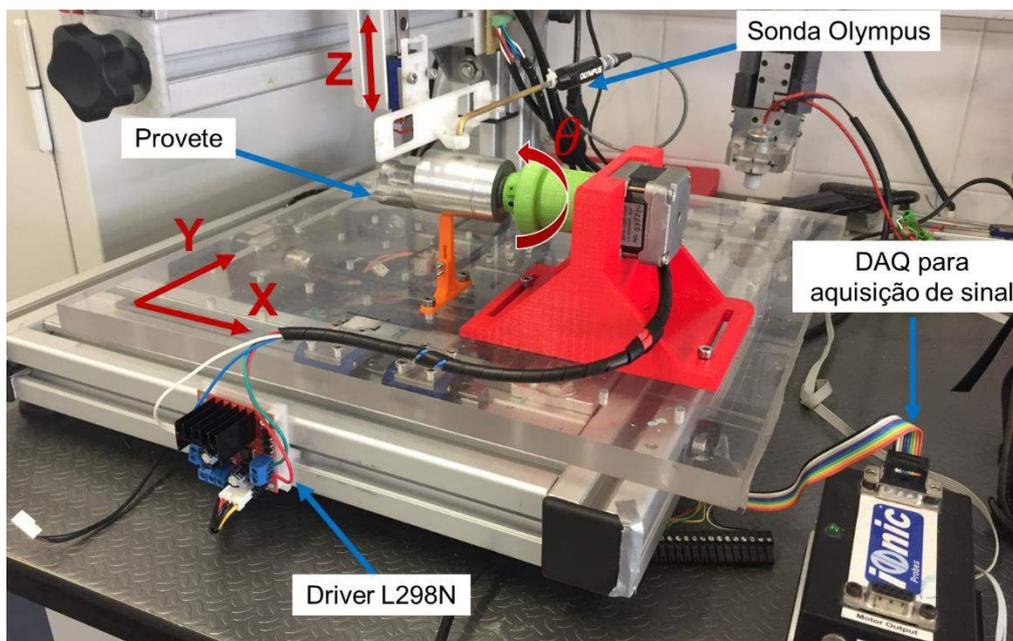


Figura 3.5 – Montagem do dispositivo funcional na Mesa XYZ com respetivo provete montado e sonda de CI.

Registou-se também um ligeiro fenómeno de “batimento”, no sentido radial (eixo Z), do provete aquando da sua rotação. Isto deveu-se ao facto do êmbolo estar fixo apenas por um ponto de apoio, assim como aos desvios geométricos da impressão 3D FDM. Para atenuar este efeito concebeu-se um pequeno apoio, tipo tripé, que está fixo ao tampo da mesa e serve de segundo ponto de apoio para o provete. Esta solução permitiu melhorar o seu movimento e evitar um batimento tão pronunciado. No entanto, do ponto de vista da sonda, tal fenómeno

não representa um problema sério, pois o suporte da sonda desliza numa guia linear (em Z) permitindo assim ajustes no sentido radial, evitando o efeito de *lift-off*.

De uma forma geral o dispositivo cumpriu os requisitos funcionais para os quais foi concebidos e foram obtidos os primeiros perfis de condutividade para os êmbolos em liga de alumínio.

### 3.3 – Procedimentos Experimentais

#### 3.3.1 – Descrição dos Provetes

Os provetes em estudo são êmbolos (ou pistões) em liga de alumínio e geometria oca foram obtidos pelo processo SFR entre duas partes cilíndricas de fundo copado, os quais foram posteriormente torneados (em aproximadamente 1mm) para remover a rebarba resultante do processo de soldadura. Por fim, são revestidos com uma camada de politetrafluoretileno (PTFE ou teflon™). Todo este processamento tem como objetivo reduzir a massa, inércia e o atrito no seu funcionamento como elementos dinâmicos de um compressor de AC automóvel.

O material do êmbolo é aparentemente o mesmo nas duas secções soldadas, cuja série é desconhecida, sabendo-se apenas a composição química (remeter à tabela 3.2) fornecida pela empresa. Dada essa composição, nomeadamente pela percentagem de cobre, estima-se que seja um alumínio da série AA4xxx. No entanto, os ensaios de condutividade elétrica (com sonda de quatro pontos e sonda de condutividade) sugerem que se deverá tratar de uma liga AA5xxx dado o seu valor médio de condutividade de 31,5 %IACS.

Tabela 3.2 - Composição química do material.

Alumínio	Titânio	Magnésio	Manganês	Cobre	Ferro	Silício
Bal.	0,2 Max	0,4 – 0,8	0,2 Max	3,5 – 5	0,5 Max	10,5 – 12,5

### 3.3.2 – Identificação dos Provetes

Para este estudo foram fornecidos pela empresa dois lotes de amostras, perfazendo um total de dez exemplares. O primeiro lote (Fig. 3.6a) consiste de três êmbolos, um deles em bruto (pós-soldadura) e outros dois já torneados. O segundo lote (Fig. 3.6b) consiste em sete êmbolos, três em bruto (pós-soldadura) e quatro êmbolos acabados e que colapsaram após ensaio.

Para efeitos de inspeção com END por CI só os provetes #2 e #3 são elegíveis, pois todos os outros apresentam ainda a rebarba de soldadura ou uma descontinuidade, o que impossibilita o acoplamento de uma sonda de correntes induzidas. É aliás esta a condição idealizada dos provetes num contexto de controlo de qualidade aquando da sua produção.

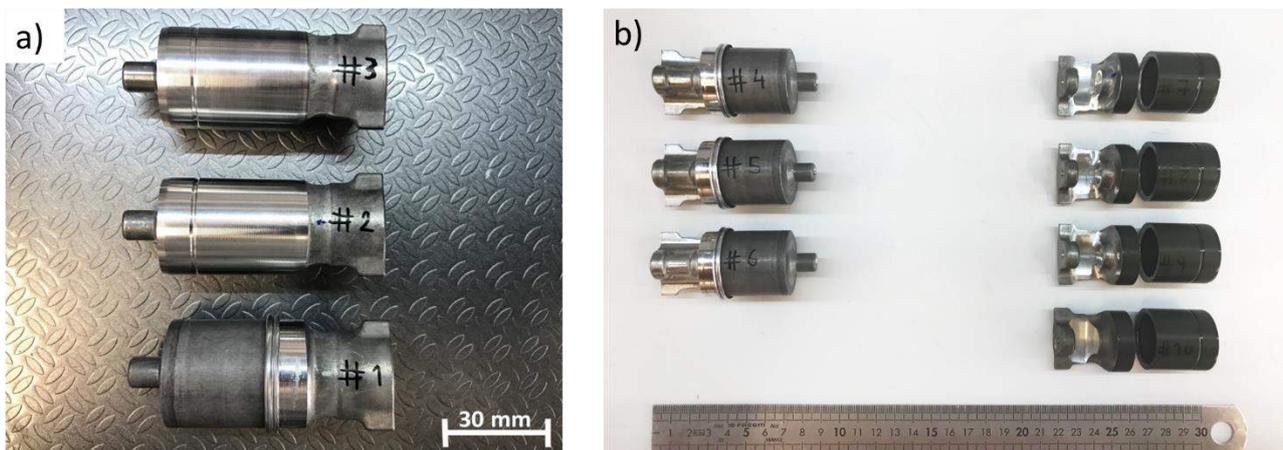


Figura 3.6 – Provetes de êmbolos em liga de alumínio inspecionados e respetiva numeração.  
 a) Primeiro lote recebido, provete #1 em bruto, #2 e #3 torneados, b) Segundo lote, provetes em bruto (#4-6) e colapsados (#7-10).

Procedeu-se à numeração das amostras e definiu-se um referencial de três eixos ( $r, l, \theta$ ) que representam respetivamente as direções radial, longitudinal e angular. O referencial e as respetivas cotas de um exemplar dos provetes analisados é ilustrado na Figura 3.7.

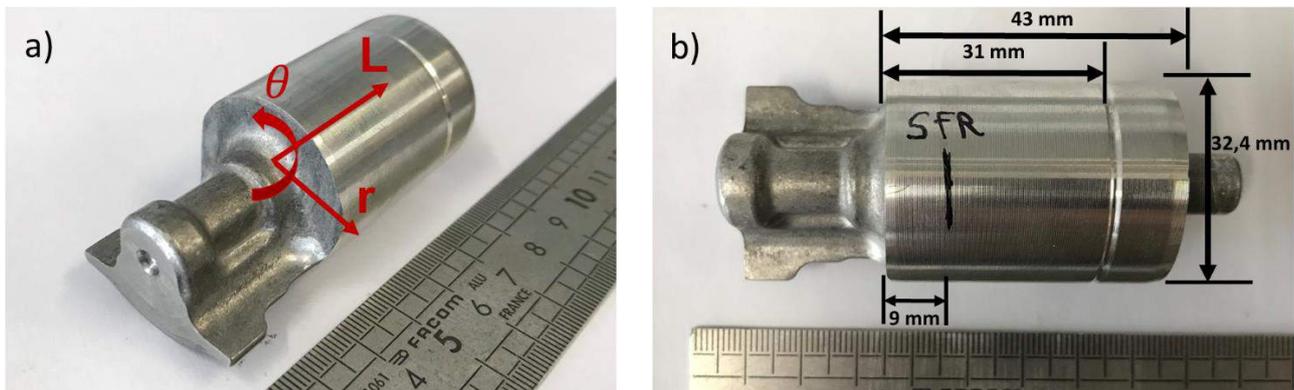


Figura 3.7 – Provete #2 com referencial e cotagens.

a) Em perspectiva, com representação do referencial definido para os ensaios, b) Cotas do provete com indicação do cordão de soldadura.

### 3.3.3 – Metalografia

A metalografia permite averiguar a existência de defeitos de solidificação como segregações, lacunas, entre outros possíveis defeitos decorrentes do processo de enformação plástica que o material sofreu. Este estudo metalográfico obedece a um procedimento experimental e sequenciado, que engloba o corte da amostra, polimento e posterior ataque químico para revelar as diferentes interfaces entre os constituintes (ou fases) do material. Outra grande vantagem, neste caso em concreto, é a avaliação do estado do material base previamente à união.

O objetivo final deste procedimento foi a obtenção de imagens micrografias e macrografias dos provetes em estudo, nomeadamente na zona da união, CS, ZTMA e a ZTA. A observação da microestrutura e crescimento de grão nestas zonas forneceu informação importante quanto ao efeito do processo no MB e à solidez da junta soldada.

No total foram cortados e analisados três provetes diferentes, o provete #1, #3 e #4. O primeiro e o terceiro foram cortados a  $\theta = 0^\circ$  e o segundo a  $\theta = 90^\circ$ , como ilustrado na Figura 3.1.

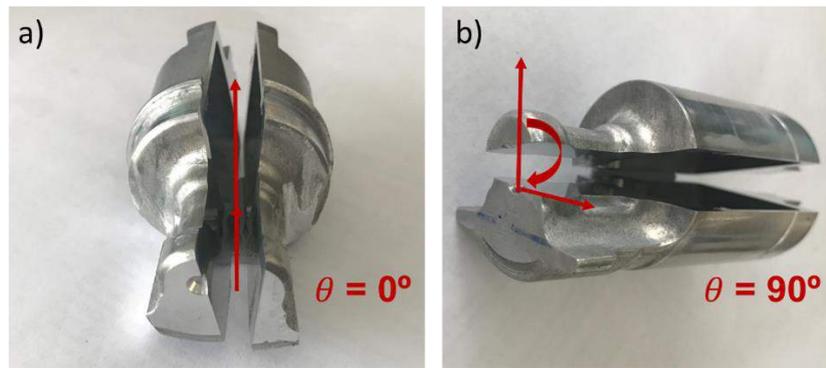


Figura 3.1 - Provete #1 e #3 após corte com serra  
a) Provete #1 cortado em  $\theta = 0^\circ$ , b) Provete #3 cortado em  $\theta = 90^\circ$ .

A identificação dos provetes seguiu a seguinte convenção: Cada metade do provete cortado foi denominada pelo respetivo número (#) da amostra seguido da letra “A” ou “B”, indicando cada uma das metades. As zonas identificadas como de interesse a observar depois do ataque químico foram as seguintes (ver Fig. 3.2):

- Zona 1** – Zona do CS;
- Zona 2** – ZTMA e ZTA à direita do CS;
- Zona 3** – ZTMA e ZTA à esquerda do CS;
- Zona 4** – Zona de MB da secção esquerda do provete;
- Zona 5** – ZTA mais à direita (3-4 mm) do CS;
- Zona 6** – Zona de MB da secção direita do provete.

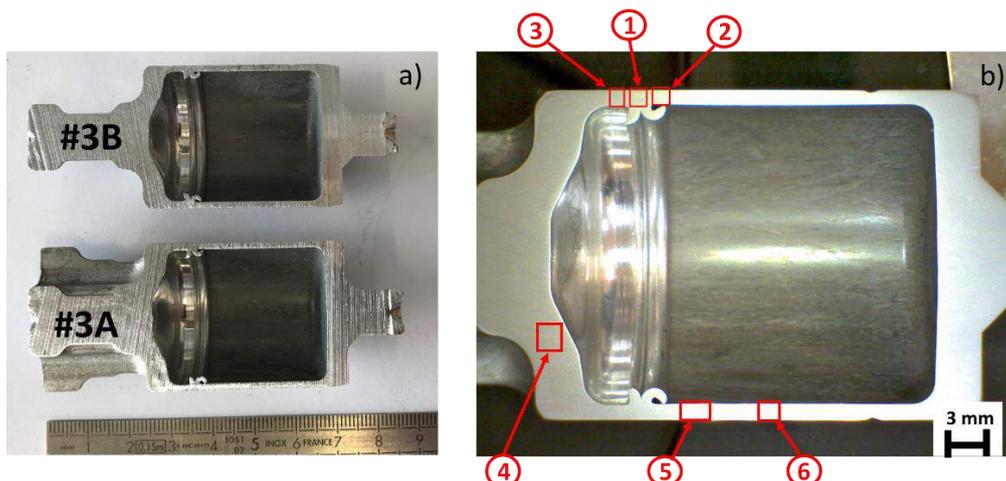


Figura 3.2 - Exemplo de identificação dos provetes após corte e polimento com identificação das respetivas zonas de interesse a observar ao microscópio.  
a) Provete #3 depois do corte com serra, b) Indicação das zonas de interesse a observar.  
Nomenclatura: (1) zona de CS, (2) ZTMA/ ZTA à direita do CS, (3) ZTMA/ZTA à esquerda do CS, (4) MB da secção esquerda, (5) Zona 4 mm à direita do CS, (6) MB da secção direita.

### 3.3.4 – Ensaio de Dureza de Vickers

Os ensaios de microdureza foram uma importante componente neste estudo, permitindo caracterizar melhor o material quanto ao tipo de liga do MB e efeitos do processo de SFR. Seria de esperar que a dureza de Vickers (Hv) se mantivesse constante no MB e que aumentasse junto ao CS, por ser uma zona fortemente recristalizada, e diminuísse nas ZTAs devido ao amaciamento e crescimento de grão nessas zonas.

Estes ensaios visaram complementar os END por CI e as micrografias realizadas anteriormente, podendo assim ser estabelecida uma correlação entre os resultados de dureza e END por CI, tendo em vista perceberem-se melhor os fenómenos envolvidos no processo de soldadura, os seus efeitos no material ou até a presença de defeitos.

Os ensaios de dureza foram executados com recurso a um indentador (*Mitutoyo - Hardness Testing Machine*<sup>6</sup>) com uma ponta em diamante diédrica, que aplica uma carga específica (de 0.1 a 0.5 Kg) sobre a amostra deixando uma impressão sobre a mesma. A área dessa impressão é determinada pela medida dos seus lados, sendo depois, e em função desse valor, calculada a pressão total exercida e o respetivo valor de dureza correspondente na escala de Vickers.

O procedimento de indentação   repetido sequencialmente e ao longo de um comprimento da amostra que se pretende analisar. A distância entre indenta es   relevante e deve ser calculada de acordo com o material e carga que se está a aplicar no provete, se for muito pequena a deforma o plástica promovida pela indenta o anterior afeta a seguinte. A distância entre indenta es (d) foi de cerca de seis vezes o tamanho do lado (L) da indenta o impressa, tal como ilustrado na seguinte figura 3.3.

---

<sup>6</sup> Este aparelho baseia-se na escala de dureza de Vickers que   um método de classifica o da dureza dos materiais bastante expedito e fiável, padronizado pelas normas ASTM E92 e ASTM E384.

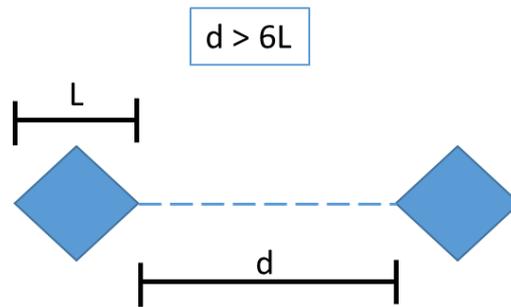


Figura 3.3 - Regra usada para estabelecer a distância entre indenta es.

Realizou-se um total de 16 ensaios para as seis metades dos provetes cortados, com diferentes cargas e com significativa resolu o espacial de forma a se obter um detalhado perfil de microdurezas. Os ensaios foram realizados a meia espessura (0,75 mm) e ao longo do comprimento ( $L$ ) da amostra, sentido esquerda para a direita, com um curso total de ensaio de 16 mm, como ilustra a Figura 3.4 abaixo. Os parâmetros utilizados nos ensaios são também detalhados na Tabela 3.3.

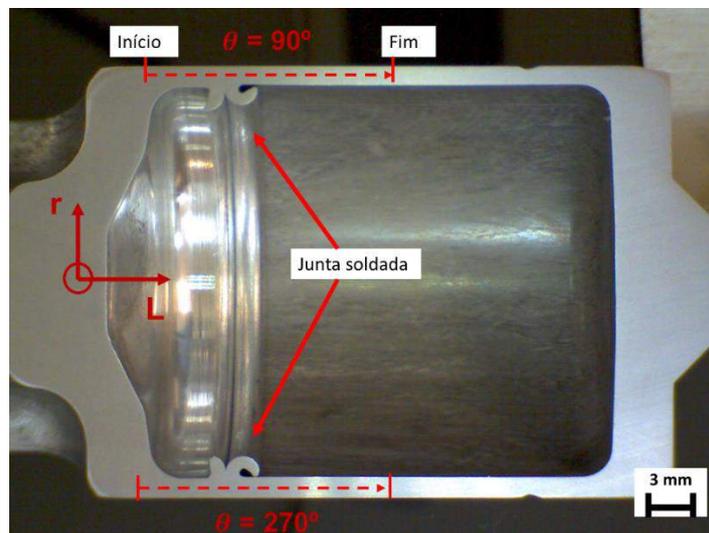


Figura 3.4 – Distância percorrida nos ensaios de dureza (provetes #3).

Tabela 3.3 - Parâmetros dos ensaios de dureza realizados.

Ensaio	Provete	Carga [Kg]	Resolução [mm]
1	#1A	0.3	0.5
2	#1A	0.2	0.25
3	#1B	0.5	0.6
4	#1B	0.5	0.6
5	#3A	0.3	0.5
6	#3A	0.3	0.5
7	#3B	0.3	0.5
8	#3B	0.5	0.6
9	#3B	0.3	0.5
10	#3B	0.5	0.6
11	#4B	0.3	0.5
12	#4B	0.3	0.5
13	#4A	0.5	0.6
14	#4A	0.5	0.6
15	#7A	0.5	0.6
16	#7A	0.5	0.6

### 3.3.5 – END por Correntes Induzidas

Os END por CI constituem a principal ferramenta de caracterização de material neste estudo e em torno da qual se deu mais foco, nomeadamente a nível do desenvolvimento de meios laboratoriais e posterior conceção de protótipo. O objetivo foi a obtenção dos perfis de condutividade dos provetes ao longo do seu comprimento e em torno de todo perímetro, de forma a descrever as tendências e variações na condutividade do material e a eventual presença de defeitos. Os primeiros END por CI foram realizados na mesa XYZ adaptada descrita anteriormente, no ponto 3.2. O seu aparato laboratorial é apresentado na Figura 3.5.

Equipamento utilizado nos END por CI preliminares foi o seguinte:

- Mesa XYZ adaptada;
- Dispositivo funcional concebido (descrito no ponto 3.2.3);
- Olympus Nortec 500;
- Sondas comerciais (100 KHz a 6 MHz);
- Computador com LabVIEW.

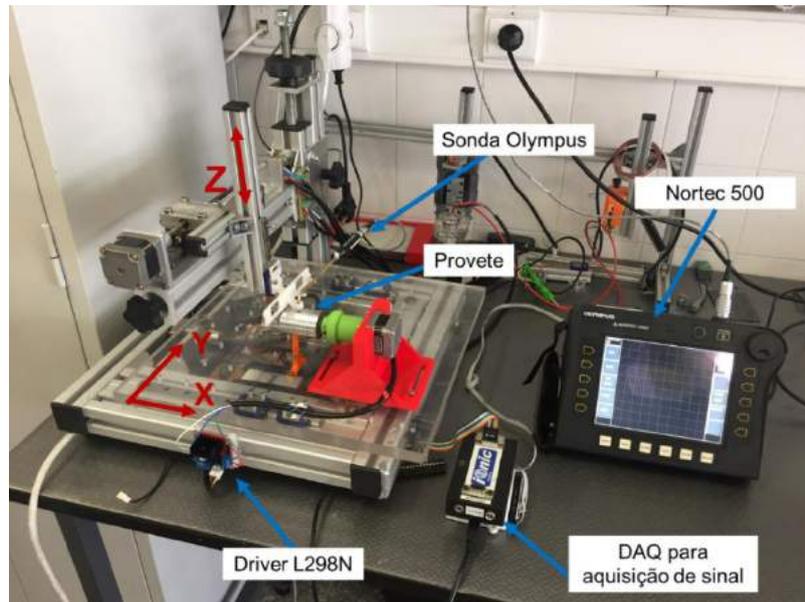


Figura 3.5 – Montagem laboratorial dos END por CI na mesa XYZ.

Na realização de END por CI deve-se ter especial atenção a alguns fenómenos e parâmetros de ensaio, dos quais se destacam os seguintes:

- Calibração da sonda para o material a inspecionar: O que corresponde calibrar a sonda para um determinado ângulo de fase para que todas as variações no plano de impedâncias se deem sobre o eixo real, facilitando assim a visualização dos resultados;
- *Lift-off* da sonda: Aquando do seu movimento retilíneo pode acontecer que a mesma levante ou descole da superfície da peça mais do que um determinado valor máximo aceitável, dando origem a leituras erradas ou defeitos dissimulados;
- Escolha das frequências de inspeção: A profundidade de inspeção varia com a frequência e tipo de liga do material, de modo que é essencial verificar quais as frequências mais eficazes e com menos ruído na inspeção do provete;
- Seleção do Ganho da sonda: Este parâmetro funciona como um “zoom” do sinal de impedância proveniente da sonda, deve estar dentro de uma gama adequada de valores de modo a que se visualizem bem os resultados mas sem que o sinal sature.

Depois de acautelados os parâmetros referentes à sonda acima mencionados, o ensaio é controlado por uma interface em *LabVIEW* onde se posiciona a sonda no ponto de início pretendido, com um cursor, escrevem-se os parâmetros da sonda previamente selecionados e escolhem-se os parâmetros de movimento para o ensaio, nomeadamente:

- Curso da sonda ( $\Delta L$ );
- Resolução espacial [mm]: Distância mínima entre pontos de aquisição;
- Curso angular ( $\Delta \theta$ );
- Resolução angular [°]: Distância angular mínima entre pontos de aquisição.

As tabelas A1 e A2, em Anexos, resumem todos os parâmetros de ensaio utilizados nos END por CI em todas as amostras inspecionadas (#1 a #6) para diferentes frequências. Todas as amostras inteiras (cilíndricas e torneadas) foram inspecionadas com os mesmos parâmetros de movimento: um curso da sonda de 20 mm, uma resolução espacial de 0.5 mm e uma resolução angular de 45°.

As frequências com melhor relação sinal/ruído correspondem a 100-500 kHz, obtendo-se também um bom resultado para 1 MHz. Acima deste valor, e dado o tipo de material, já se está a inspecionar o material muito à superfície (pouca penetração das correntes), o que não tem interesse relevante para avaliar a soldadura. O ponto de início dos ensaios foi determinado experimentalmente como sendo localizado a aproximadamente 3 mm do bordo do provete, evitando assim o efeito de *lift-off* da sonda.

### 3.4 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo descreveram-se os trabalhos de preparação e desenvolvimento de meios laboratoriais, nomeadamente a adaptação da mesa XYZ presente em laboratório, assim como os outros procedimentos experimentais. Os trabalhos de adaptação requereram a conceção e produção de um dispositivo funcional para os END por CI, sendo que o seu desenvolvimento e afinação tomaram grande parte do procedimento experimental desta dissertação. No final obteve-se um resultado bastante satisfatório e que poderá também vir a ser útil para futuros trabalhos na inspeção de geometrias igualmente cilíndricas.

Descreveu-se o procedimento experimental de caracterização dos provetes, quer a metalografia, ensaios de dureza e END por CI com a mesa XYZ adaptada. Todos eles com um

procedimento e normas muito específicas que é necessário acautelar para se obterem bons resultados. De uma forma geral os resultados obtidos foram claros e bastante úteis na caracterização do MB e da junta soldada. Com efeito, e tendo em conta os resultados obtidos nos END por CI, torna-se necessário produzir e validar um protótipo funcional de END, especialmente dedicado, para inspeção dos êmbolos.



## **4 – DESENVOLVIMENTO, PRODUÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO FUNCIONAL DE END**

### **4.1 – Introdução**

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento, produção e validação experimental de uma primeira versão de um protótipo funcional de END para inspeção de êmbolos, tendo em vista a sua aplicação industrial. Pretende-se que o protótipo seja automatizado e portátil, permitindo fazer um controlo de qualidade expedito após o torneamento dos êmbolos.

### **4.2 – Requisitos Funcionais do Protótipo**

Os requisitos funcionais estabelecidos para a conceção do protótipo funcional de END encontram-se resumidos na Tabela 4.1, seguidamente apresentada.

Tabela 4.1 - Requisitos funcionais do protótipo funcional de END por CI.

Requisito	Comentário
Ser automatizado	Completa automação dos ensaios sem interferência do operador, escolhendo-se apenas os parâmetros do mesmo.
<i>Design</i> compacto e leve	Construção compacta e leve, pois deve apresentar integridade e facilidade no seu manuseio em cenário de fábrica.
Possibilidade de acomodar diferentes sondas	O suporte para as sondas de CI deve ser versátil e permitir acomodar diferentes tipos e formas de sondas comerciais, garantindo sempre o seu alinhamento com o provete.
Fixação concêntrica dos provetes e em dois pontos	A fixação dos provetes deverá ser pela sua linha de eixo e em dois pontos de apoio, de forma a garantir uma rotação concêntrica e paralelismo ao eixo horizontal.
Encaixe/Desencaixe rápido dos provetes	O protótipo será utilizado num contexto de controlo de qualidade pós-fabricação, deve permitir assim um expedito encaixe/desencaixe dos provetes.
Garantir contacto permanente entre a sonda e o provete	É de extrema importância evitar o efeito de <i>lift-off</i> durante o ensaio, para isso há que garantir um contacto permanente da sonda com o provete.
Custo reduzido de produção	O custo de produção total do protótipo deve ser relativamente reduzido e concebido com os recursos presentes em laboratório.
Acomodação de todos os componentes	O protótipo deverá ser modular, facilitando a sua montagem/desmontagem, e deve agregar todos os componentes (mecânicos, elétricos, etc) numa só estrutura ou quadro.
Interface intuitivo com o utilizador (GUI)	Um GUI para definir os parâmetros de ensaio e de movimento da sonda.

### 4.3 – Conceção e Desenvolvimento da Componente Mecânica

Desenvolveram-se algumas hipóteses de montagem em *SolidWorks* e optou-se por uma solução compacta e com recurso a componentes comerciais ou impressos na impressora 3D FDM de polímeros. O protótipo final concebido, apresentado na Figura 4.1, consiste essencialmente de dois módulos, uma componente fixa e outro móvel.

Quanto à componente fixa, esta consiste de um quadro retangular em perfis Bosch que serve de estrutura base a todo o protótipo, conferindo-lhe integridade. Este quadro acomoda no seu interior todos os componentes eletrónicos responsáveis pela sua alimentação e controlo. Tem quatro pés de apoio para o permitir assentar em qualquer superfície e eliminar vibrações, na parte de cima acomoda uma guia linear e um apoio para um motor passo, responsável pelo seu movimento longitudinal (ao longo do comprimento,  $L$ ) através de um fuso. No lado oposto ao da guia linear existe um poste (também em perfil Bosch) ajustável e que acomoda um braço basculante, inteiramente impresso em PLA. Este braço serve para acomodar o suporte das sondas que corre sobre uma pequena guia linear também, garantindo assim o contacto permanente da sonda com o provete.

A componente móvel consiste de toda a parte que se move durante os ensaios e é constituída por um conjunto que corre sobre a guia linear da estrutura fixa. Este carro aloja o motor passo-a-passo responsável pelo movimento de rotação (ao longo de  $\theta$ ) e fixa a amostra em dois pontos, um do lado do motor através de um suporte em PLA e que está ligado a um casquilho, e outro na parte traseira do provete através de um encaixe (tipo negativo) com mola. Permitindo assim ao operador encaixar e desencaixar rapidamente os provetes para ensaio. A solução e respetivos componentes pode ser contemplada na figura 4.2.

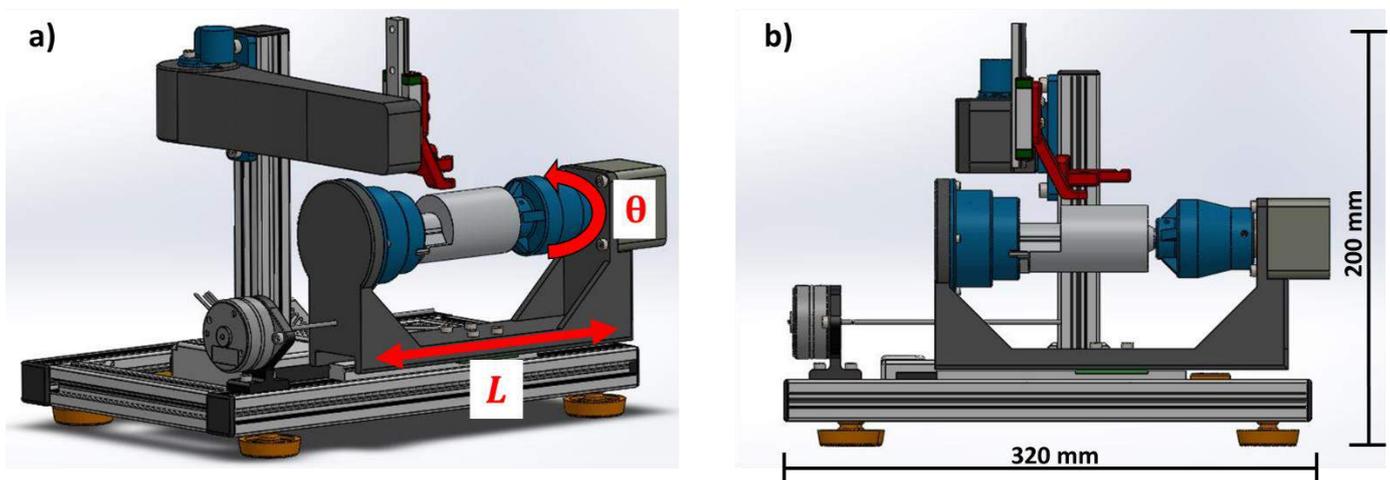


Figura 4.1 – Modelação tridimensional da solução desenvolvida, montada e com o provete  
a) Vista em perspetiva com indicação dos eixos de movimento; b) Vista frontal com cotas de atravancamento.

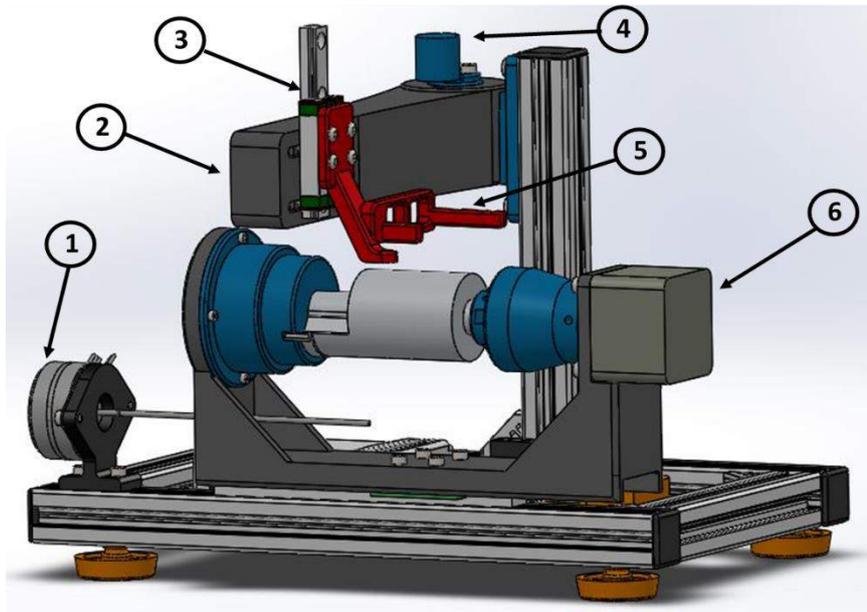


Figura 4.2 – Vista tridimensional do desenho de conjunto do protótipo funcional modelado. Nomenclatura: Motor passo-a-passo de movimento longitudinal (1), braço basculante (2), guia linear para o suporte da sonda (3), tranca (4), suporte da sonda de CI (5), Motor passo-a-passo de movimento angular (6).

O mecanismo de braço basculante, ilustrado na figura 4.3, desvia facilmente para o lado de forma a permitir ao operador aceder ao êmbolo. O braço dispõe de uma tranca-mola que o mantém bloqueado na posição de inspeção, Fig. 4.3a.

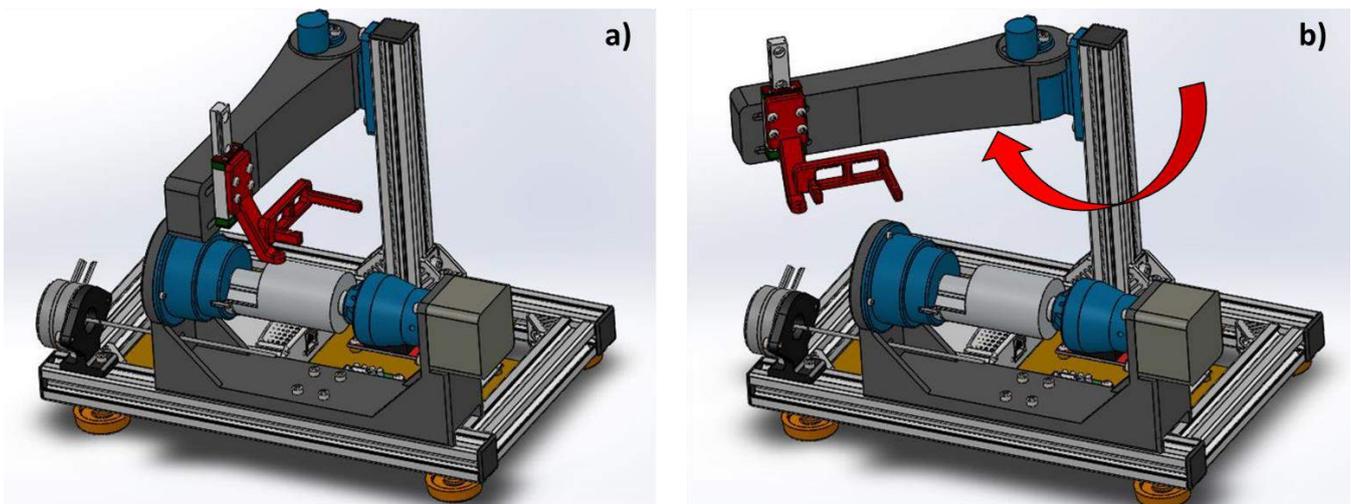


Figura 4.3 – Vista tridimensional em perspetiva do movimento do braço basculante. a) Braço posicionado para o ensaio, em cima do provete, b) Braço desviado para permitir a desmontagem do provete.

A componente móvel do protótipo pode ser observada isoladamente na figura 4.4. Esta componente aloja o motor passo-a-passo responsável pela rotação do êmbolo, mantendo-o ao mesmo tempo fixo e alinhado através de dois encaixes-fêmea nas suas extremidades. Um dos encaixes é deslizante e possui uma mola no seu interior, com a pressão de dois dedos o êmbolo é libertado da sua posição fixa, como ilustrado na Fig. 4.5.

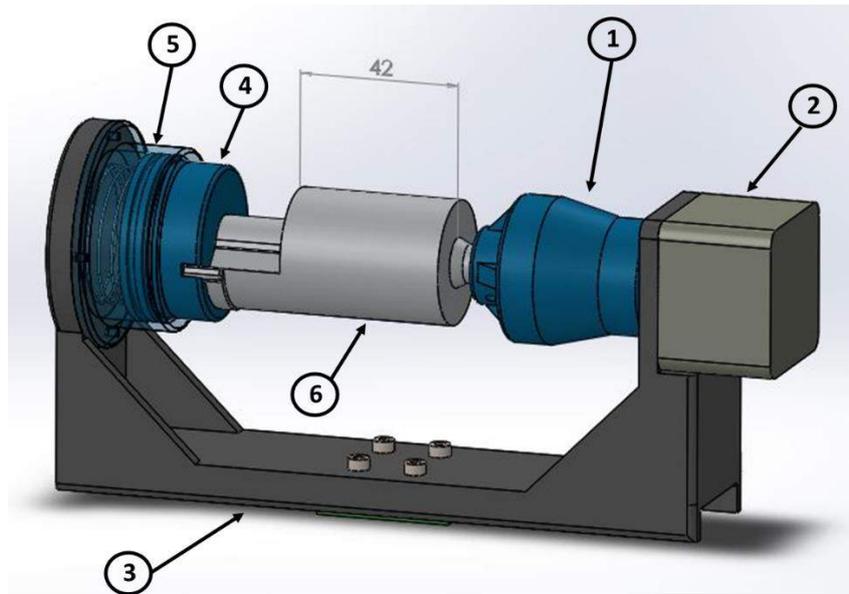


Figura 4.4 – Representação tridimensional semitransparente da componente móvel do protótipo. Nomenclatura: Acoplador que fixa o provete (1), motor passo de movimento rotacional (2), suporte móvel (3), encaixe deslizante para fixar o provete atrás (4), mola axial interna (5), provete (6).

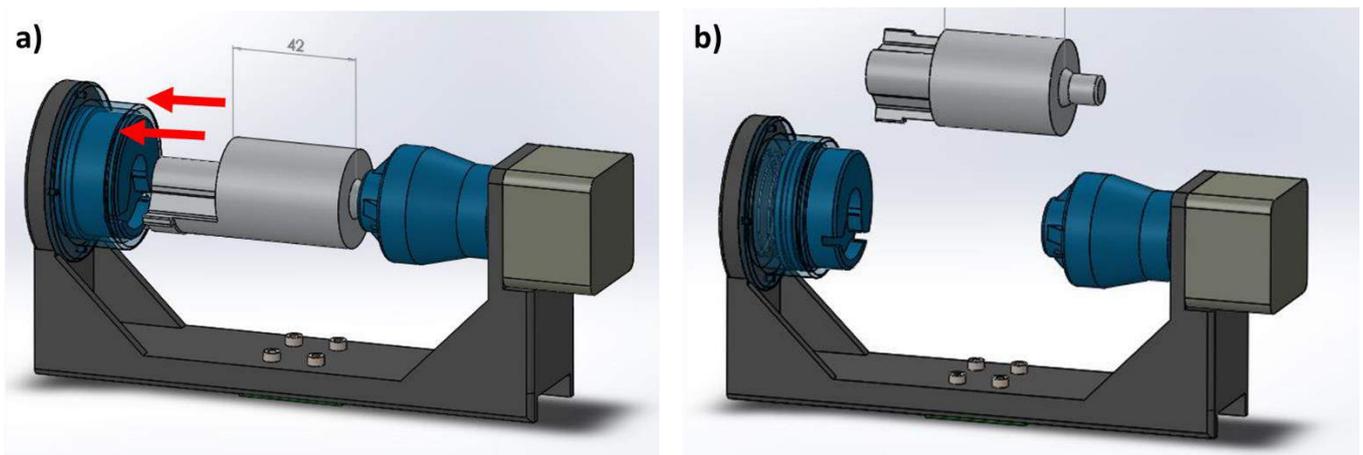


Figura 4.5 – Vista tridimensional semitransparente da componente móvel do protótipo e respetivo mecanismo de fixação do provete.

a) O encaixe desloca-se para trás com a pressão de dois dedos, b) Provete solto.

#### 4.4 – Produção do Protótipo

Como foi referido, a produção do protótipo foi maioritariamente conseguida com recurso a componentes impressos na impressora 3D FDM (em PLA) e a perfis e acessórios Bosch, o que lhe conferiu um peso e custo final consideravelmente reduzidos. Pode ser contemplado em perspetiva na Fig. 4.6.

A solução de montagem é completamente modular, podendo ser facilmente substituído ou melhorado qualquer um dos seus componentes; Esta é aliás uma das vantagens deste tipo de abordagem construtiva com recurso a manufatura aditiva. A arrumação dos componentes eletrónicos foi conseguida através de um tabuleiro no interior do quadro retangular em perfil Bosch que serve de estrutura matriz ao protótipo, conforme ilustrado na Fig. 4.7.

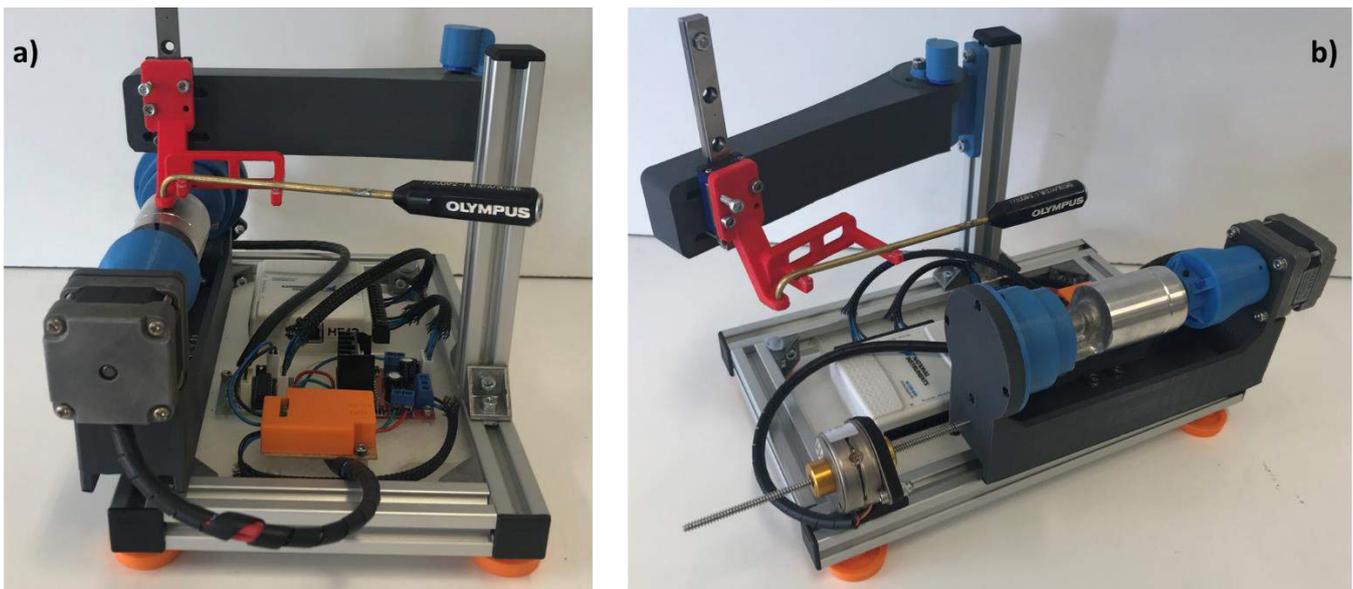


Figura 4.6 – Protótipo funcional produzido.

a) Vista lateral com sonda montada para os ensaios, b) Vista em perspetiva com o braço basculante desviado.

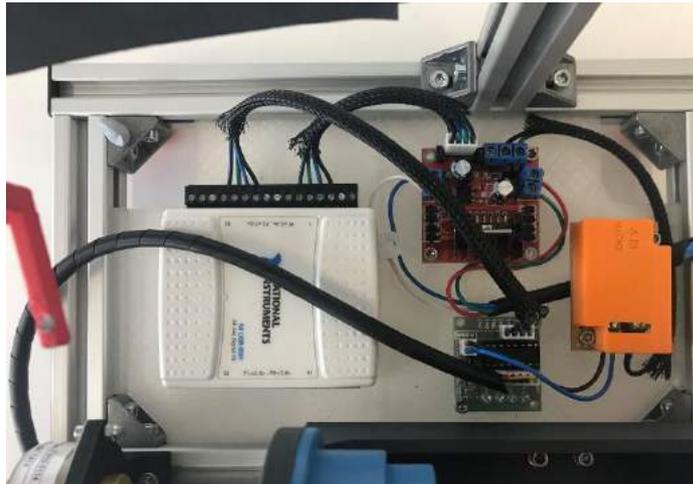


Figura 4.7 – Vista de topo da arrumação dos componentes eletrônicos e DAQ.

#### 4.5 – Componente Eletrônica e de Controle

Ambos os motores passo-a-passo são controlados por *drivers* (UNL2003 para o motor de movimento longitudinal e L298N para o de rotação) alimentados com 12 V DC. Esses *drivers* recebem o sinal de controle de uma placa DAQ-6501 da *National Instruments* que tem ligação por USB ao computador. Essa placa é por sua vez controlada por uma GUI em *LabVIEW* em tudo semelhante à interface de controle do dispositivo funcional projetado no Capítulo 3.

No programa são definidos todos os parâmetros de ensaio (curso e resolução espacial do movimento em  $L$  e  $\theta$ ), digitam-se os parâmetros utilizados no Nortec 500 (frequência, ganho e ângulo de fase) e posiciona-se a sonda no ponto de início pretendido. Esta interface gráfica apresenta ainda, e em tempo real, o sinal de variação de impedância ( $\vec{Z}$ ) recebido pela sonda, gerando uma superfície polar em função de  $L$ ,  $\text{Re}(\vec{Z})$  e  $\theta$ . Esta superfície é o mapeamento da condutividade elétrica do êmbolo.

#### 4.6 – Validação Experimental

Foram realizados vários ensaios para validação experimental do protótipo, inicialmente sem provete nem sonda, para verificar o correto movimento mecânico. Foram realizadas algumas afinações e verificou-se que o movimento é preciso, alinhado, sem qualquer sobreaquecimento ou fenómeno de “batimento” verificado nos ensaios anteriores com a mesa XYZ adaptada. O

contacto entre a sonda e o provete é sempre garantido e a deslocação da sonda em  $L$  e  $\theta$  é suave e livre de oscilações.

Foram posteriormente realizados vários ensaios com sondas de CI comerciais, e para diferentes parâmetros de inspeção, com o intuito de se validarem os resultados obtidos anteriormente com a mesa XYZ.

#### **4.7 – Síntese do Capítulo**

Neste capítulo descreveu-se a conceção e produção de um protótipo funcional de END para controlo de qualidade em ambiente industrial. O protótipo produzido corresponde aos requisitos funcionais para os quais foi concebido e apresenta um funcionamento suave e preciso nos ensaios realizados. Teve um custo de produção relativamente baixo e é leve e portátil, possibilitando a inspeção expedita em êmbolos cilíndricos semelhantes aos analisados neste trabalho. Permite ainda acomodar diferentes tipos de sondas e garante o contacto permanente entre as sondas e a superfície da amostra, evitando o efeito de *lift-off*. Comprova-se assim a capacidade e potencial deste protótipo em fazer o controlo de qualidade, pós-produção, deste tipo de componentes através da análise do perfil de condutividade elétrica gerado.

## **5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS**

### **5.1 – Introdução**

Neste capítulo apresentam-se os resultados da análise metalográfica, ensaios de dureza e END por CI. Estes últimos foram realizados segundo duas fases, uma mais preliminar e laboratorial com recurso à mesa XYZ adaptada e outra com o protótipo funcional produzido e descrito no capítulo anterior.

### **5.2 – Análise Metalográfica**

#### **5.2.1 – Macrografias**

Apresentam-se de seguida algumas macrografias (Figuras 5.1 a 5.6) realizadas aos cordões de soldadura. De um ponto de vista macroscópico todos os provetes apresentam um cordão bem soldado, sem fissura, zonas descoladas ou poros e com uma rebarba bem consolidada, não se identificando a esta escala qualquer evidência que permita distinguir a qualidade entre diferentes provetes.

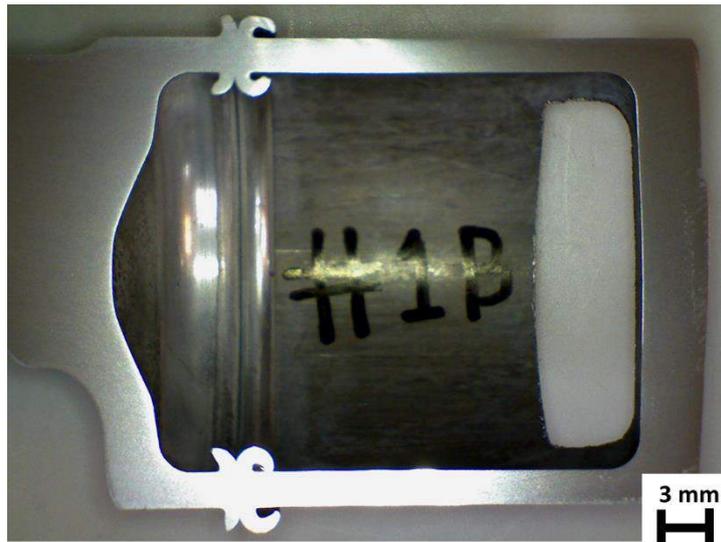


Figura 5.1 - Macrografia do provete #1B cortado e após polimento.

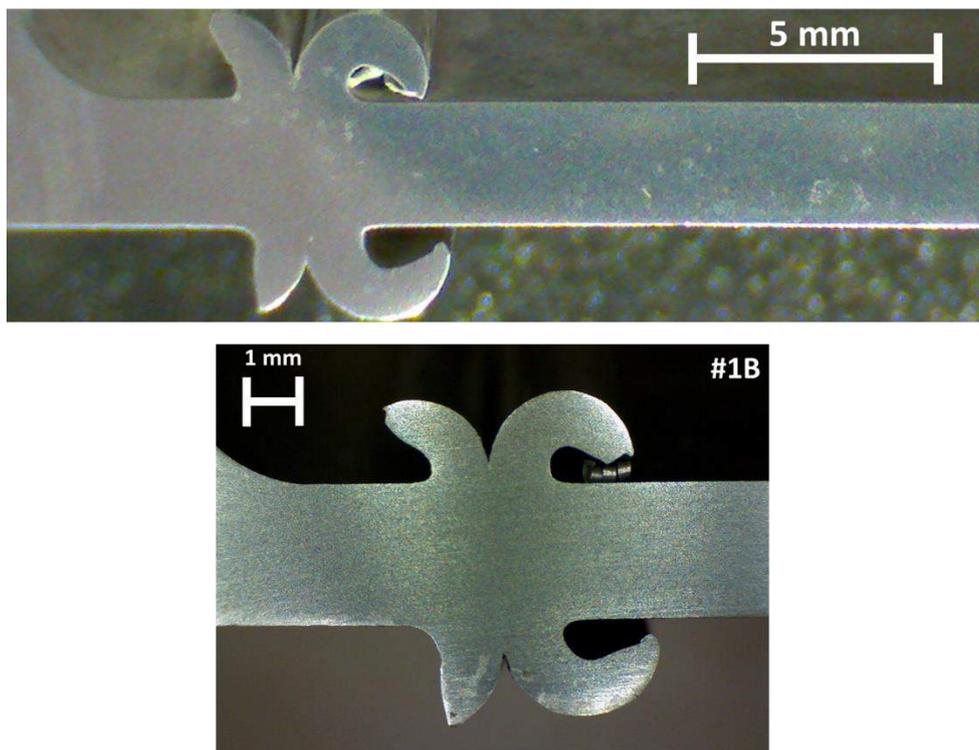


Figura 5.2 - Macrografias do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ).

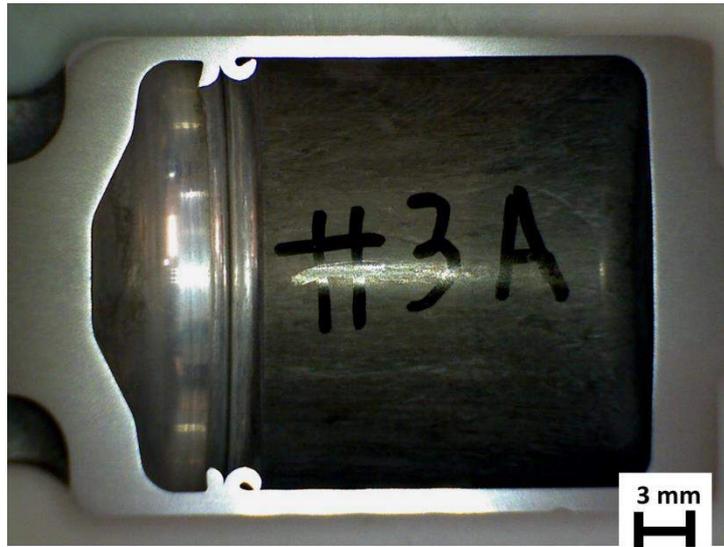


Figura 5.3 - Macrografia do provete #3A cortado e após polimento.

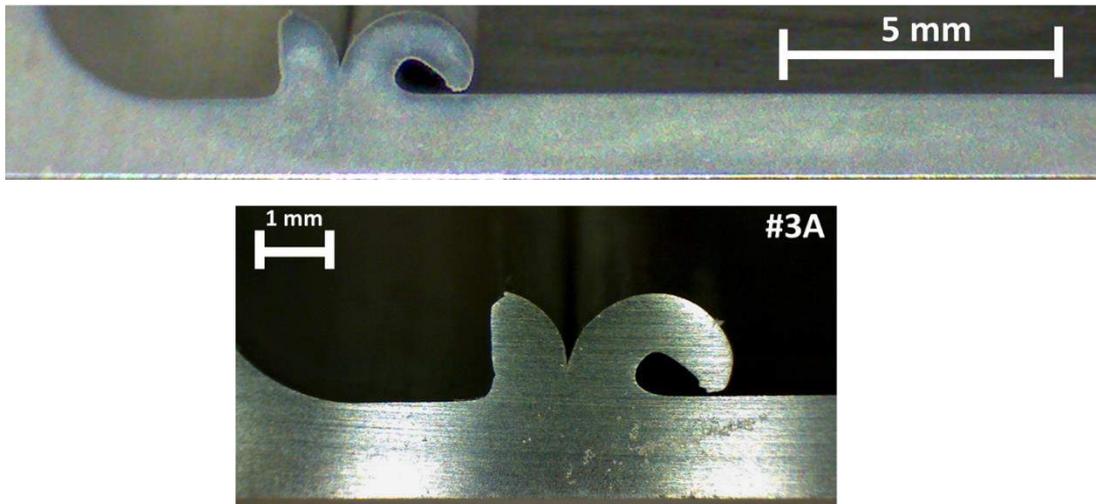


Figura 5.4 - Duas macrografias do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ).



Figura 5.5 - Macrografia do provete #4B cortado e após polimento.

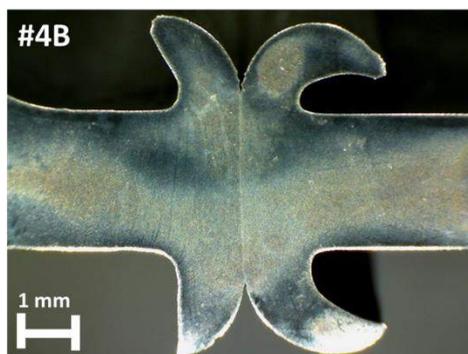
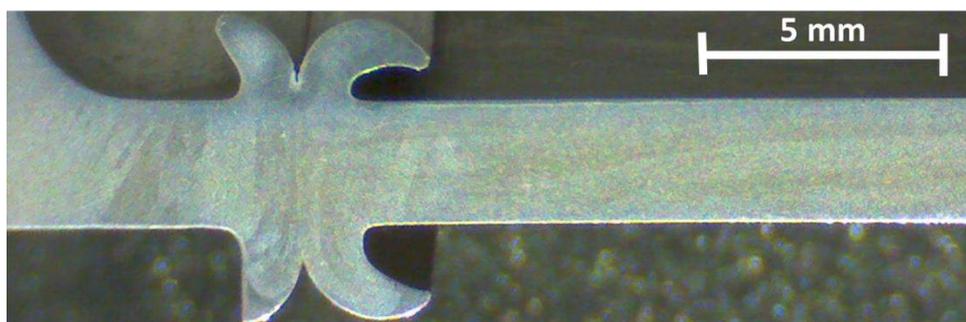


Figura 5.6 - Duas macrografias do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ).

### 5.2.2 – Micrografias

Os resultados foram consistentes para todas as seis metades analisadas, apresentando apenas algumas heterogeneidades marginais no que se refere à zona do CS e ao MB. Em geral a junta soldada aparenta boa ligação e sem a presença evidente de porosidades ou zonas com falta de ligação. Algumas interfaces apresentaram sinais de alinhamento de óxidos, o que

---

poderá indicar uma de duas situações: i) atmosfera pouco controlada durante o processo de união; ii) um fluxo visco-plástico insuficiente de material para fora da interface, causados pela escolha inadequada de parâmetros de processo ou algum possível fator de ruído durante o processo.

Adicionalmente, junto à zona superior do cordão onde a rebarba de soldadura se começa a formar, há um potencial ponto de propagação de fissura (em alguns provetes) se os esforços de tração forem consideráveis (figura A20 – Anexos).

Quanto ao MB (possivelmente alumínio da série AA4xxx) é evidente uma diferença nas tecnologias de enformação plástica utilizadas na obtenção de cada uma das metades do êmbolo, dado o seu tamanho de grão e microestrutura. A metade à esquerda do CS (zona 3) apresenta um bom acabamento geral e uma microestrutura que indiciam o processo de fundição injetada (Figuras 5.24 e 5.25), com algumas porosidades espectáveis. Dado também o seu acabamento macro no interior da peça, liso e polido, tudo indica que terá sido posteriormente forjada (Figuras 5.7 e 5.16). Relativamente à metade à direita do CS (zona 2), esta apresenta algumas segregações e uma microestrutura visivelmente encruada, especialmente junto aos bordos da peça (Figuras 5.13 e 5.14), o que leva a querer que foi obtida por extrusão inversa por impacto; Sendo este o processo que faz mais sentido para obtenção da sua geometria de fundo copado.

Seguidamente apresentam-se as micrografias realizadas em dois dos provetes (#3 e #4) cortados, polidos e contrastados. Analisaram-se seis zonas de interesse (numeradas) e para diferentes ampliações: 50x, 100x, 200x e 500x com escalas de 500, 200, 100 e 50  $\mu\text{m}$ , respetivamente. Os restantes resultados, para outros provetes, encontram-se em Anexos (A4 – pp. 104).

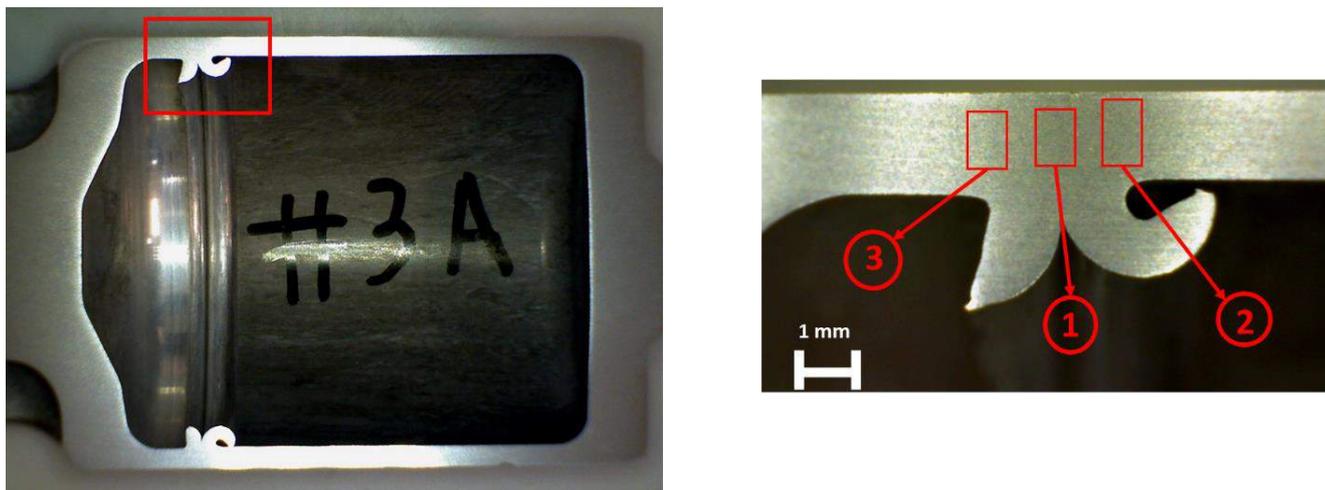


Figura 5.7 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse.

Nomenclatura: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA à direita do CS; 3) ZTMA e ZTA à esquerda do CS.

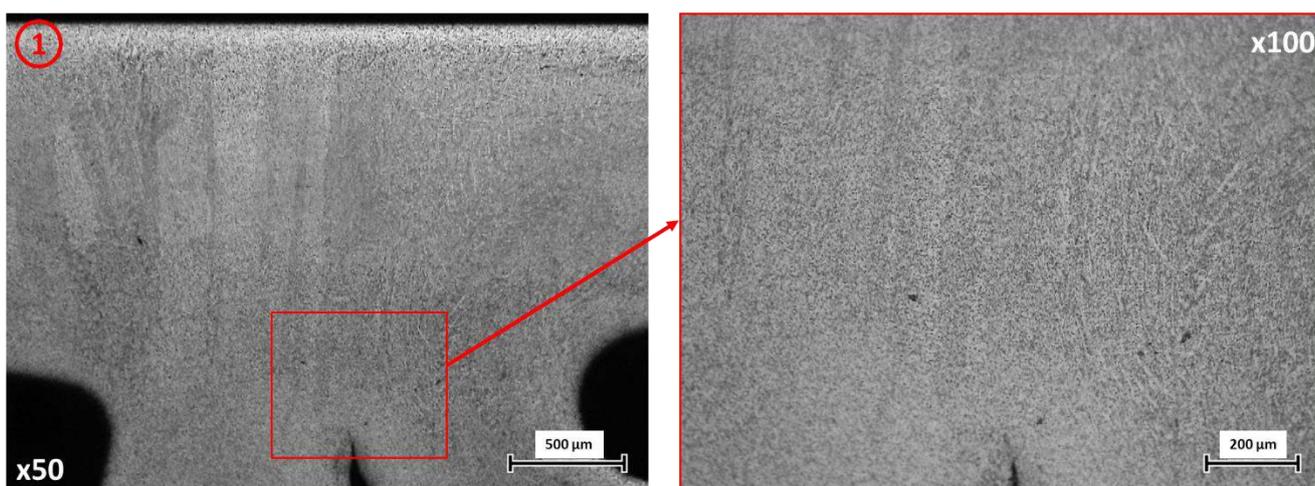


Figura 5.8 - Micrografia do provete #3A ampliada em 50x e 100x da zona 1.

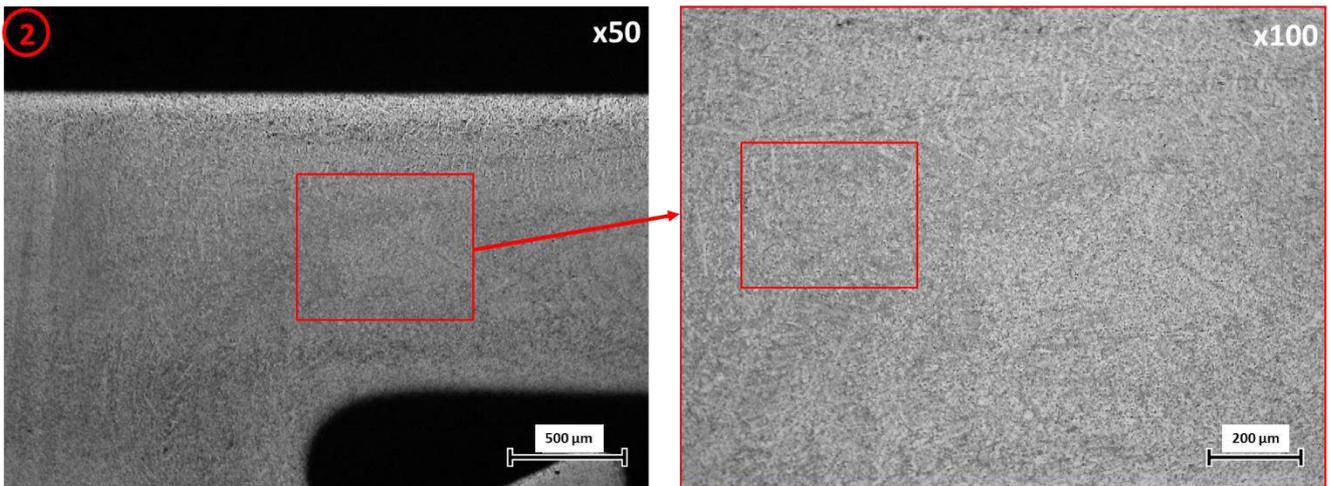


Figura 5.9 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.

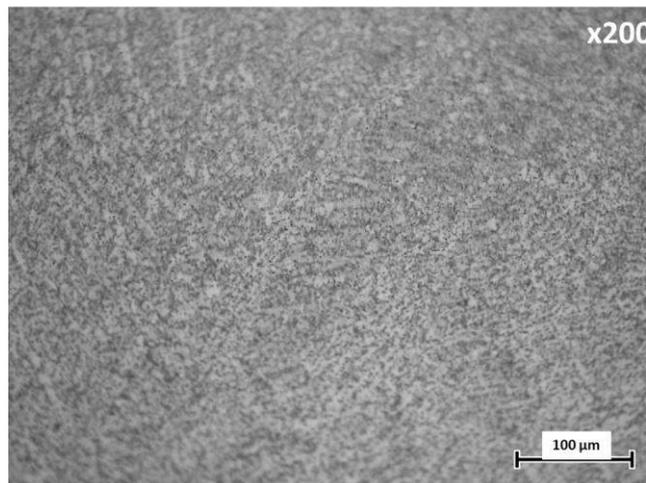


Figura 5.10 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 2.

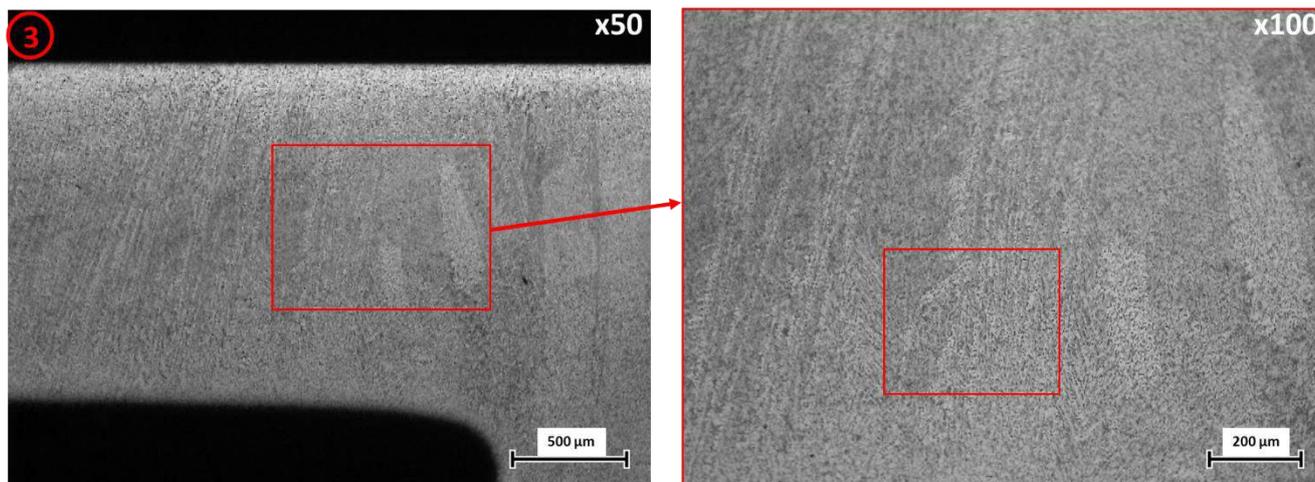


Figura 5.11 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.

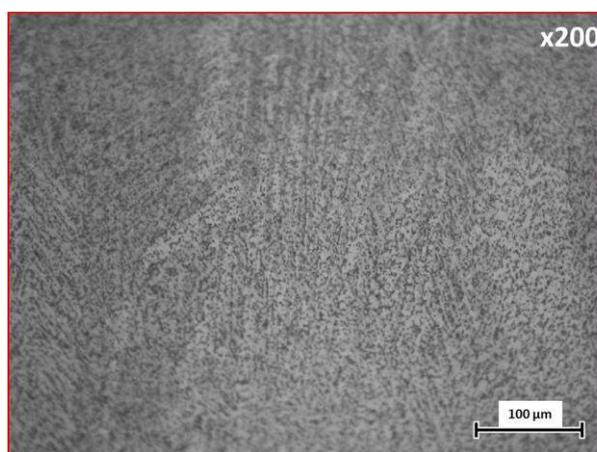


Figura 5.12 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 3.

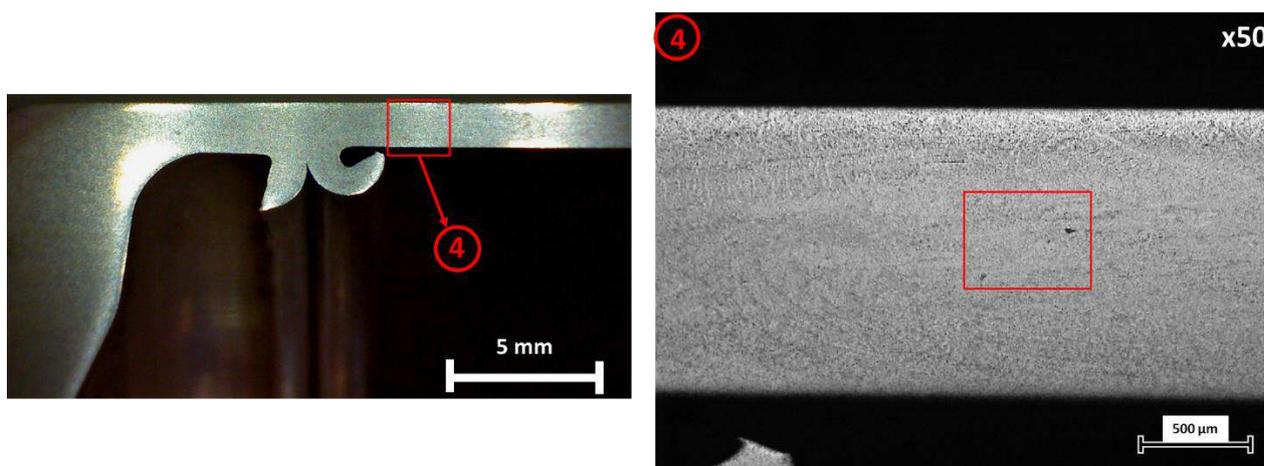


Figura 5.13 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ), na zona da união, com identificação de zona de interesse.

Nomenclatura: 4) Zona mais 3 ou 4 mm à direita do CS.

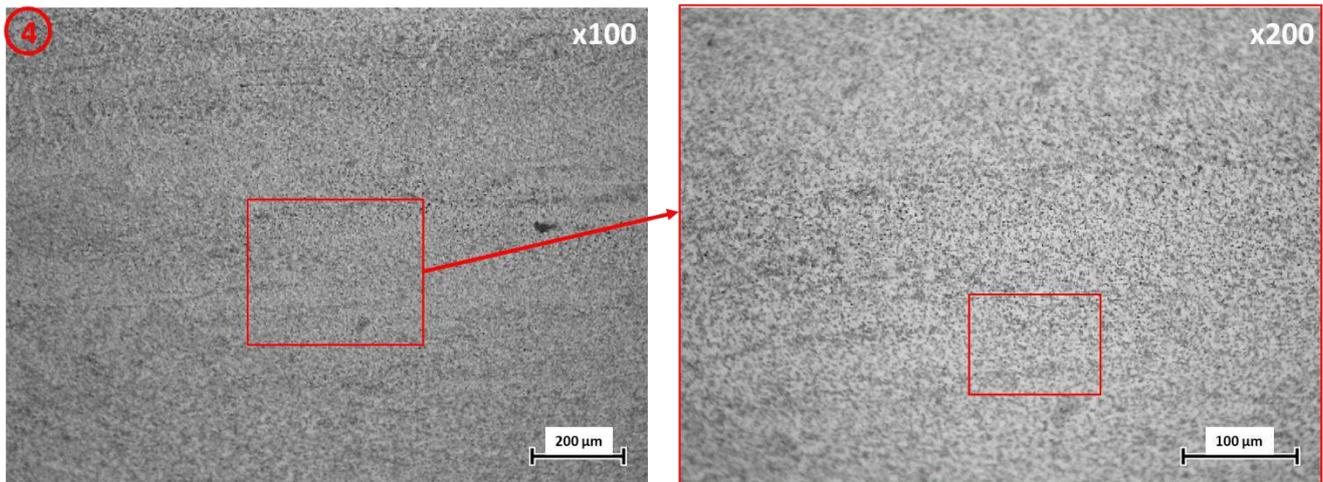


Figura 5.14 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 4.

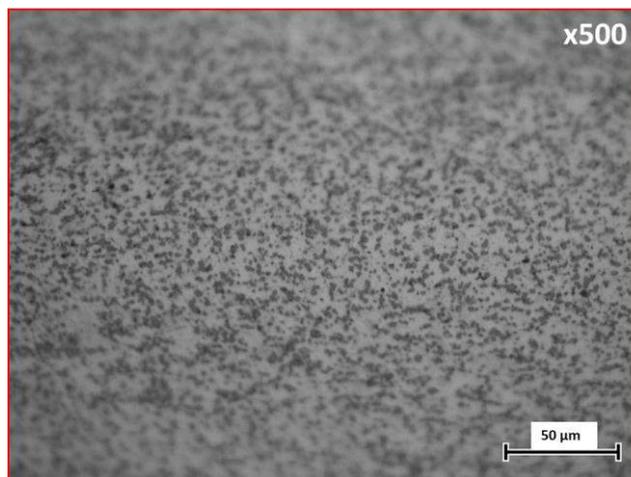


Figura 5.15 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ) ampliada em 500x da zona 4.

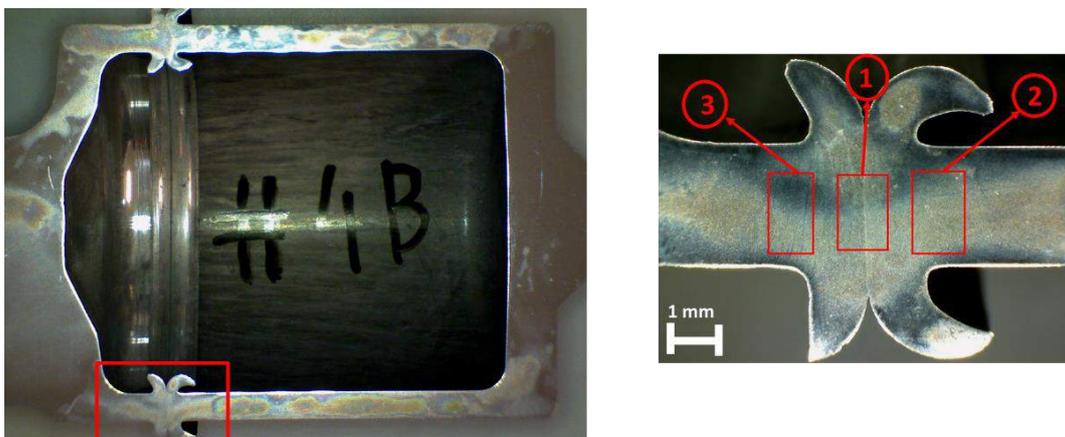


Figura 5.16 - Macrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse.

Nomenclatura: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA à esquerda do CS; 3) ZTMA e ZTA à direita do CS.



Figura 5.17 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.

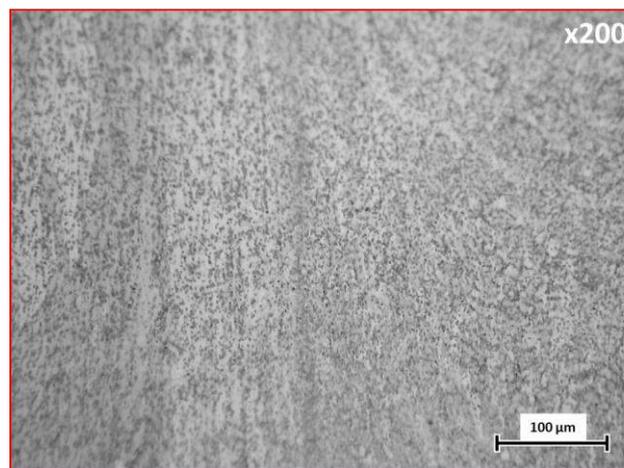


Figura 5.18 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 1

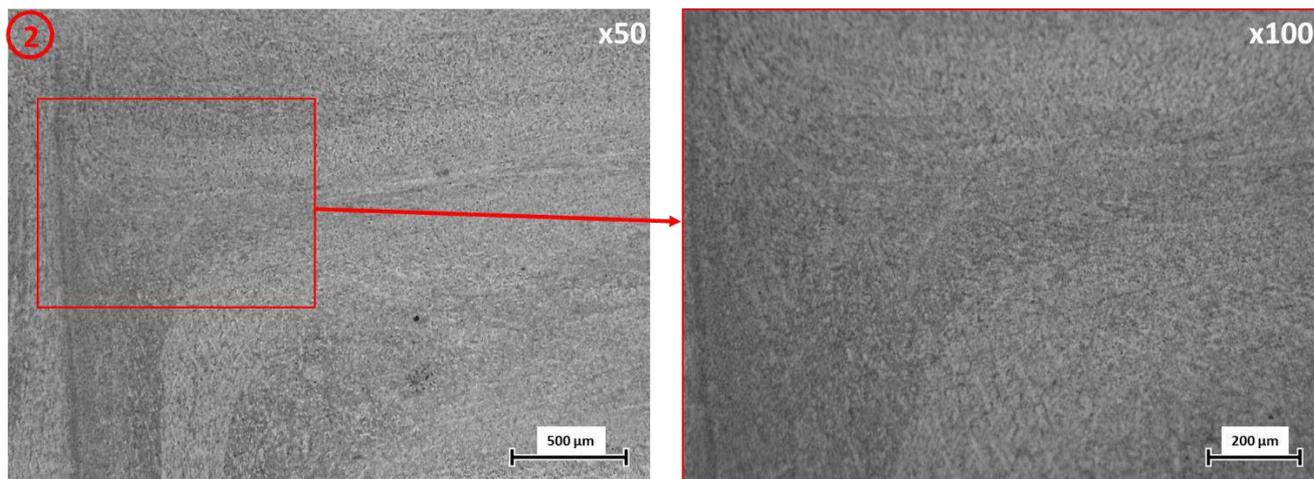


Figura 5.19 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.

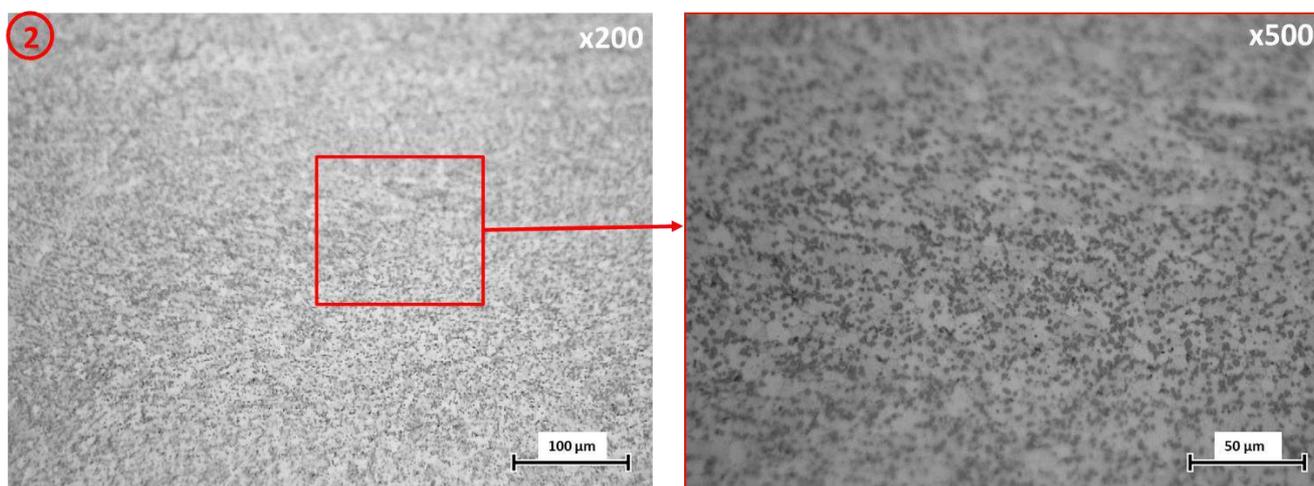


Figura 5.20 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 2.

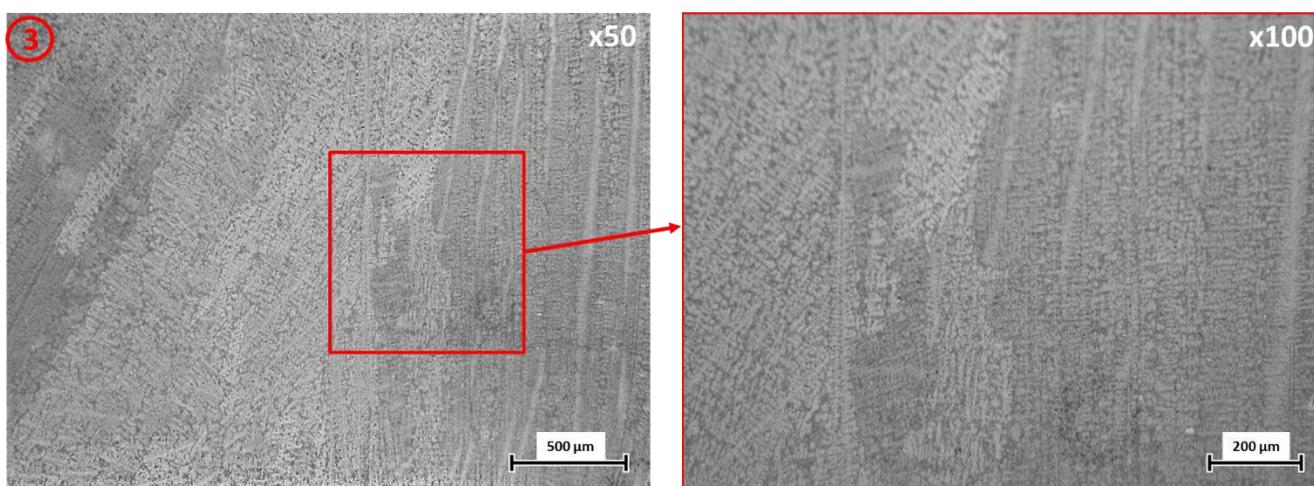


Figura 5.21 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.

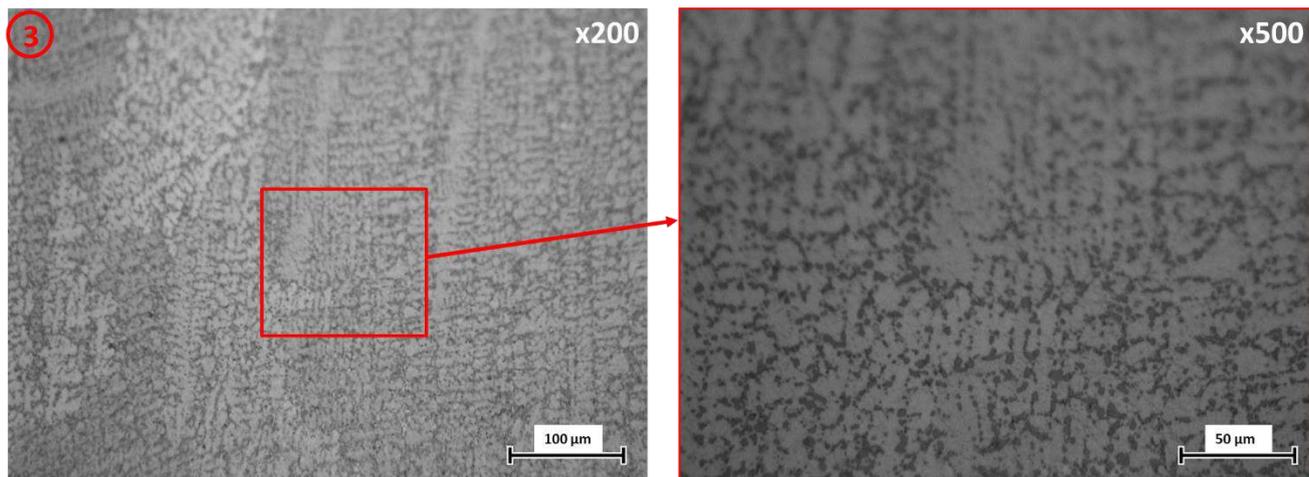


Figura 5.22 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 3.

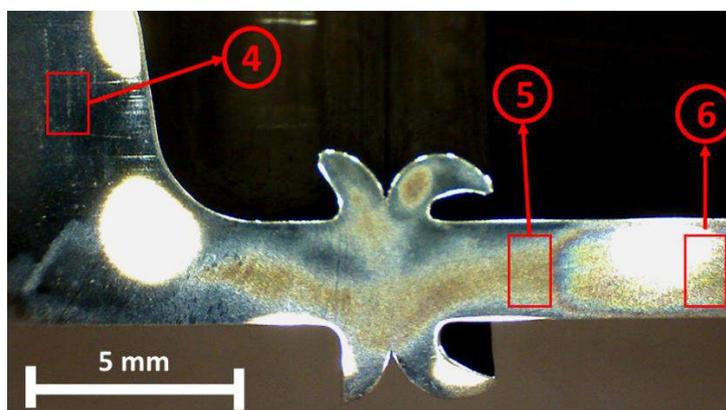


Figura 5.23 - Macrografia do provete #4B (baixo), na zona da união, com identificação de mais três zonas de interesse.

Nomenclatura: 4) MB da metade esquerda; 5) ZTA da metade à direita do CS; 6) MB da metade à direita do CS.

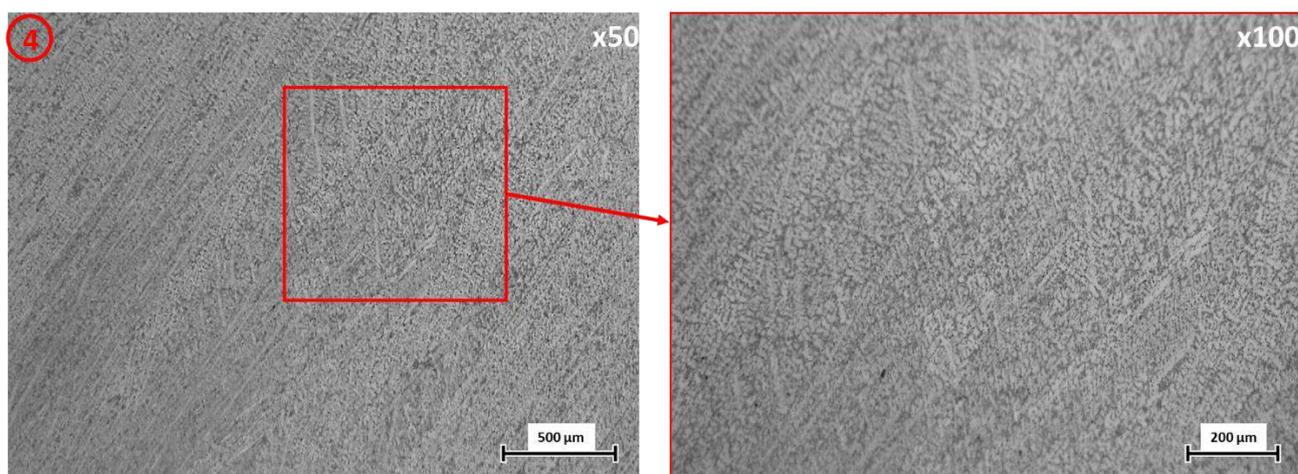


Figura 5.24 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 4.

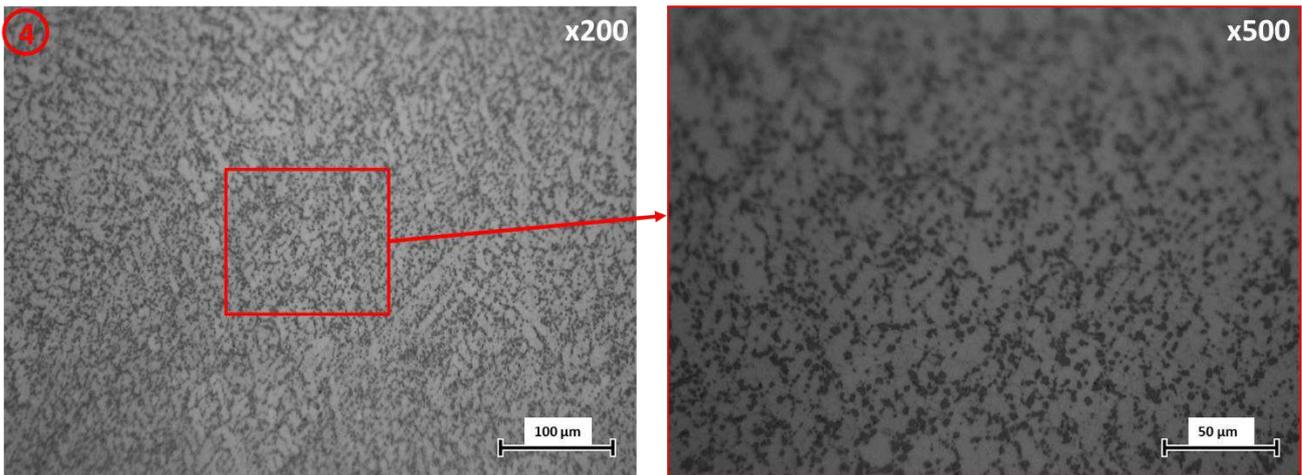


Figura 5.25 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 4.

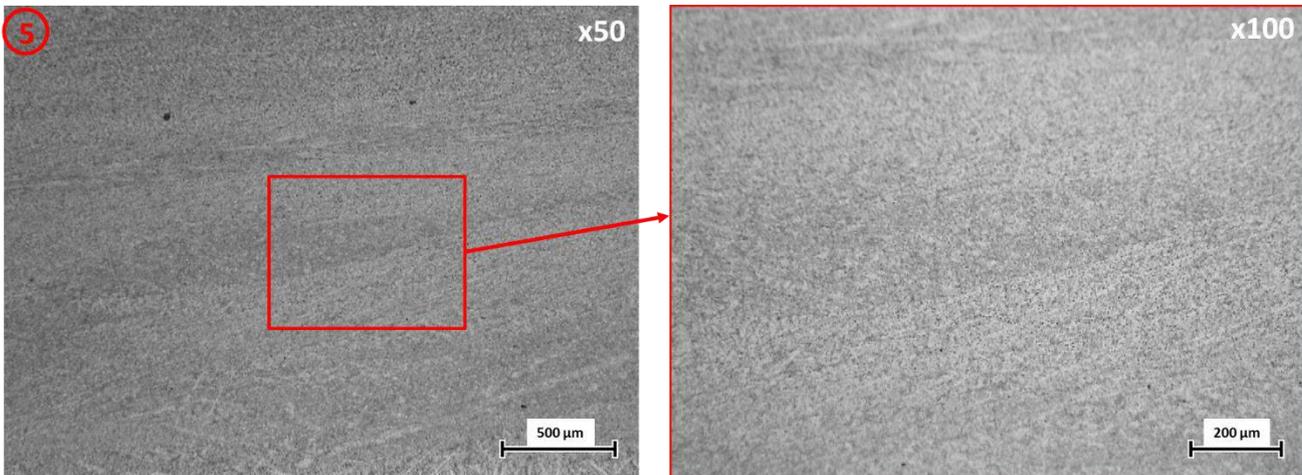


Figura 5.26 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 5.

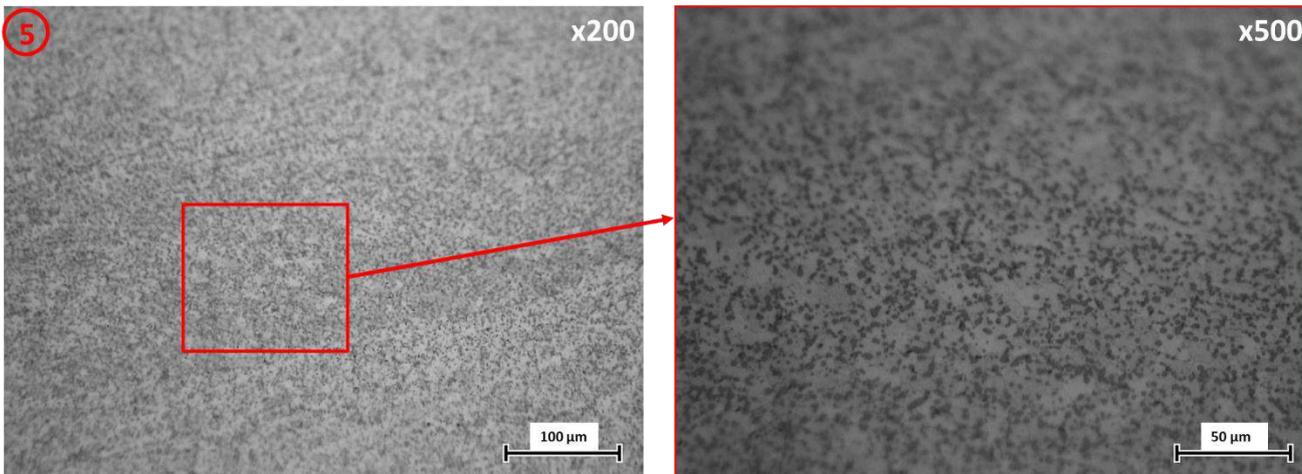


Figura 5.27 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 5.

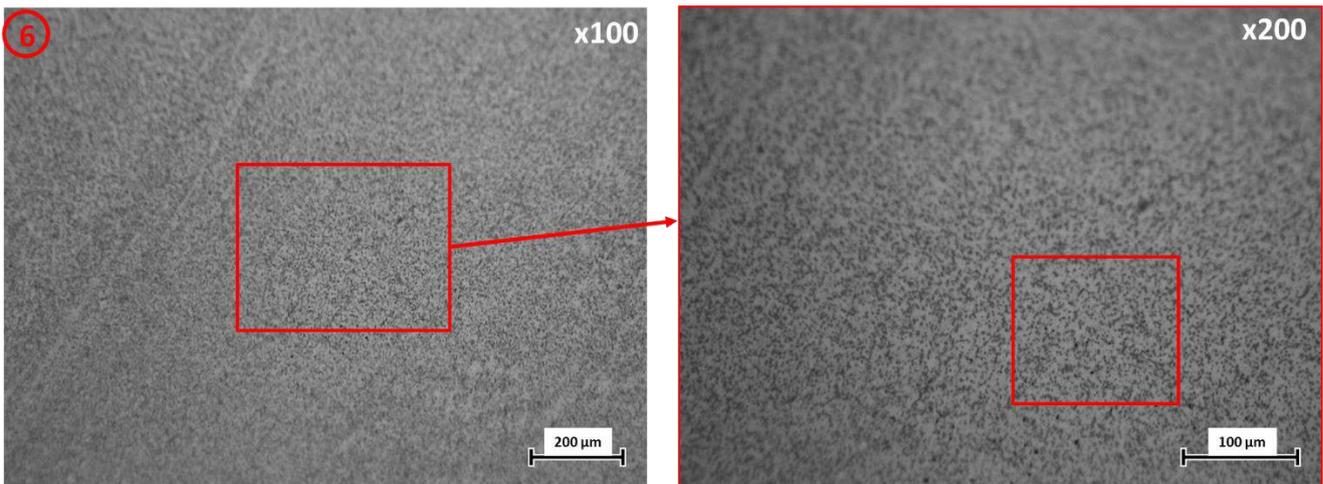


Figura 5.28 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 6.

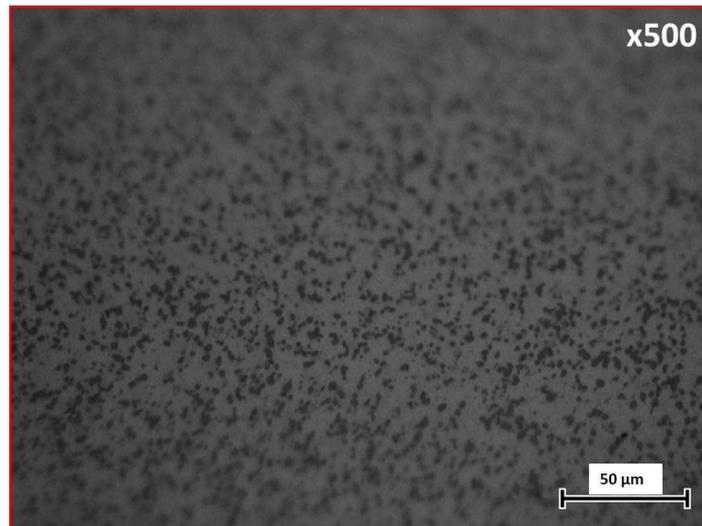


Figura 5.29 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ) ampliada em 500x da zona 6.

Como ilustrado nas micrografias apresentadas (Figuras 5.7 a 5.29), o tamanho de grão é bastante refinado em ambas as metades que constituem o êmbolo, especialmente na metade direita correspondente à Zona 2 (por ex. Figuras 5.12 e 5.20), o que reforça a ideia de ser uma zona fortemente deformada ou encruada. A Zona 3 evidencia claramente uma microestrutura dendrítica (Fig. 5.11 e 5.21), estrutura essa que só pode ser de solidificação. Como tal, supõe-se que terá sido efetivamente fundida. Quanto ao CS, são bem visíveis as linhas de escoamento de material, desde o centro até à parte de fora da rebarba. No entanto, apesar de boa ligação, poderá dizer-se que a rebarba poderia estar mais encurvada para fora visto tratar-se de um metal macio. Este facto reforça a ideia de poder ter havido pouco fluxo visco-plástico aquando da união.

### 5.3 – Ensaios de Dureza e END por CI utilizando o Protótipo Funcional

Em seguida são apresentados os resultados dos END por CI e ensaios de dureza em gráficos de dupla escala, acompanhados de uma macrografia da respectiva secção do êmbolo analisada – Figuras 5.30 a 5.41. Todos os gráficos apresentam a mesma escala e estão perfeitamente alinhados, especialmente e em comprimento, com a respectiva macrografia, ao longo de 20 mm.

O perfil a vermelho representa o perfil de condutividade elétrica do material, neste caso expresso pelo inverso da sua impedância,  $Re(Z)$ , medida aos terminas da sonda. A profundidade de penetração para estas frequências (100-800 KHz) e uma penetração padrão de até 36,7% de intensidade das CI, estaremos a inspecionar entre 0,13 e 0,38 mm. Contudo, se for considerada uma intensidade das CI até 20% da sua intensidade máxima, pode considera-se uma profundidade de inspeção de entre 0,2 e 0,6 mm, aproximadamente meia espessura (Anexo A55).

Os perfis de dureza foram obtidos para diferentes cargas (Hv), mostrando uma tendência um bastante irregular. Com uma carga HV inferior a 0,5 kg a presença de precipitados é substancial.

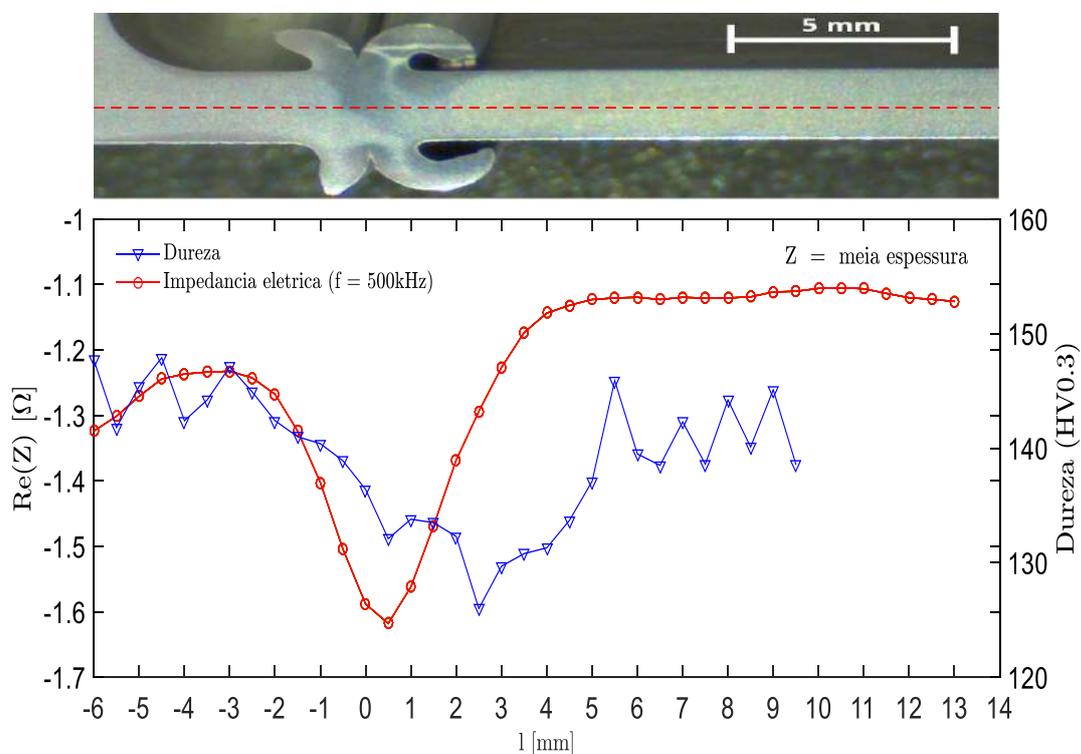


Figura 5.30 - Ensaio de CI e dureza no provete #1A ( $\theta = 180^\circ$ ).

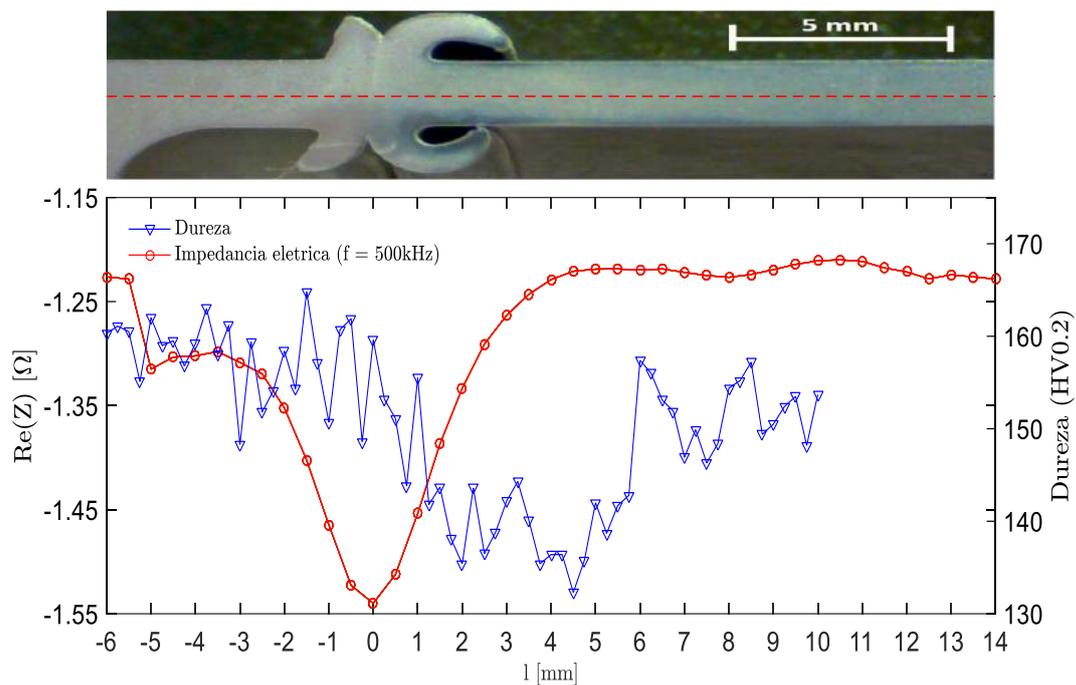


Figura 5.31 - Ensaio de CI e dureza no provete #1A ( $\theta = 0^\circ$ ).

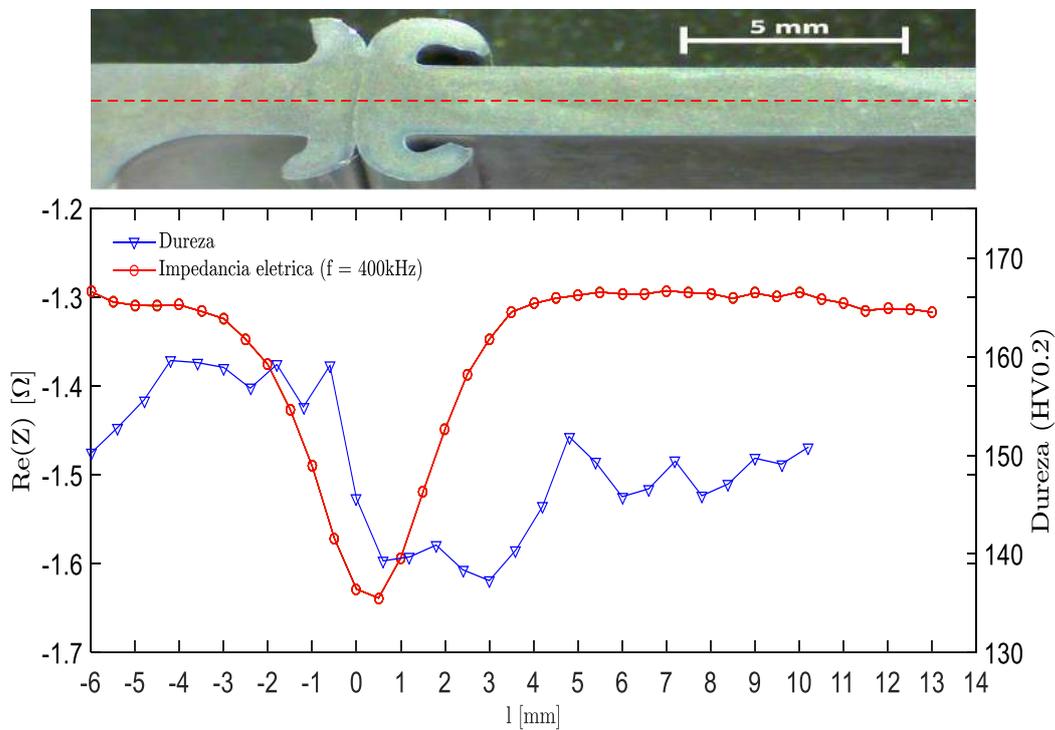


Figura 5.32 - Ensaio de CI e dureza no provete #1B ( $\theta = 180^\circ$ ).

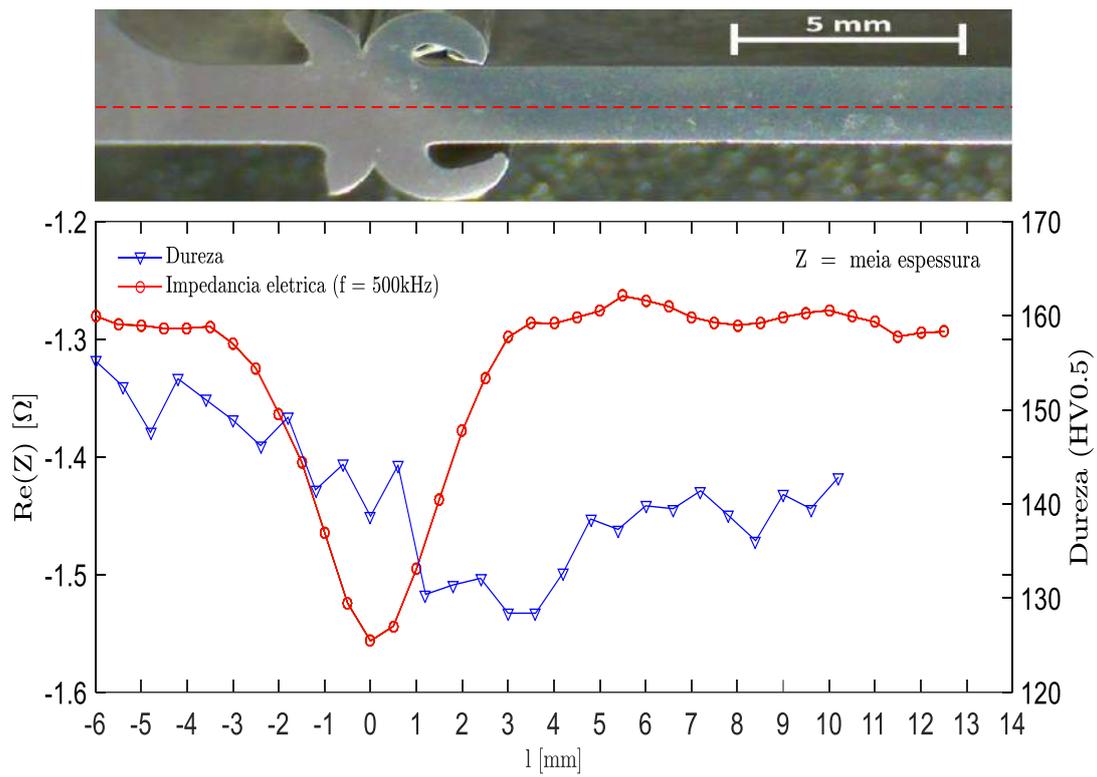


Figura 5.33 - Ensaio de CI e dureza no provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ).

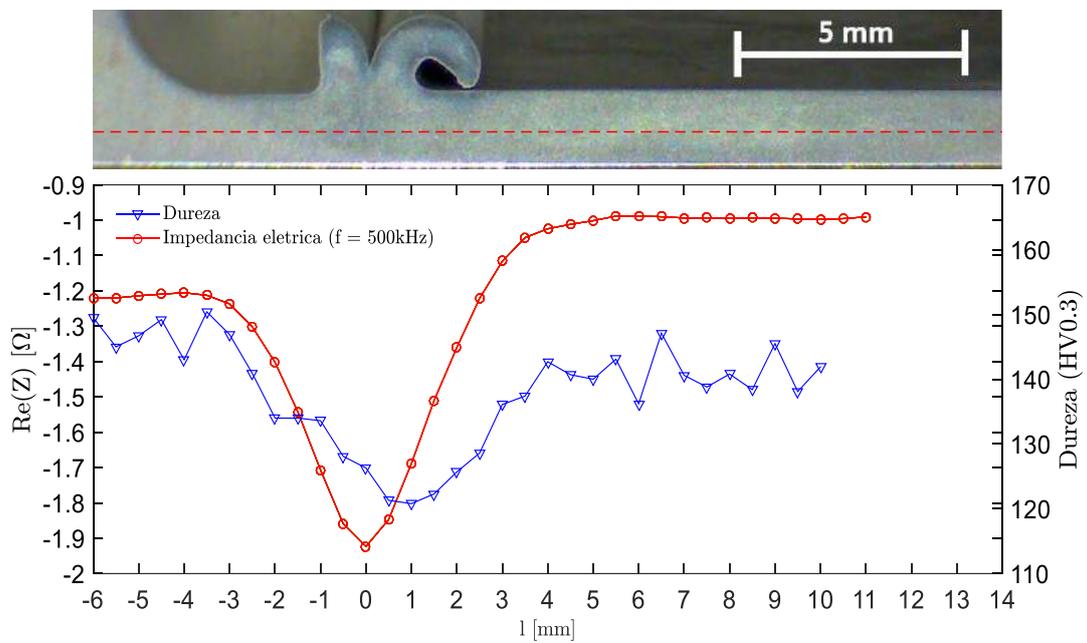


Figura 5.34 - Ensaio de CI e dureza no provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ).

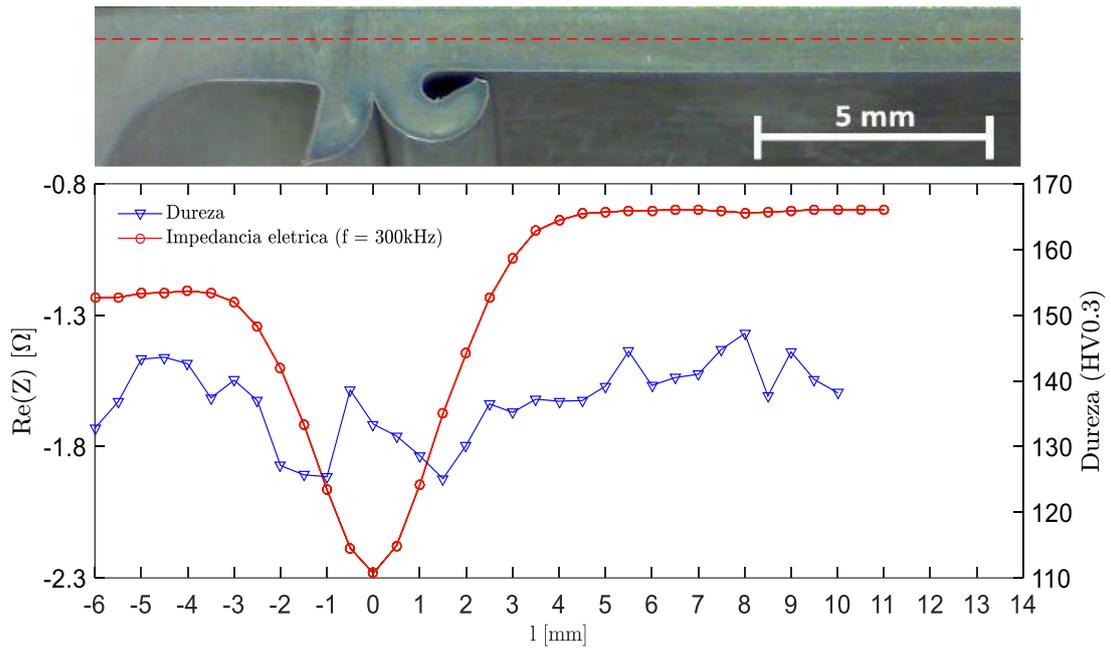


Figura 5.35 - Ensaio de CI e dureza no provete #3A ( $\theta = 90^\circ$ ).

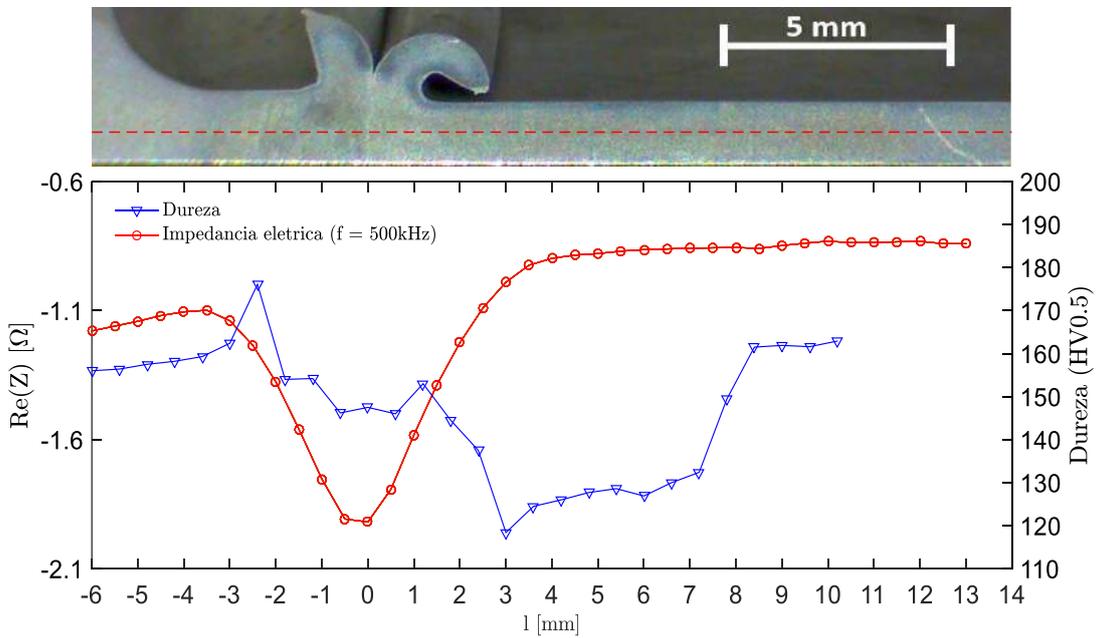


Figura 5.36 - Ensaio de CI e dureza no provete #3B ( $\theta = 90^\circ$ ).

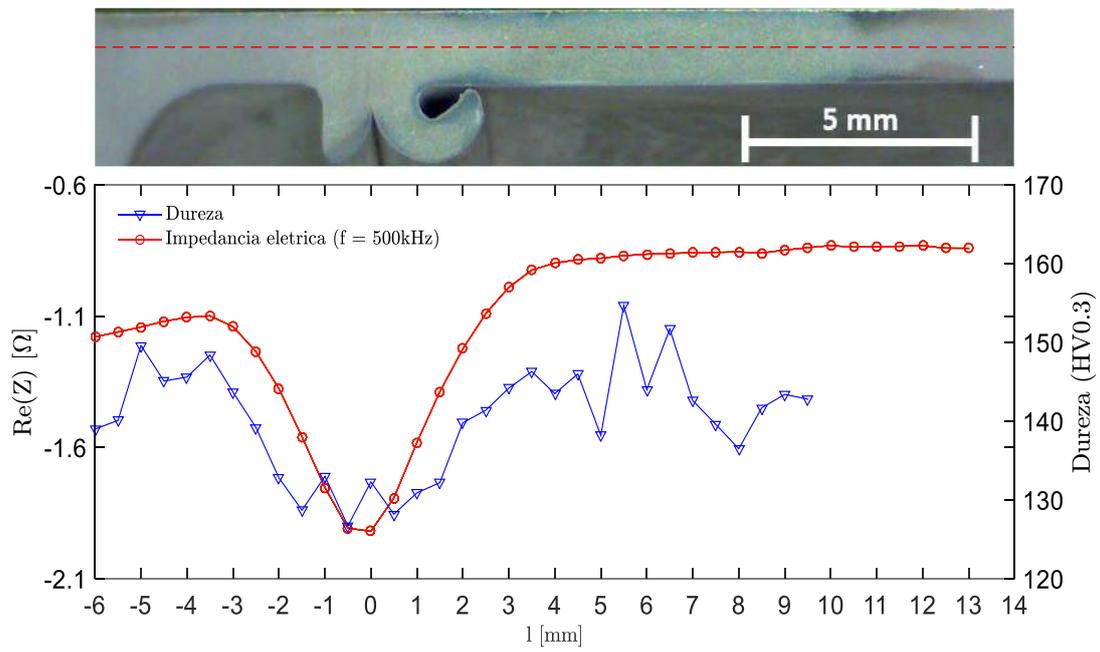


Figura 5.37 - Ensaio de CI e dureza no provete #3B ( $\theta = 270^\circ$ ).

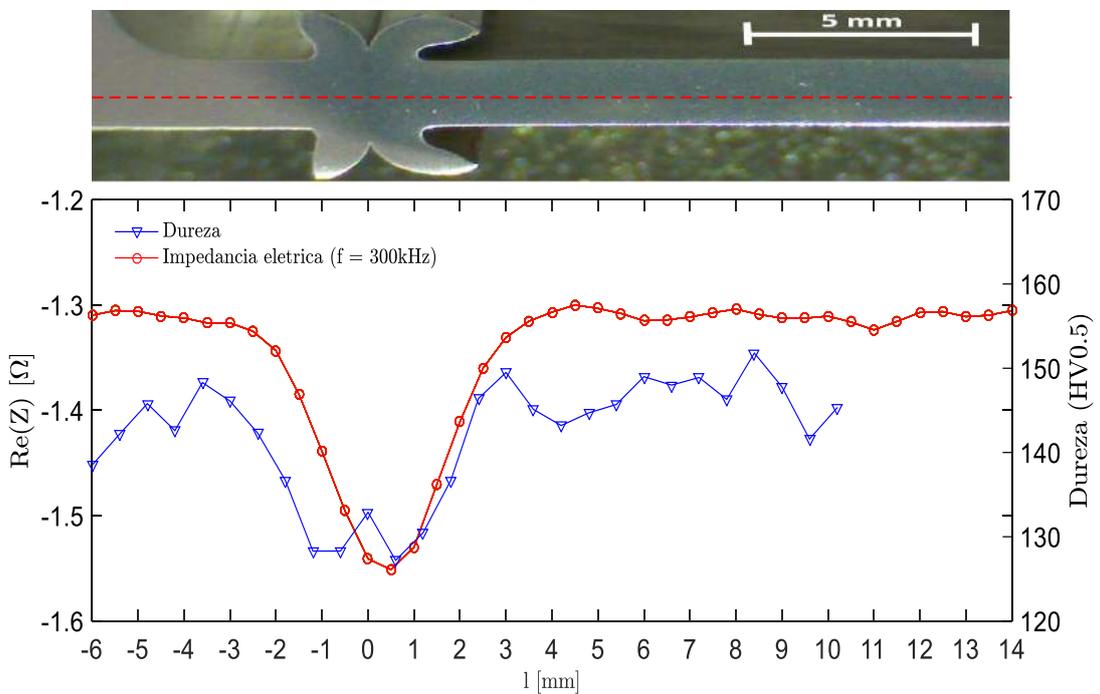


Figura 5.38 - Ensaio de CI e dureza no provete #4A ( $\theta = 0^\circ$ ).

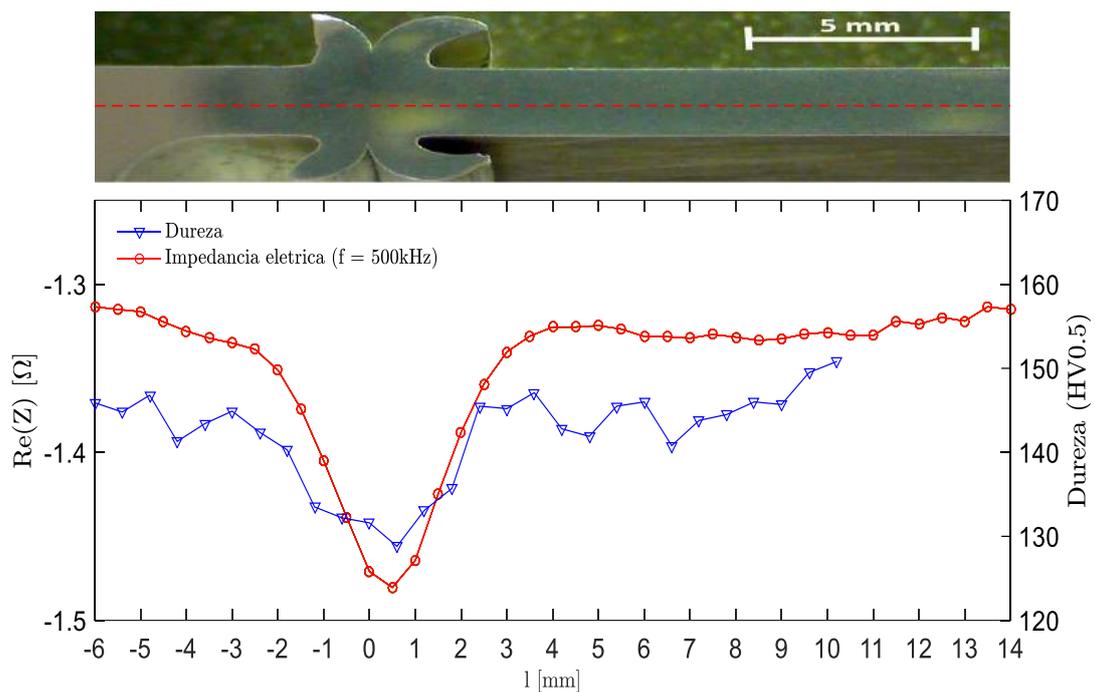


Figura 5.39 - Ensaio de CI e dureza no provete #4A ( $\theta = 180^\circ$ ).

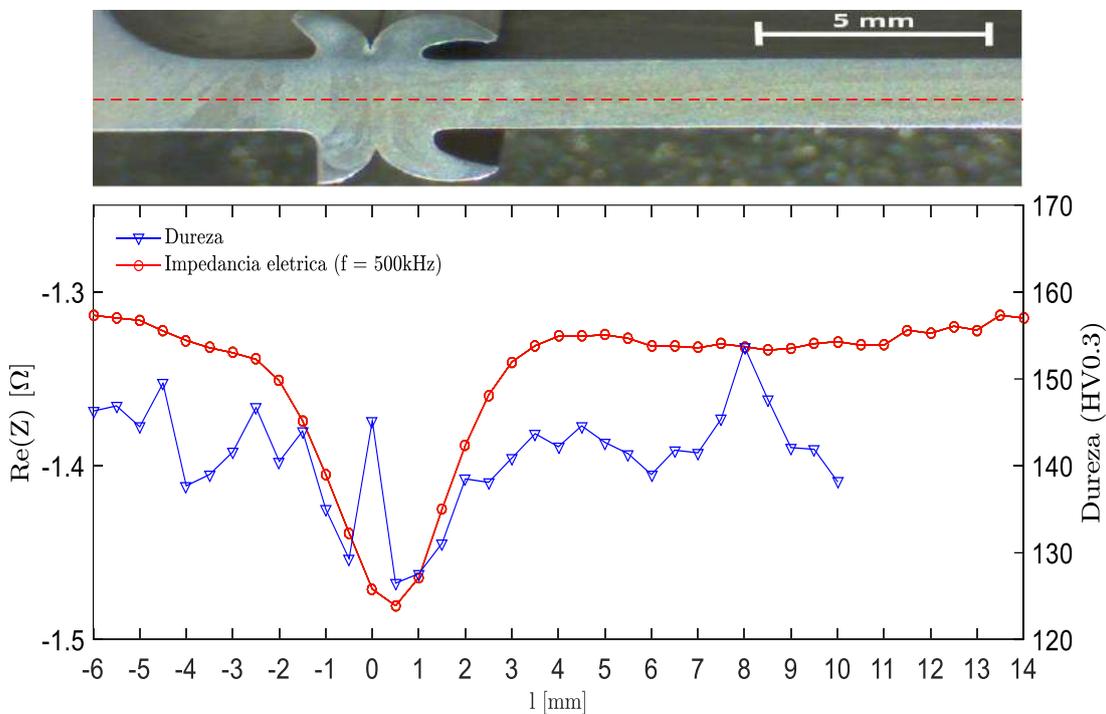


Figura 5.40 - Ensaio de CI e dureza no provete #4B ( $\theta = 180^\circ$ ).

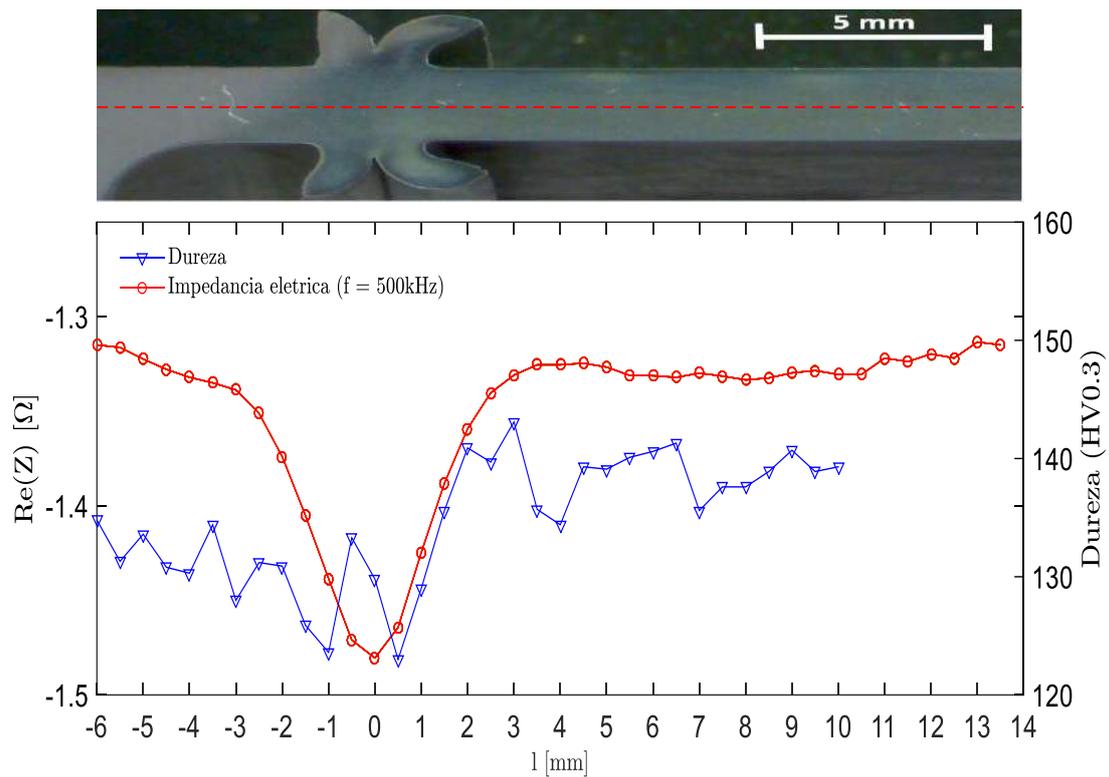


Figura 5.41 - Ensaio de CI e dureza no provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ).

Os resultados anteriormente apresentados mostraram-se notavelmente consistentes relativamente ao perfil de condutividades ( $Re(Z)$ ), registando-se um decaimento desta propriedade elétrica junto à zona de interface. Este fenómeno é concordante com a literatura disponível na caracterização de juntas similares processadas no estado sólido, pois a esta zona corresponde um maior refinamento de grão, o que constitui uma barreira à passagem de corrente elétrica.

Os perfis de dureza extraídos revelam uma tendência inconsistente entre si, o que poderá dever-se à presença de precipitados ou impurezas no MB, o que não facilita a perceção de uma tendência geral do perfil. Denota-se no entanto que esta propriedade decai junto à interface, o que poderá ser explicado pelo efeito sobreposto do calor, em virtude da deformação plástica, gerado durante o processo de SFR. O calor terá tido dificuldade em escoar para fora da peça como resultado da reduzida espessura de parede, especialmente na metade direita, promovendo assim um possível amaciamento do grão posterior ao processo de união.

### 5.4 – END por CI noutros provetes utilizando o Protótipo Funcional

Apresentam-se em seguida mais resultados dos END por CI realizados nos provetes #2, #5 e #6 para diferentes frequências (Fig. 5.42 a 5.55). Os perfis de condutividade apresentados são a média do sinal obtido em todo o perímetro dos êmbolos, independentemente da resolução angular dos ensaios. Apresenta-se também a vista polar deste perfil (em três eixos) para todo o perímetro, o que corresponde ao mapeamento da condutividade elétrica dos provetes.

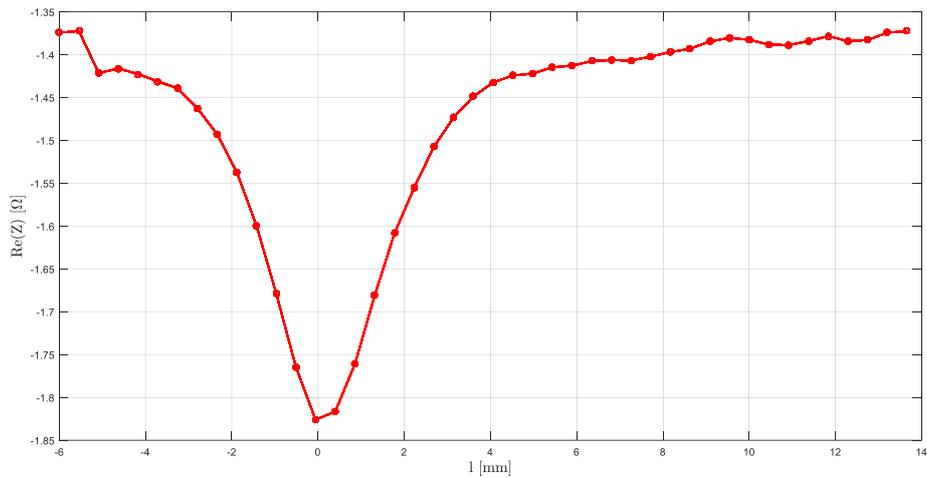


Figura 5.42 – Perfil de condutividade do provete #2 a uma frequência de 400 KHz e alta resolução espacial e angular.

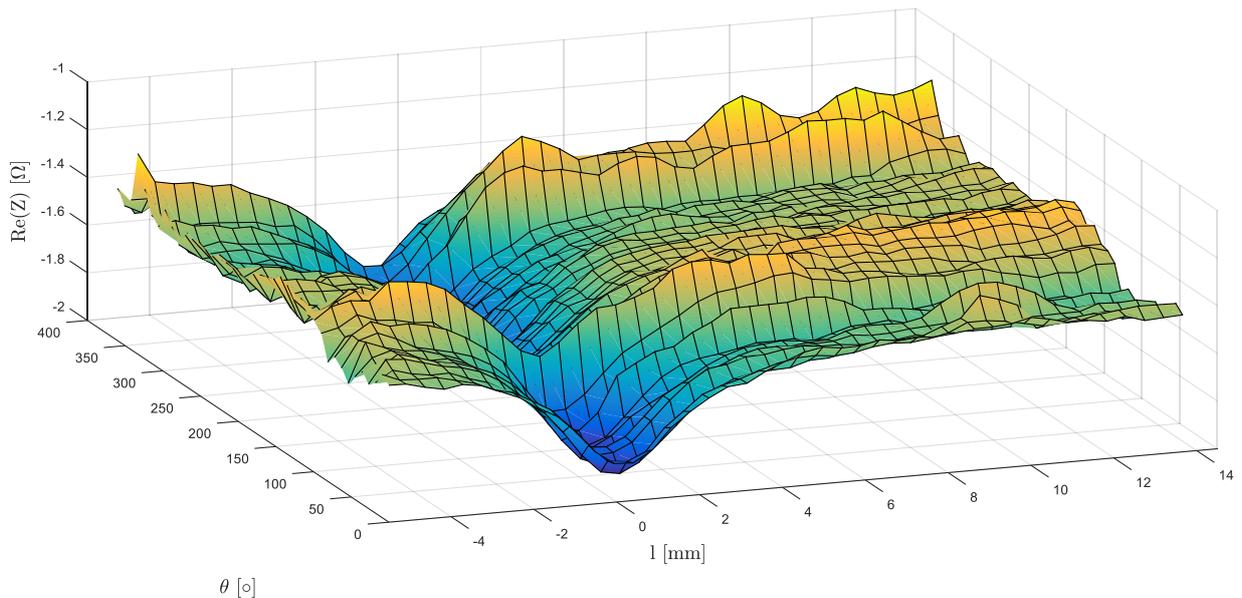


Figura 5.43 – Perfil de condutividade em 3D do provete #2 em torno de todo o perímetro, a uma frequência de 400 KHz e alta resolução espacial e angular.

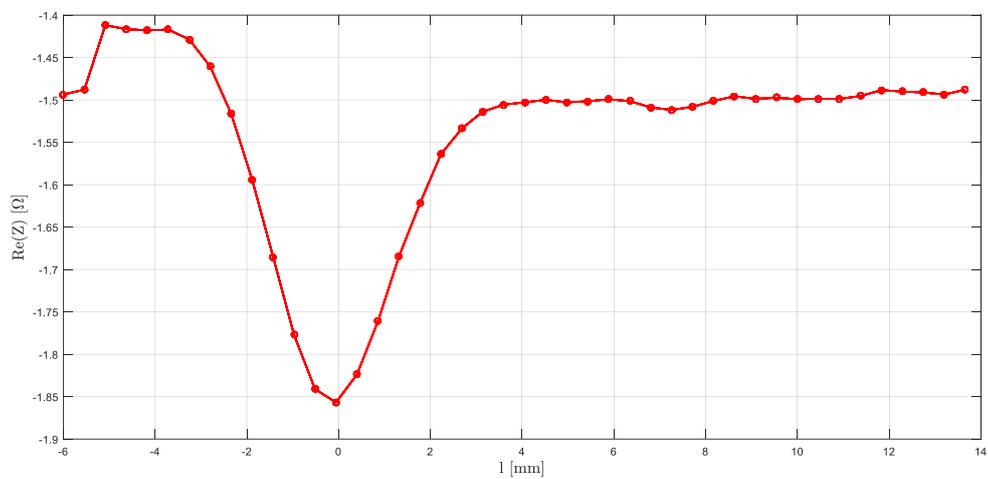


Figura 5.44 – Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 200 KHz.

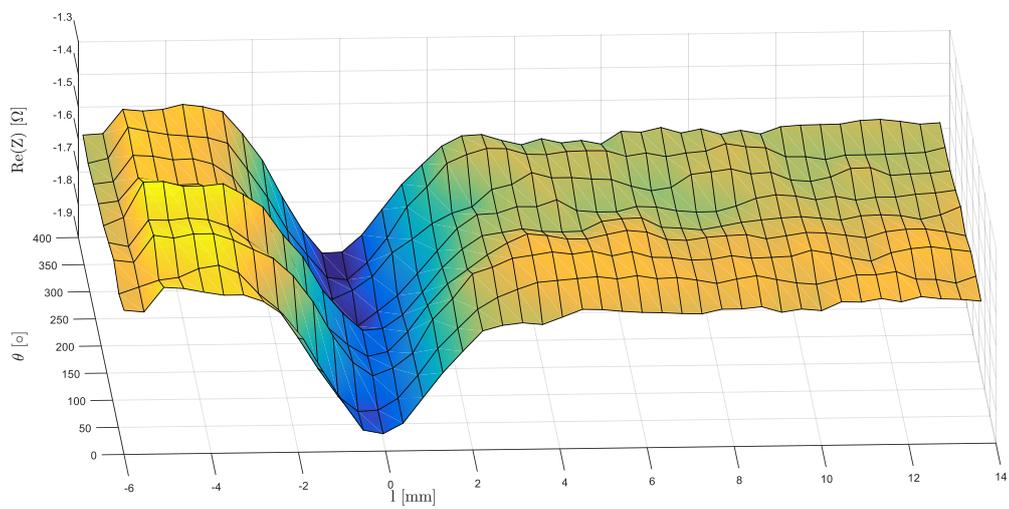


Figura 5.45 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 200 KHz.

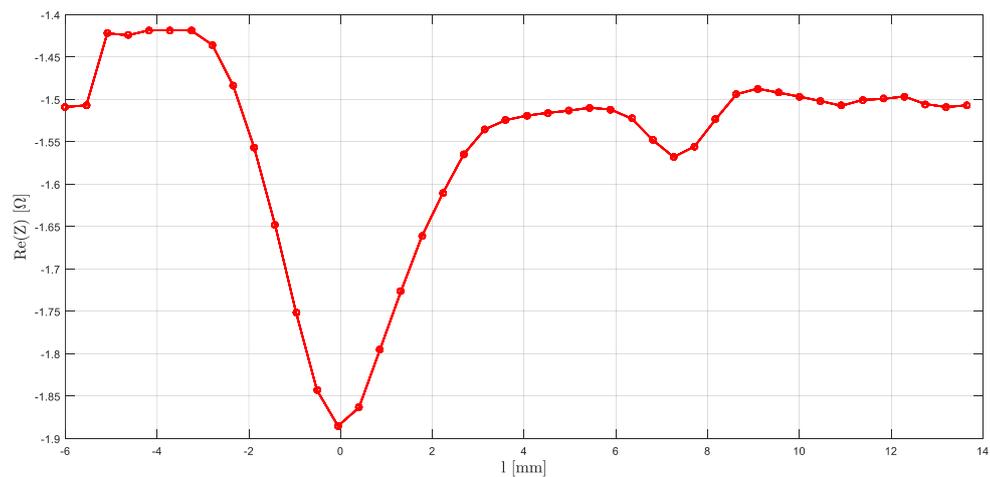


Figura 5.46 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 300 KHz.

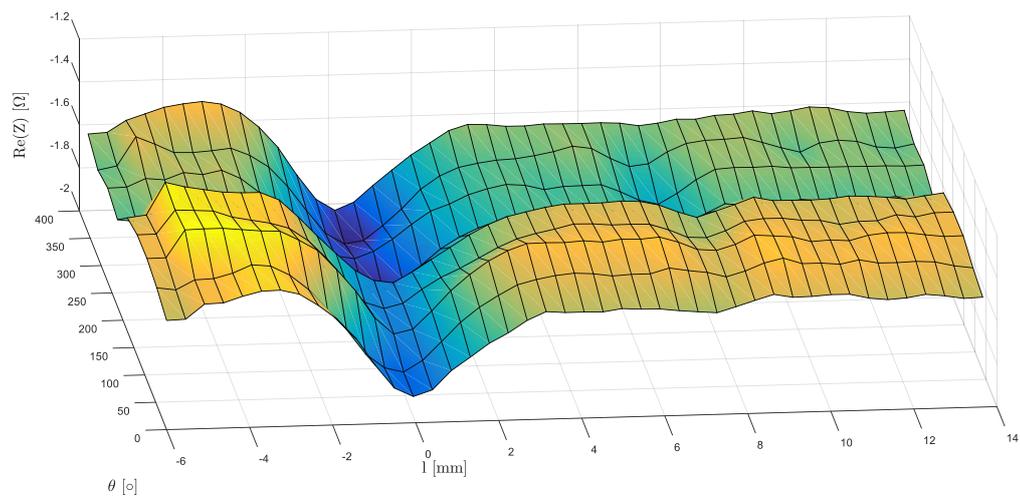


Figura 5.47 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a uma frequência de 300 KHz.

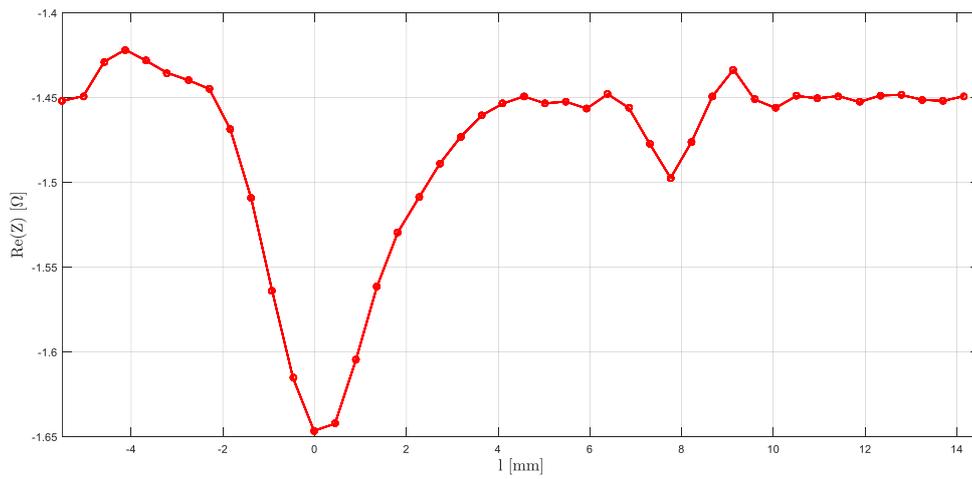


Figura 5.48 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 1 MHz.

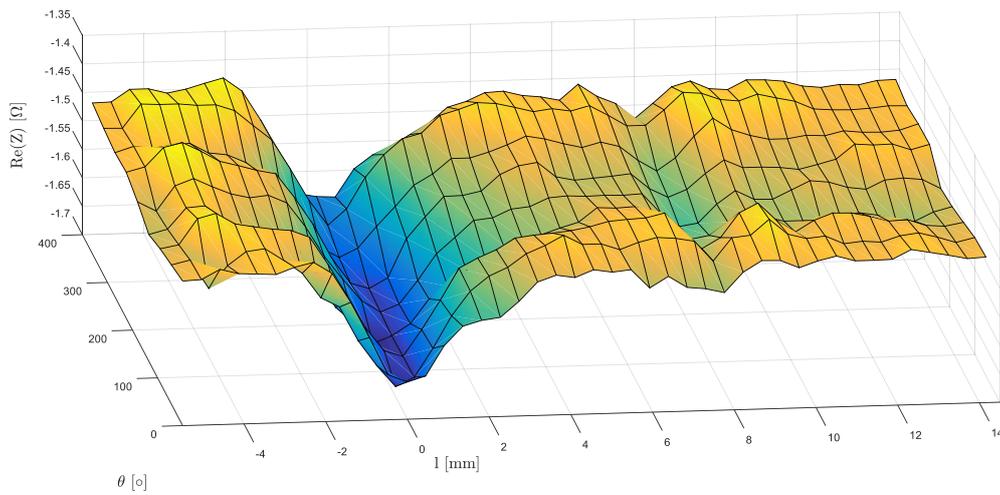


Figura 5.49 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a uma frequência de 1 MHz.

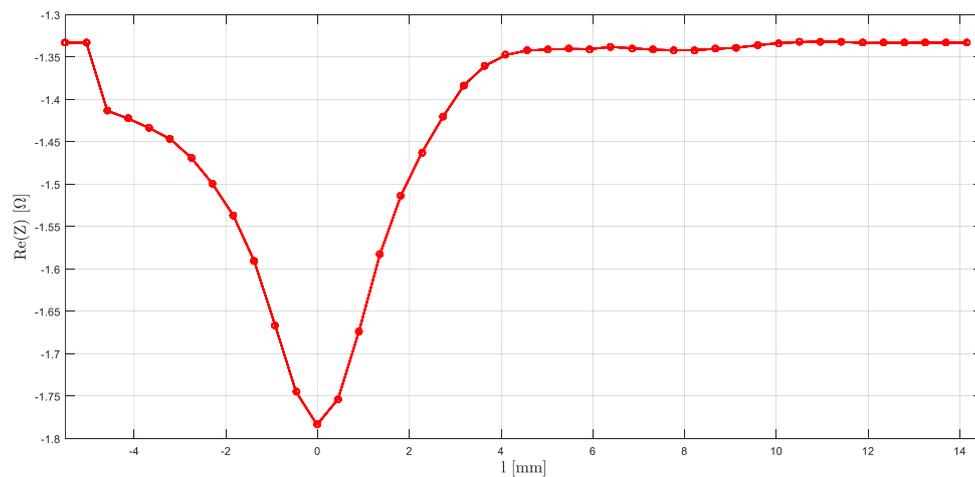


Figura 5.50 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 200 KHz.

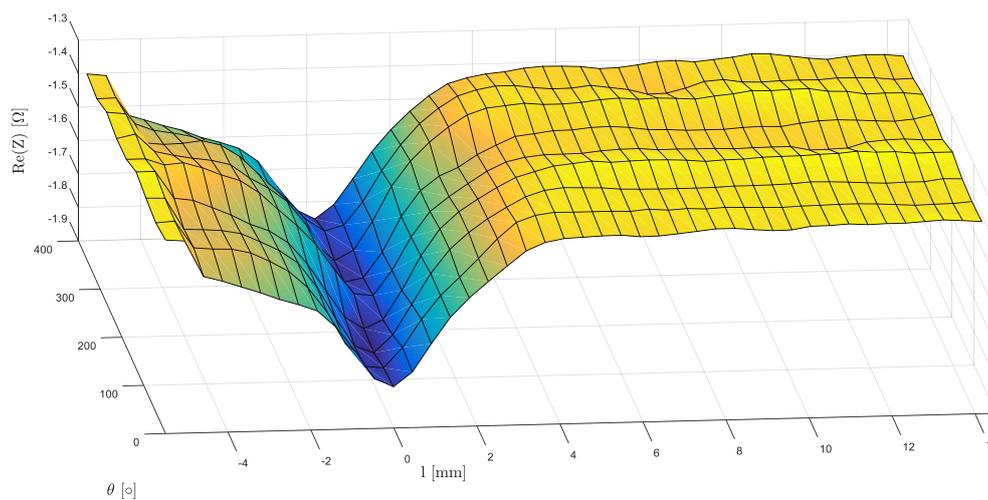


Figura 5.51 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 200 KHz.

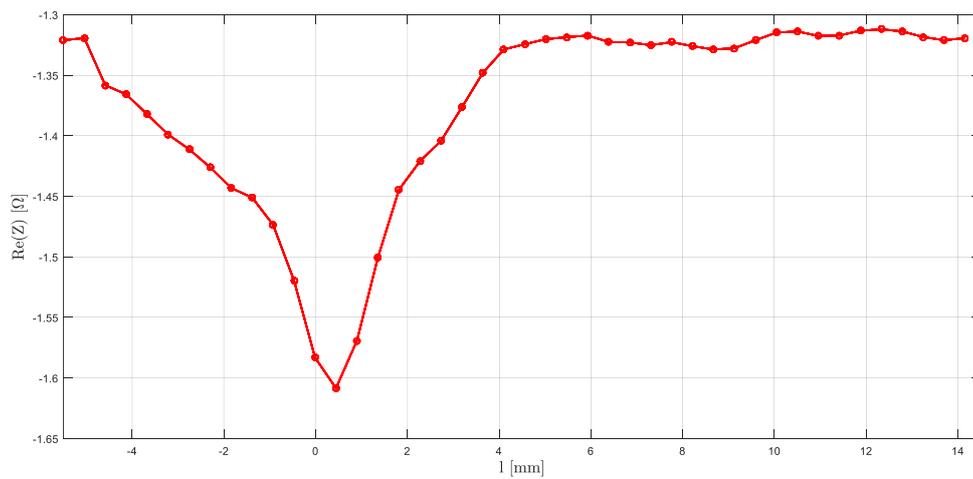


Figura 5.52 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 500 KHz.

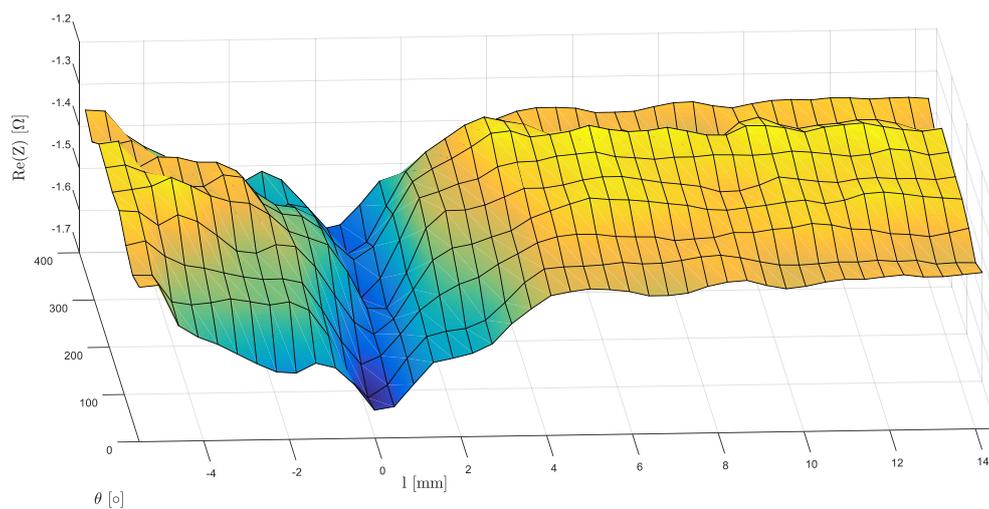


Figura 5.53 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 500 KHz.

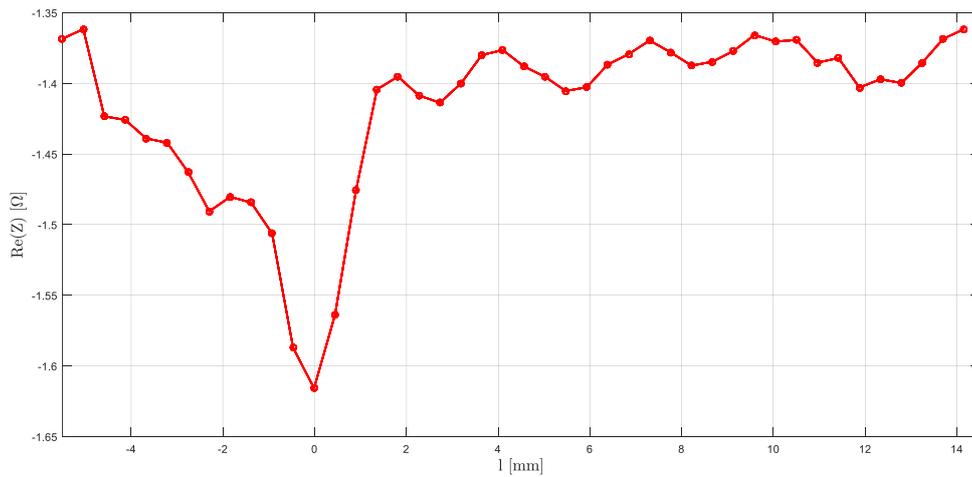


Figura 5.54 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 1 MHz.

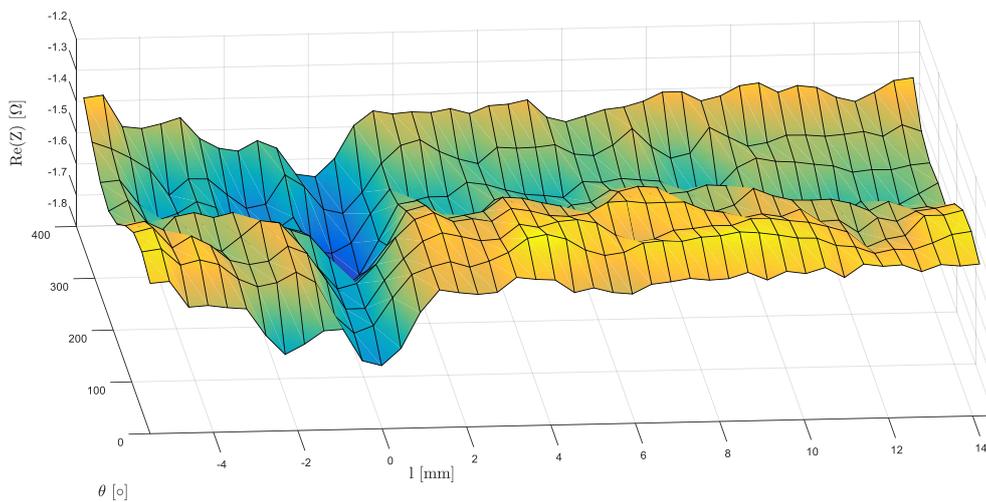


Figura 5.55 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a uma frequência de 1 MHz.

Uma vez mais a tendência do sinal obtido é consistente e deteta claramente a junta soldada, especialmente para frequências de inspeção mais baixas (maior profundidade de inspeção). Foi detetado um menor sinal/ruído nos perfis obtidos para estes provetes (#5 e #6) devido a um torneamento pouco adequado realizado para remoção da rebarba de soldadura que originalmente tinham, deixando a superfície dos mesmos com demasiada rugosidade superficial.

### 5.5 – Ensaio de Dureza no Provette #7A (colapsado)

Apresentam-se em seguida dois resultados de ensaios de dureza realizados num dos provetes colapsados (#7). O objetivo foi perceber melhor a tendência deste perfil em amostras que colapsaram e averiguar eventuais diferenças nas suas propriedades.

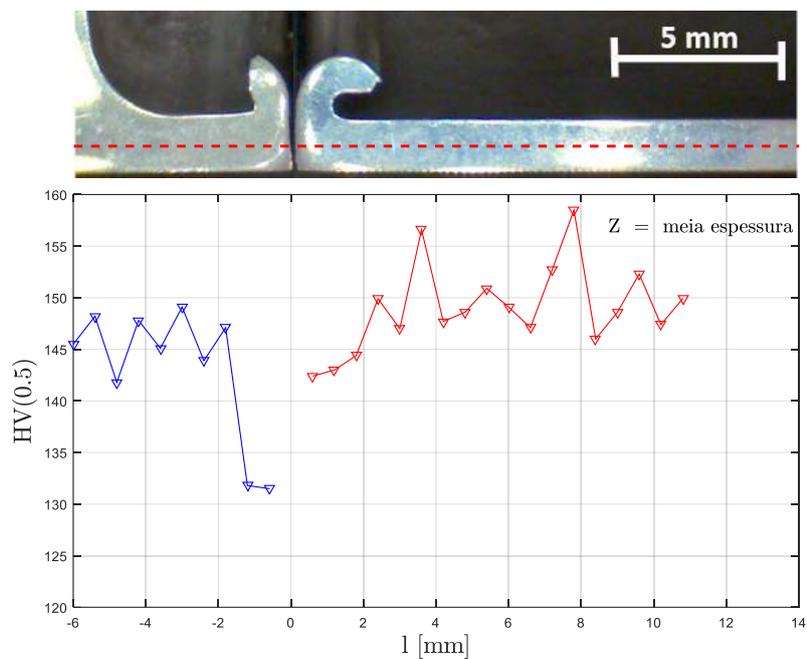


Figura 5.56 – Ensaio de dureza no provete #7A ( $\theta = 180^\circ$ ).

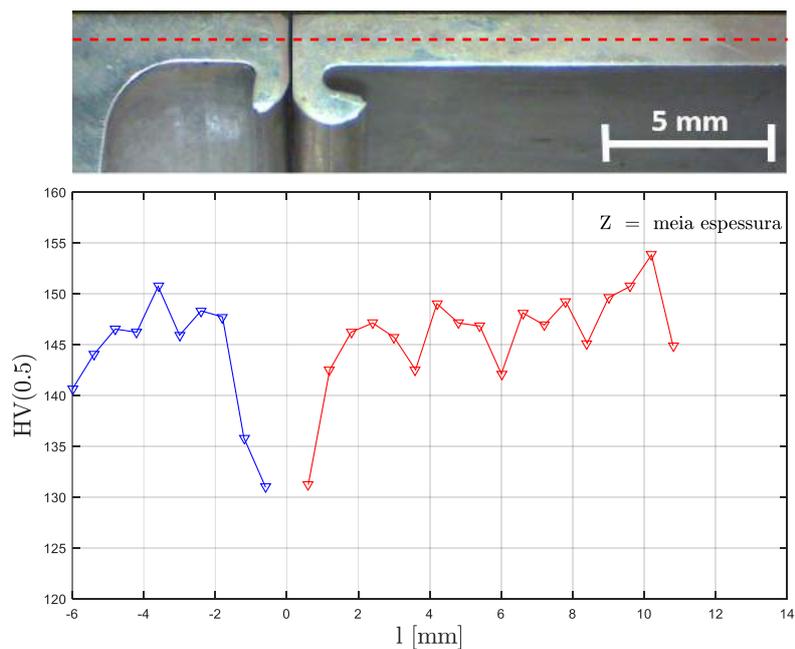


Figura 5.57 – Ensaio de dureza no provete #7A ( $\theta = 0^\circ$ ).

Os resultados comprovaram em grande medida as medições de dureza realizadas nos provetes não colapsados, registrando-se um decaimento na interface. Este resultado indicia a existência de uma zona mais macia junto à interface, o que reforça assim a teoria de que houve um efeito sobreposto e posterior da temperatura face à deformação plástica ocorrida.

## 5.6 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados da caracterização dos sete provetes estudados, nomeadamente: micrografias, macrografias, perfis de dureza e perfis de condutividade.

Realça-se a consistência dos resultados obtidos entre provetes na microscopia ótica, não sendo evidentes diferenças significativas relativamente à sua microestrutura. A união aparenta estar bem ligada, sem ausência de material ou poros, e é possível observar claramente a deformação plástica ocorrida. Detetou-se algum alinhamento de óxidos na interface, o que poderá indicar pouco fluxo visco-plástico durante o processo. O MB das duas metades apresenta um grão bastante refinado, sendo evidente uma microestrutura dendrítica na metade esquerda, o que indica ter sido obtida por fundição. A metade direita apresenta uma microestrutura claramente encruada, indicando ter sido obtida por extrusão inversa por impacto.

Relativamente aos perfis de dureza e de condutividade são assinaláveis algumas diferenças relevantes: 1) Não há uma aparente relação entre eles como seria de esperar; 2) Os ensaios de dureza não se revelaram consistentes e fiáveis na caracterização do material, variando bastante entre ensaios e entre provetes analisados, no entanto, indiciam uma zona mais macia na interface que se poderá dever a um efeito sobreposto da temperatura em virtude da deformação plástica; 3) Os perfis de condutividade (END por CI), contrariamente, detetaram claramente a presença da junta soldada e foram consistentes nos resultados obtidos para diferentes parâmetros e provetes inspecionados. É assim comprovado o potencial deste método na caracterização do processo de soldadura e na deteção de defeitos.

## **6 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

### **6.1 – Introdução**

Neste último capítulo sintetizam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, quer do ponto de vista científico e laboratorial quer do ponto de vista mais tecnológico e industrial. São também sugeridos alguns possíveis desenvolvimento futuros dado o elevado potencial desta técnica na caracterização de êmbolos produzidos por SFR.

### **6.2 – Conclusões e Comentários Finais**

Conclui-se que os END por CI permitem efetivamente detetar as zonas metalúrgicas dos êmbolos soldados, os perfis de condutividade elétrica são sensíveis à microestrutura do material e revelam uma tendência consistente de decaimento desta propriedade junto ao CS. Este fenómeno deve-se ao facto de esta zona ser fortemente recristalizada e deformada plasticamente como consequência do processo de soldadura, representando assim uma barreira natural à passagem de corrente elétrica.

O perfil de condutividade elétrica caracteriza-se por um valor constante na zona do material base (MB) nas duas metades, decaindo 3 a 4 mm antes do CS e tornando depois a subir e a manter-se constante. Assemelha-se a uma curva de Gauss invertida, não se verificando desvios a esta tendência para diferentes frequências de inspeção. Com efeito, é simples e intuitivo de interpretar.

Contrariamente, o perfil de durezas (HV) revelou bastantes variações, não sendo clara uma relação entre o seu valor e as zonas metalúrgicas dos componentes, possivelmente devido à presença de precipitados ou impurezas no MB. Não é assim possível estabelecer uma relação direta ou intuitiva com os fenómenos metalúrgicos ocorridos nem uma correlação com os perfis de condutividade. No entanto, denota-se um decaimento da dureza junto ao CS, tal fenómeno poderá dever-se à presença de uma zona mais macia na interface por via da temperatura gerada durante o processo. O calor gerado por atrito terá tido dificuldade em escoar para fora do CS como resultado da espessura de parede de uma das metades (direita ao CS) ser de apenas 1,5 mm, concentrando-se mais tempo nesta zona recristalizada e promovendo assim algum amaciamento.

O método de END por CI confirmou outras vantagens na caracterização do processo de SFR, para além de não inviabilizar o componente inspecionado é também rápido e não necessita de uma preparação especial prévia da superfície. Um varrimento ao longo de 20 mm demora cerca de oito segundos com o protótipo funcional produzido, podendo ser feita uma inspeção em todo o perímetro em aproximadamente um minuto e meio. Esta velocidade de inspeção depende fortemente da resolução espacial pretendida, no entanto, se os motores do protótipo forem mais potentes o tempo total de inspeção pode ser ainda mais reduzido. Quanto à superfície dos êmbolos, esta não necessita de uma preparação especial prévia mas deve estar lisa e sem grandes rugosidades; Bastando que esteja maquinada, não havendo necessidade de polimentos adicionais.

Nos provetes analisados não foi detetado nenhum exemplar com defeito, no entanto, seria na prática possível distinguir expeditamente soldaduras com e sem defeito através de um desvio do sinal típico detetado. A presença de uma descontinuidade no material (poro ou lacuna) seria facilmente detetada por via de uma interrupção brusca (ou distorção) no perfil de condutividades, indiciando assim o defeito.

Outra possibilidade muito útil deste método de CI é facto de poder ser utilizado no controlo de parâmetros de processo. Tal será possível pela obtenção de um perfil de condutividades característico (sinal típico) através da análise de um maior número de componentes bem soldados, com bons parâmetros de processo, e para diferentes frequências. Com efeito, sabendo de antemão um intervalo de valores aceitável para o perfil de condutividade, é possível fazer-se uma triagem rápida e *inline* de boas e más soldaduras, sendo que sinais que se desviem desta gamam indicaram um desvio excessivo nos parâmetros de processo ou a presença algum fator de ruído.

Sublinha-se que uma versão final de um equipamento industrial de END por CI para inspecionar os êmbolos não seria muito diferente do protótipo já desenvolvido. Teriam de ser realizadas algumas melhorias do ponto de vista funcional, no entanto, o conceito geral seria essencialmente o mesmo.

### **6.2.1 – Conclusões de carácter mais Científico**

Os resultados são consistentes no que diz respeito à microscopia ótica, existindo no entanto alguma diferença entre os provetes analisados. Conclui-se que o material dos êmbolos será, provavelmente, uma liga de alumínio da série AA4XXX, dada a quantidade silício presente na composição química e o valor em %IACS de condutividade elétrica (32-34%IACS).

Tendo em conta o especto macrográfico dos cordões de soldadura dos provetes cortados, pode concluir-se que estes se encontram bem ligados, sem defeitos evidentes e com uma rebarba bem consolidada. No entanto, é de assinalar que as rebarbas de soldadura dos provetes #1 e #3 (do primeiro lote recebido) são ligeiramente mais encurvadas que as do provetes #4 e #7, do segundo. Isto indicia a utilização de diferentes parâmetros de processo na obtenção dos mesmos, assumindo que o MB é o mesmo.

De acordo com a análise microestrutural, verificam-se diferenças na morfologia e tamanho de grão entre a metade à esquerda e à direita do CS. A metade à direita do CS (zona 2) apresenta uma microestrutura bastante encruada e com grão refinado. A metade à esquerda (zona 3) tem uma morfologia mais dendrítica e com grão um pouco mais esparsos. Quanto à zona da interface ou CS (zona 1), é evidente uma zona de forte deformação plástica por ação da rotação e atrito entre as metades, sendo notório algum alinhamento de óxidos para alguns provetes.

O alinhamento de óxidos poderá dever-se a um fluxo visco-plástico insuficiente durante o processo de soldadura, o que indicia uma escolha inadequada de parâmetros ou um fator de ruído significativo.

Relativamente aos perfis de microdurezas, estes apresentam grandes variações e heterogeneidades entre si, não só entre diferentes provetes mas entre diferentes ensaios para o mesmo provete. Não é evidente uma relação direta com as CI, como seria de esperar, devendo-se este facto possivelmente a dois fatores: uma presença forte de precipitados ou a impurezas no MB. Há no entanto uma tendência no decaimento desta propriedade na interface, tal pode indicar a presença de uma zona dúctil, fruto do efeito sobreposto da temperatura em virtude da deformação mecânica.

Os perfis de condutividade foram substancialmente consistentes na tendência de decaimento da condutividade elétrica junto ao CS, como seria de esperar, pois trata-se de uma zona fortemente deformada plasticamente. Ao longo do perímetro das amostras não se registaram variações significativas ou heterogeneidades neste comportamento do perfil das CI, nem um sinal que pudesse indiciar um defeito.

Foram registadas algumas variações ao nível dos patamares de condutividade elétrica constante entre as duas metades, nomeadamente nos provetes #4 a #6 do segundo lote. Este fenómeno pode dever-se à profundidade específica de inspeção, fruto das frequências escolhidas, ou mesmo proveniências metalúrgicas diferentes das duas metades.

### **6.2.2 – Conclusões de carácter mais Tecnológico-Industrial**

Numa ótica tecnológica, o protótipo funcional de END produzido mostrou-se eficaz e expedito na inspeção dos provetes permitindo a medição dos perfis de condutividade em tempo real e de forma rápida. Os perfis de condutividade podem ser relacionados com alterações metalográficas desejadas ou não no material, como desvios nos parâmetros de processo ou na deteção de defeitos.

A construção mecânica em perfis Bosch e peças poliméricas impressas com manufatura aditiva FDM reduziu bastante o custo e o peso final do aparelho, sendo facilmente manuseado ou até melhorado, e ao mesmo tempo garantindo a solidez dos seus componentes. No entanto,

também revelou algumas limitações intrínsecas a esta tecnologia de prototipagem rápida, nomeadamente nos seus desvios geométricos de impressão. Contudo, para este tipo de aplicações validou-se a sua capacidade e versatilidade na produção de equipamentos END customizados.

### **6.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros**

Seria importante então obter amostras com e sem defeitos de soldadura para se perceberem as diferenças em termos do seu perfil de condutividades. Adicionalmente, a inspeção de um número maior de provetes soldados por SFR (com diferentes parâmetros de processo) ajudaria a fundamentar ainda mais este conceito de inspeção e a se obter um perfil de condutividade característico para componentes bem soldados e sem defeito.

É possível obterem-se resultados bastante mais elucidativos das zonas metalúrgicas do material concebendo uma sonda de CI dedicada para este tipo de material e geometria dos êmbolos, recorrendo inclusive a uma simulação numérica prévia com vista a simular o comportamento das correntes no material.

O conhecimento dos parâmetros de processo seria também importante na medida em que se poderia estabelecer uma relação mais direta com os fenómenos e alterações metalúrgicas registadas com este método. Com efeito, seria interessante acompanhar o processo de soldadura para diferentes parâmetros e registar as sucessivas alterações no MB, nomeadamente no perfil de condutividades, que se obteria de forma expedita e *inline* com o protótipo funcional concebido.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. G. Santos, R. M. Miranda, P. Vilaça, J. P. Teixeira, and J. dos Santos, "Microstructural mapping of friction stir welded AA 7075-T6 and AlMgSc alloys using electrical conductivity," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 16, no. 7, pp. 630–635, Oct. 2011.
- [2] T. G. Santos, R. M. Miranda, P. Vilaça, and J. P. Teixeira, "Modification of electrical conductivity by friction stir processing of aluminum alloys," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 5–8, pp. 511–519, 2011.
- [3] J. dos S. and R. M. M. T.G. Santos, P. Vilaça, L. Quintino, "Application of eddy current techniques to inspect friction spot welds in aluminum alloy 2024 and a composite material," *Weld. World*, vol. 55, 2011.
- [4] T. G. Santos, P. Vilaça, and R. M. Miranda, "Electrical conductivity field analysis for evaluation of FSW joints in AA6013 and AA7075 alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 2, pp. 174–180, 2011.
- [5] P. Cavaliere, G. Campanile, F. Panella, and A. Squillace, "Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 180, no. 1–3, pp. 263–270, 2006.
- [6] T. G. Santos, R. M. Miranda, and P. Vilaça, "Friction Stir Welding assisted by electrical Joule effect," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 10, pp. 2127–2133, 2014.
- [7] R. M. Miranda, T. G. Santos, J. Gandra, N. Lopes, and R. J. C. Silva, "Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 9, pp. 1609–1615, 2013.
- [8] A. Michael, A. Pequegnat, J. Wang, Y. N. Zhou, and M. I. Khan, "Surface & Coatings Technology Corrosion performance of medical grade NiTi after laser processing," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 324, pp. 478–485, 2017.
- [9] A. Shamsolhodaei and M. Moghaddam, "Structural and functional properties of a semi equiatomic NiTi shape memory alloy processed by multi-axial forging," *Mater. Sci. Eng.*

- A, vol. 700, no. April, pp. 1–9, 2017.
- [10] J. J. Marattukalam *et al.*, “Microstructure and corrosion behavior of laser processed NiTi alloy,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 57, pp. 309–313, 2015.
- [11] A. Kurt, I. Uygur, and E. Cete, “Surface modification of aluminium by friction stir processing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 3, pp. 313–317, 2011.
- [12] Y. lai SONG, Y. hui LIU, X. yong ZHU, S. rong YU, and Y. bo ZHANG, “Strength distribution at interface of rotary-friction-welded aluminum to nodular cast iron,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 18, no. 1, pp. 14–18, 2008.
- [13] A. Ambroziak, “Friction welding of titanium-tungsten pseudoalloy joints,” *J. Alloys Compd.*, vol. 506, no. 2, pp. 761–765, 2010.
- [14] K. G. Prashanth, R. Damodaram, T. Maity, P. Wang, and J. Eckert, “Friction welding of selective laser melted Ti6Al4V parts,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 704, no. April, pp. 66–71, 2017.
- [15] E. oualid Bouarroudj, S. Chikh, S. Abdi, and D. Miroud, “Thermal analysis during a rotational friction welding,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 1543–1553, 2017.
- [16] R. Kumar and M. Balasubramanian, “Experimental investigation of Ti–6Al–4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer,” *Def. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 65–75, 2015.
- [17] H. C. Dey, M. Ashfaq, A. K. Bhaduri, and K. P. Rao, “Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 18–19, pp. 5862–5870, 2009.
- [18] P. Sketchley, P. Threadgill, and I. Wright, “Rotary friction welding of an Fe 3 Al based ODS alloy,” *Mater. Sci. ...*, vol. 331, pp. 756–762, 2002.
- [19] W. Guo, G. You, G. Yuan, and X. Zhang, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy,” *J. Alloys Compd.*, vol. 695, pp. 3267–3277, 2017.
- [20] L. Santos, J., Quintino, *Processos de Soldadura*, 2ª Edição. 1998.
-

- 
- [21] M. Maalekian, "Friction welding – critical assessment of literature," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 12, no. 8, pp. 738–759, 2007.
- [22] American Welding Society (AWS) C6 Committee on Friction Welding, *Recommended Practices for Friction Welding*, vol. 89, no. 192852. 1992.
- [23] Gatwick Technologies Ltd, "Friction Welding." [Online]. Available: <http://www.gatwicktechnologies.com/processes/friction-welding>.
- [24] W. Li, A. Vairis, M. Preuss, and T. Ma, "Linear and rotary friction welding review," *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 2, pp. 71–100, 2016.
- [25] P. Li, J. Li, X. Li, J. Xiong, F. Zhang, and L. Liang, "A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 1246–1257, 2015.
- [26] W. Li and F. Wang, "Modeling of continuous drive friction welding of mild steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 18, pp. 5921–5926, 2011.
- [27] R. Palanivel, R. F. Laubscher, and I. Dinaharan, "An investigation into the effect of friction welding parameters on tensile strength of titanium tubes by utilizing an empirical relationship," *Measurement*, vol. 98, pp. 77–91, 2017.
- [28] S. Mercan, S. Aydin, and N. Özdemir, "Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding," *Int. J. Fatigue*, vol. 81, pp. 78–90, 2015.
- [29] X. Li, J. Li, Z. Liao, F. Jin, F. Zhang, and J. Xiong, "Microstructure evolution and mechanical properties of rotary friction welded TC4/SUS321 joints at various rotation speeds," *Mater. Des.*, vol. 99, pp. 26–36, 2016.
- [30] R. Paventhan, P. R. Lakshminarayanan, and V. Balasubramanian, "Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 19, no. 1, pp. 66–71, 2012.
- [31] R. Palanivel, I. Dinaharan, and R. F. Laubscher, "Assessment of microstructure and tensile behavior of continuous drive friction welded titanium tubes," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 687, no. December 2016, pp. 249–258, 2017.
-

- [32] P. Li, J. Li, M. Salman, L. Liang, J. Xiong, and F. Zhang, "Effect of friction time on mechanical and metallurgical properties of continuous drive friction welded Ti6Al4V/SUS321 joints," *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 649–656, 2014.
- [33] M. Meisnar *et al.*, "Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints," *Mater. Des.*, vol. 132, pp. 188–197, 2017.
- [34] N. Ratkovi??, D. Arsi??, V. Lazi??, R. R. Nikoli??, and B. Hadzima, "Micro-structure in the joint friction plane in friction welding of dissimilar steels," *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, pp. 414–420, 2016.
- [35] S. Celik and I. Ersozlu, "Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 4, pp. 970–976, 2009.
- [36] V. V. Satyanarayana, G. M. Reddy, and T. Mohandas, "Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 160, no. 2, pp. 128–137, 2005.
- [37] S. D. Meshram and G. Madhusudhan Reddy, "Friction welding of AA6061 to AISI 4340 using silver interlayer," *Def. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 292–298, 2015.
- [38] R. Winiczenko, O. Gorocho, A. Krzy??ska, and M. Kaczorowski, "Friction welding of tungsten heavy alloy with aluminium alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 246, pp. 42–55, 2017.
- [39] M. Darmon, V. Dorval, A. Kamta Djakou, L. Fradkin, and S. Chatillon, "A system model for ultrasonic NDT based on the Physical Theory of Diffraction (PTD)," *Ultrasonics*, vol. 64, pp. 115–127, 2016.
- [40] J. L. San Emeterio, A. Ramos, P. T. Sanz, A. Ruíz, and A. Azbaid, "Modeling NDT piezoelectric ultrasonic transmitters," *Ultrasonics*, vol. 42, no. 1–9, pp. 277–281, 2004.
- [41] K. A. Tiwari, R. Raisutis, and V. Samaitis, "Signal processing methods to improve the Signal-to-noise ratio (SNR) in ultrasonic non-destructive testing of wind turbine blade," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 1184–1191, 2017.
- [42] T. Alexandre and R. Marques, "Desenvolvimento de Sondas de Correntes Induzidas

- Customizadas para Detecção de Micro Defeitos Superficiais,” 2016.
- [43] G. Y. Tian and A. Sophian, “Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT,” vol. 38, pp. 319–324, 2005.
- [44] H. Bousack and J. Gmbh, “Eddy current technique with high temperature SQUID for non-destructive evaluation of non-magnetic metallic structures,” vol. 36, no. 2, pp. 83–86, 1996.
- [45] T. G. Santos, P. L. Inácio, A. A. Costa, R. M. Miranda, and C. C. C. R. De Carvalho, “Nova Técnica de END baseada em células bacterianas para detecção de micro e nano defeitos superficiais,” *Soldag. e Insp.*, vol. 20, no. 2, pp. 253–259, 2015.
- [46] J. Dutra, “Aplicação e Caracterização de Ensaio não Destrutivos com Células Bacterianas,” 2016.
- [47] T. Santos, “Ensaio Não Destrutivos por Correntes Induzidas: Desenvolvimento e Aplicação à Soldadura por Fricção Linear,” 2009.
- [48] N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbinson, B. C. Hawtin, C. Ibarra-castanedo, and X. Maldague, “Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT,” vol. 40, pp. 143–162, 2004.
- [49] R. Yang, Y. He, and H. Zhang, “Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1225–1250, 2016.
- [50] M. Machado, “Conceção , Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para Ensaio Não Destrutivos de Geometrias Tubulares,” 2014.
- [51] T. G. Santos, “Characterization of FSP by electrical conductivity,” pp. 137–163.
- [52] L. S. Rosado, T. G. Santos, M. Piedade, P. M. Ramos, and P. Vilaça, “Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 43, no. 8, pp. 1021–1030, 2010.
- [53] L. Matos Filipe, T. G. Santos, S. Valtchev, J. Pamies Teixeira, and R. M. Miranda, “New method employing the electrical impedance for monitoring mechanical damage

- evolution in glass-reinforced: Applications to riveted joints," *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 25–31, 2012.
- [54] C. S. Çetinarslan, "Effect of cold plastic deformation on electrical conductivity of various materials," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 671–673, 2009.
- [55] L. Gonçalo and L. Sorger, "Characterization of processed materials by electrical currents : development of equipment and applications," 2014.
- [56] M. A. Machado, L. Rosado, N. Pedrosa, A. Vostner, and R. M. Miranda, "NDT & E International Novel eddy current probes for pipes : Application in austenitic round-in-square profiles of ITER," *NDT E Int.*, vol. 87, no. July 2016, pp. 111–118, 2017.
- [57] L. S. Rosado, T. G. Santos, P. M. Ramos, P. Vilaça, and M. Piedade, "A new dual driver planar eddy current probe with dynamically controlled induction pattern," *NDT E Int.*, vol. 70, pp. 29–37, 2015.

# ANEXOS

## Anexo 1 – Estado da Arte dos END por Correntes Induzidas

### Limitações do método END por Correntes Induzidas

Como referido anteriormente, os END por CI apresentam alguns inconvenientes intrínsecos ao fenómeno físico em que se baseia. É uma tecnologia limitada a materiais condutores e a sua eficácia depende fortemente da condutividade eléctrica e da permeabilidade magnética do material. Também a profundidade de penetração é relativamente baixa, mesmo em materiais condutores. As correntes induzidas pulsadas (CIP) surgiram com vista a colmatar este problema e têm aplicações notáveis na manutenção, deteção de corrosão e fissuras em aeronaves e na indústria nuclear. Consistem na excitação da bobina da sonda com ondas quadradas, o que permite com um único passo a obtenção de mais informação. Aliado a uma excitação multifrequências, apresenta também uma maior profundidade de penetração, menor sensibilidade a interferências e menor consumo de energia.

Existe ainda o efeito de *lift-off* e o efeito de bordo. O *lift-off* diz respeito à distância a que a sonda se encontra da superfície de inspeção. Se esta for superior a um determinado valor (por via de irregularidades na superfície, p. ex.), a variação de impedância da sonda pode ser superior à diminuição da condutividade pela existência de um qualquer defeito que existe nessa zona, ficando assim o sinal do defeito absorvido pelo ruído do *lift-off*. Este efeito pode ser atenuado com uma parametrização da sonda no sentido de aumentar o ângulo de separação entre a linha do *lift-off* e da condutividade. No entanto, a frequência da sonda tem de ser criteriosamente escolhida o que reduz a gama de frequências (e conseqüente profundidade de penetração) a apenas uma. Novas sondas têm vindo a ser desenvolvidas, como as impressas em substratos flexíveis, com vista atenuar este efeito e permitir uma melhor deteção de defeitos, nomeadamente defeitos oblíquos ou paralelos à superfície.

O efeito pele caracteriza-se pelas CI distorcerem nas proximidades de uma extremidade ou bordo da peça a inspecionar, semelhante à que se observaria na existência de um defeito. Este fenómeno pode dissimular defeitos nessas zonas, levando a interpretações erradas do sinal. Uma atenção especial de ser dada às extremidades das peças e uniões topo-a-topo. Destaca-se o surgimento das sondas *IONic* [47] com uma bobina de excitação toroidal e uma bobinha espiral plana perpendicular à primeira. Este arranjo permite um notável redução do ruído causado pelo

*lift-off* aquando da deslocação da sonda, assim como a inspeção de bordos do material. Possuem um carácter tridimensional, por via de uma análise de sinal durante um movimento de rotação de 360° da sonda sobre si própria, o que permite a deteção de defeitos com dimensão ou morfologias mais complicadas.

Com a sofisticação dos sistemas integrados, do poder de computação e até da manufatura aditiva rápida, novos sistemas de END por CI têm vindo a ser desenvolvidos. Nomeadamente do ponto de vista do processamento de sinal, aplicação de filtros, manipulação de dados e novas formas de visualização. Tudo isto aliado a *software* de simulação (baseado em elementos finitos) que permitem o teste prévio de novas configurações de sondas [56], [57], [50].

## **Anexo 2 - Meios Laboratoriais para Microscopia ótica**

Aparato laboratorial utilizado no estudo:

- Serra de corte com refrigeração;
- Polidora giratória com lixas-de-água e pano de polimento;
- MicroPolish de alumina (1.0  $\mu\text{m}$ );
- Microscópio ótico Olympus CX-40 com quatro objetivas de ampliação;
- Reagente químico Keller à base de ácido fluorídrico.

Procedimento experimental da metalografia:

1. **Corte e identificação:** Para o estudo metalográfico foi necessário cortar os êmbolos a meio diâmetro recorrendo a uma serra metálica. Os mesmos tiveram de ser cortados de maneira a não sofrerem alterações metalográficas por via do calor gerado, por isso o corte foi progressivo e refrigerado com um jato de água de maneira a não aquecer demasiado o provete. Estandarizou-se a identificação dos provetes cortados e das zonas a analisar ao microscópio de maneira a tornar mais fácil o seu manuseio e pós-processamento de resultados.
2. **Lixagem:** Recorrendo a discos giratórios procedeu-se ao lixamento das duas metades da amostra com lixas-de-água de granulometria sucessivamente menor

(P240, P400, P600, P1200 e P2500). Visto tratar-se de uma liga relativamente macia de alumínio o processo foi menos moroso que habitual quando comparado com uma liga, no entanto foi precisa especial atenção durante o polimento o de maneira a garantir um polimento homogéneo e plano em toda a área da amostra.

3. **Polimento:** Nesta fase pretende-se dar um polimento final espelhado e isento de riscos à amostra. Para isso recorreu-se a um pano especial para polimento e a uma solução de abrasivos (MicroPolish Alumina 1.0  $\mu\text{m}$  40-10081).
4. **Ataque Químico:** Atacou-se quimicamente a amostra com recurso a cotonetes impregnados numa solução de *Keller* (indicada para ligas de alumínio). O intuito deste procedimento é revelar as fronteiras de grão e a microestrutura do material.
5. **Observação ao Microscópio:** Recorrendo a um microscópio ótico com quatro objetivas de ampliação (50x, 100x, 200x e 500x) foi observada a microestrutura da amostra em todas as zonas de interesse. Por vezes, quando ainda não são bem perceptíveis os grãos de material volta-se a repetir o ataque químico por mais uns segundos com vista a contrastar melhor a amostra e revelar a microestrutura do material. As respetivas micrografias com escala foram sendo guardadas numa *pen-drive*.



Figura A1 - Material utilizado no polimento das amostras: a) Polidora com prato giratório; b) Lixas de água com diferentes granulometrias e pano.

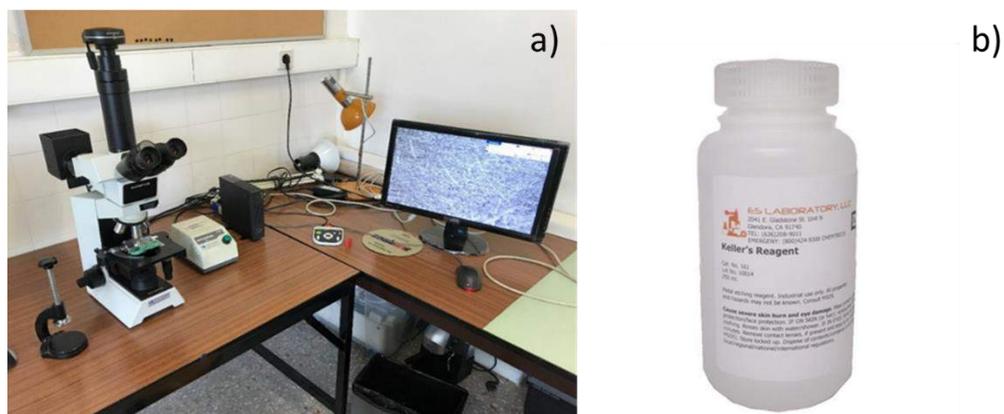


Figura A2 – Aparato para observação e ataque químico: a) Microscópio ótico (Olympus CX-40) com câmara digital e saída para monitor; b) Reagente Keller para contraste químico.

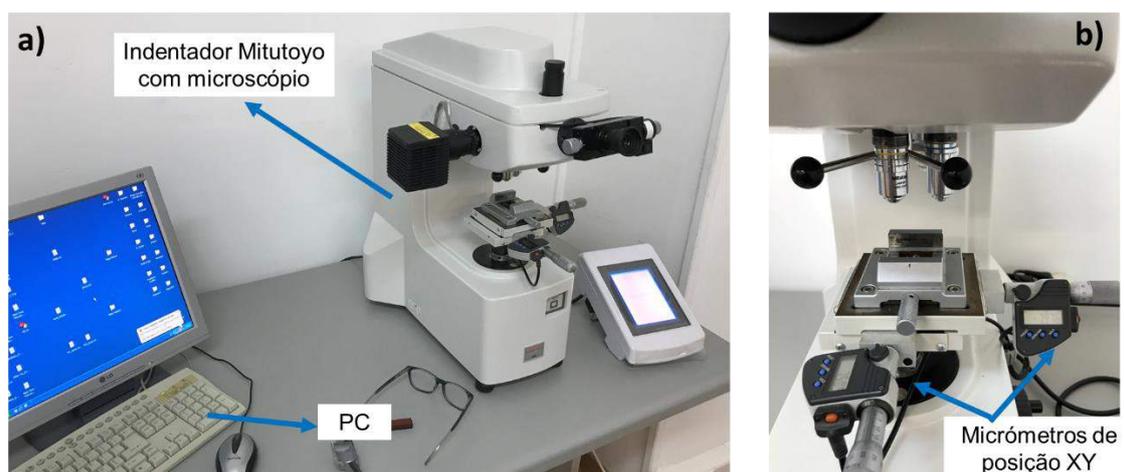


Figura A3 - Indentador Mitutoyo – Hardness Testing Machine com interface gráfica e ligação a PC para escrita dos resultados: a) Equipamento utilizado; b) Pormenor do micrómetro de posição.

### Anexo 3 – Parâmetros dos ensaios realizados em END por CI

Tabela A1 – Parâmetros dos END por CI realizados na mesa XYZ adaptada.

Ensaio	Provete	Frequência [kHz]	Fase [°]	Ganho [dB]
1	#2	100	102	50
2	#2	200	141	50
3	#2	300	167	50
4	#2	400	189	50
5	#2	500	205	50
6	#2	600	100	50
7	#2	700	118	50
8	#2	1000	156	60

9	#2	2000	166	60
10	#2	4000	226	60
11	#2	6000	57	60
12	#3	100	102	50
13	#3	200	141	50
14	#3	300	167	50
15	#3	400	189	50
16	#3	500	205	50
17	#3	600	100	50
18	#3	700	118	50
19	#3	1000	156	60
20	#3	2000	166	60
21	#3	4000	226	60
22	#3	6000	57	60

Tabela A2 – Parâmetros dos END por CI realizados no Protótipo Funcional.

Ensaio	Provete	Frequência [kHz]	Fase [°]	Ganho [dB]
1	#1	100	102	50
2	#1	200	141	50
3	#1	300	167	50
4	#1	400	189	50
5	#2	100	102	50
6	#2	150	103	50
7	#2	200	141	50
8	#2	250	160	60
9	#2	300	166	60
10	#2	400	189	60
11	#2	500	205	60
12	#2	600	100	50
13	#2	800	128	50
14	#2	1000	156	50
15	#3	100	102	50
16	#3	300	166	50
17	#3	400	189	50
18	#3	500	205	50
19	#4	100	102	50
20	#4	300	166	60
21	#4	400	189	60
22	#4	500	205	60
23	#5	100	102	60
24	#5	200	141	50
25	#5	300	166	50
26	#5	450	196	50
27	#5	500	205	50

28	#5	600	100	50
29	#5	800	128	60
30	#5	1000	156	60
31	#6	100	102	50
32	#6	200	141	50
33	#6	300	167	50
34	#6	450	196	50
35	#6	500	205	50
36	#6	600	100	50
37	#6	800	128	60
38	#6	1000	156	60

**Anexo 4 – Resultados das micrografias nos provetes #1, #3 e #4.**

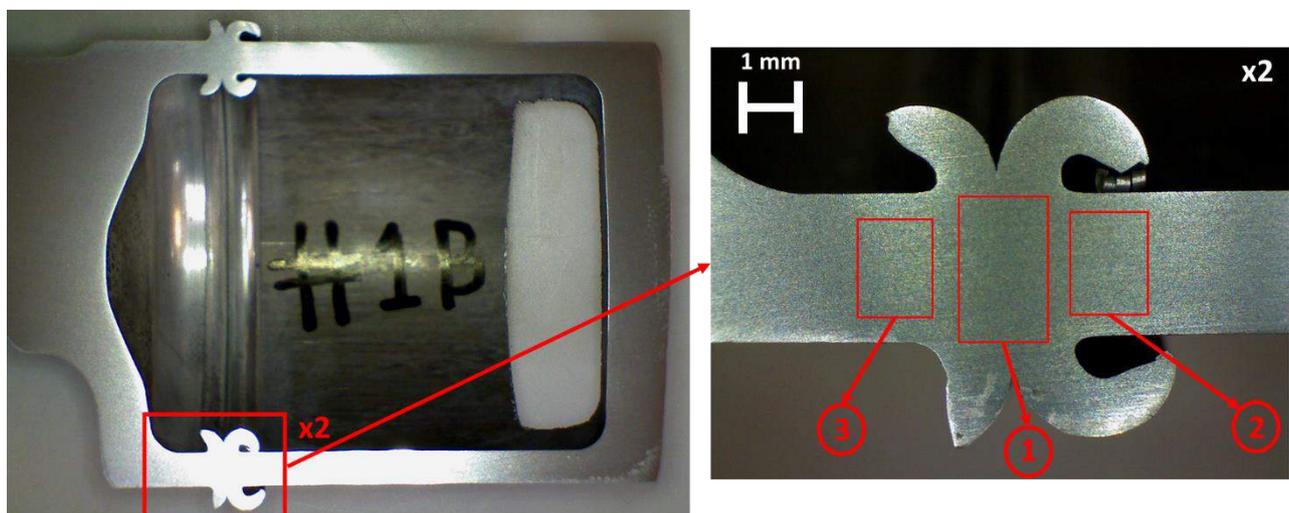


Figura A4 - Macrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA à direita do CS; 3) ZTMA e ZTA à esquerda do CS.

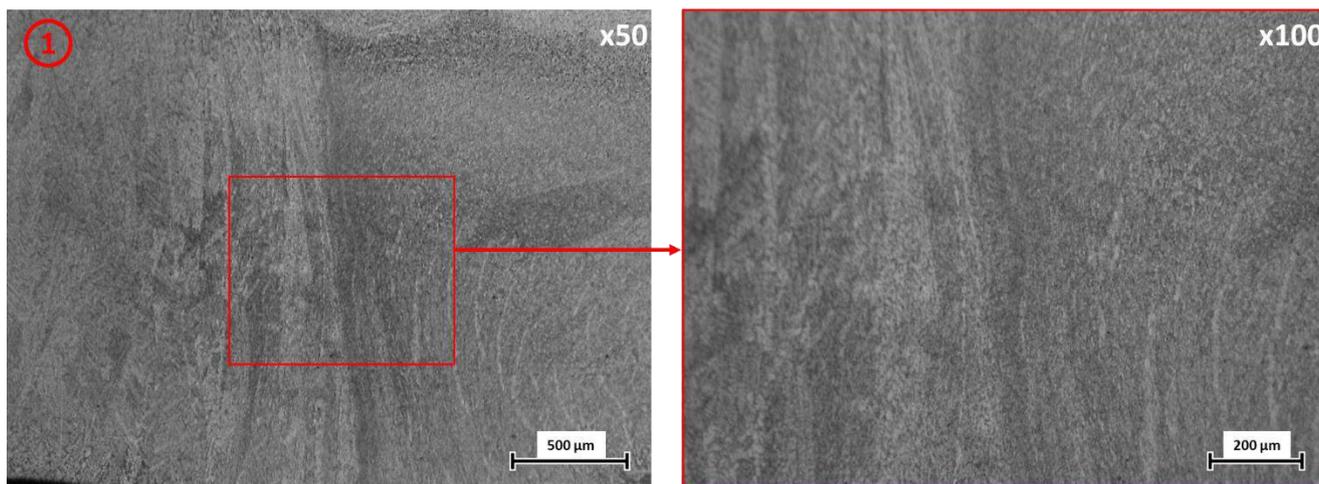


Figura A5 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.

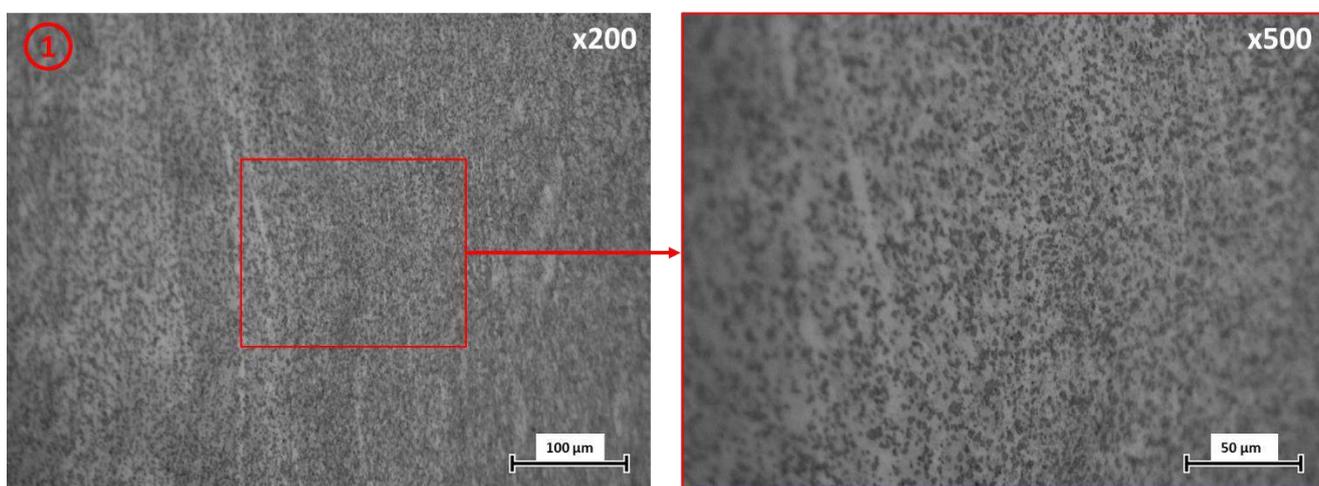


Figura A6 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 1.

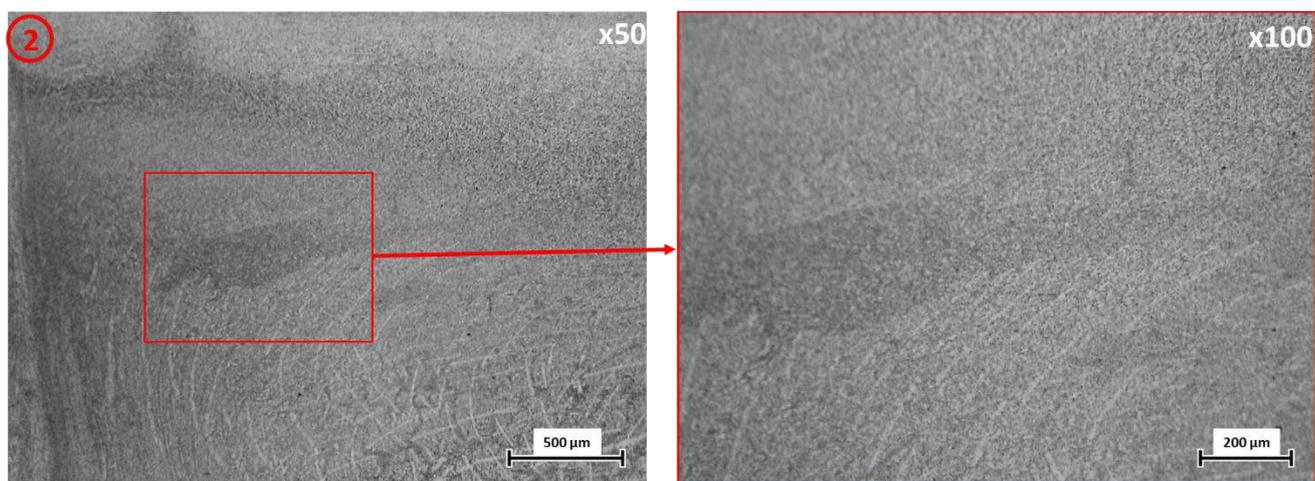


Figura A7 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.

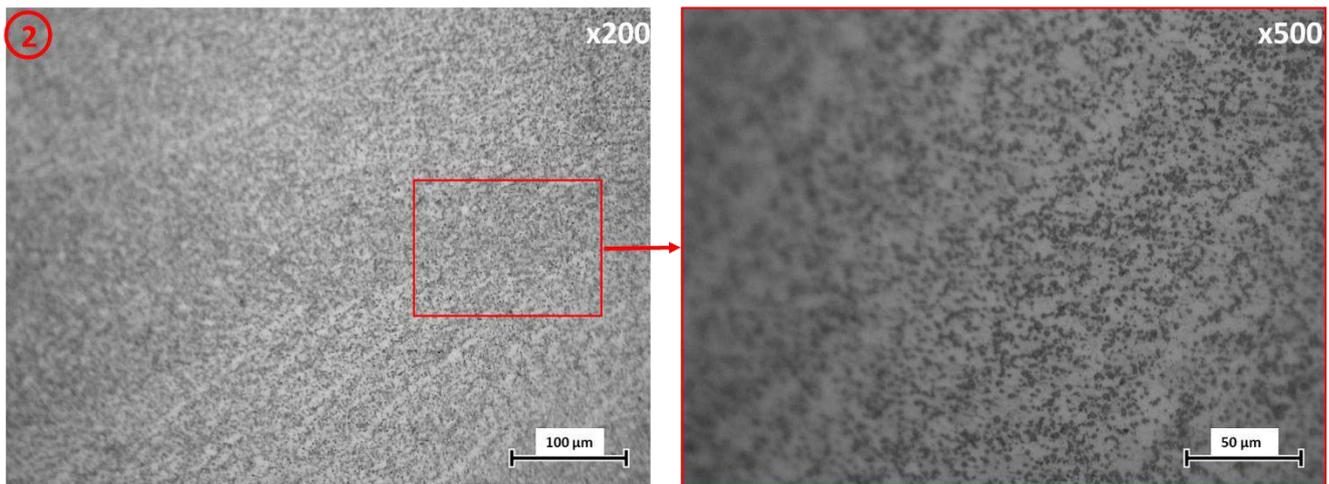


Figura A8 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 2.

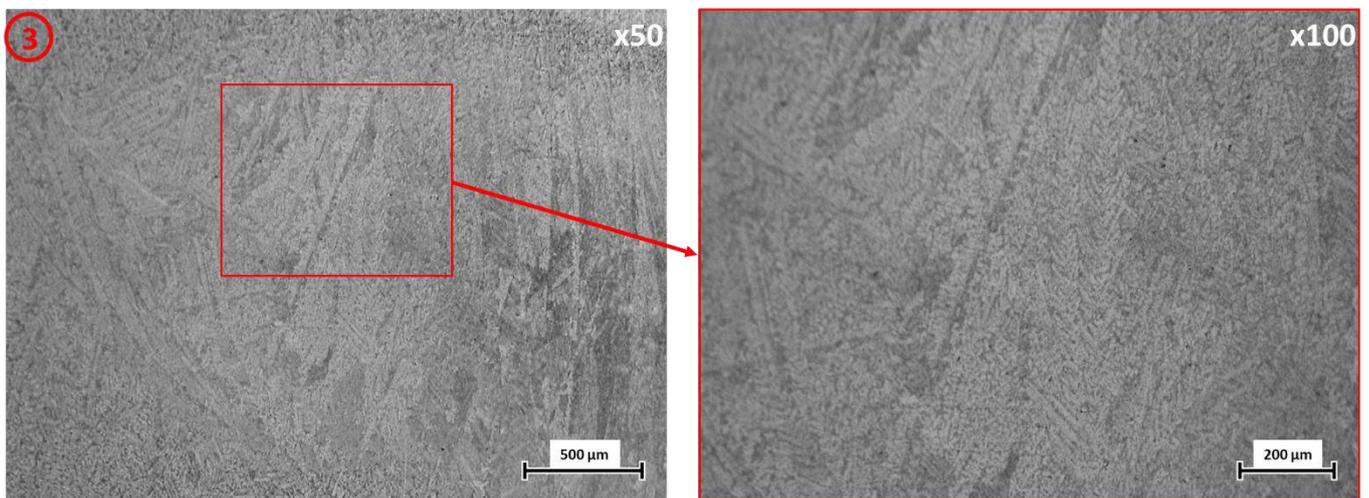


Figura A9 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.

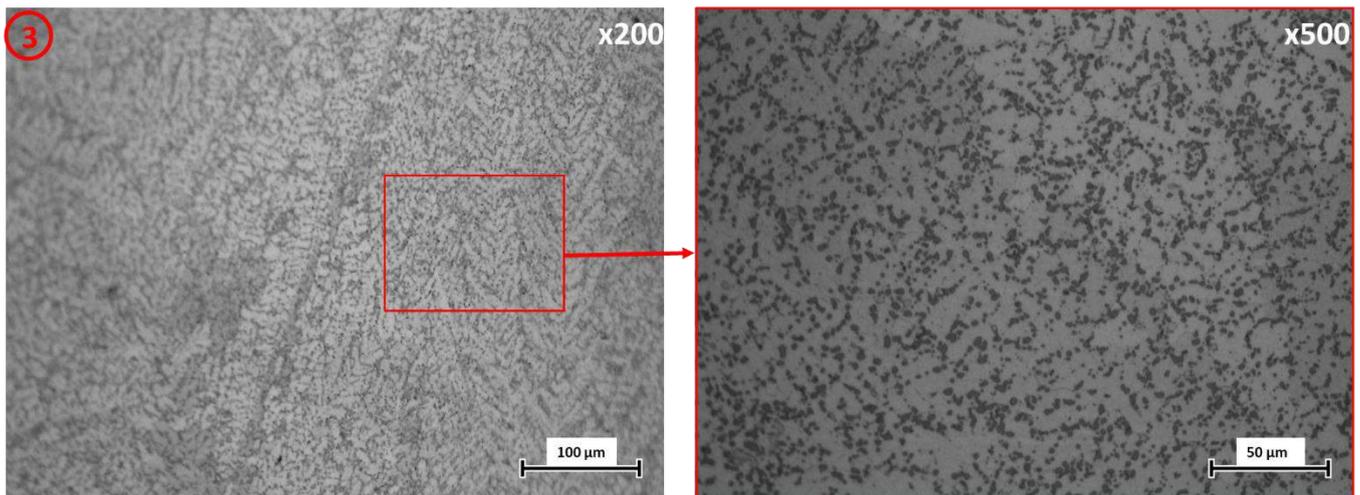


Figura A10 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 3.

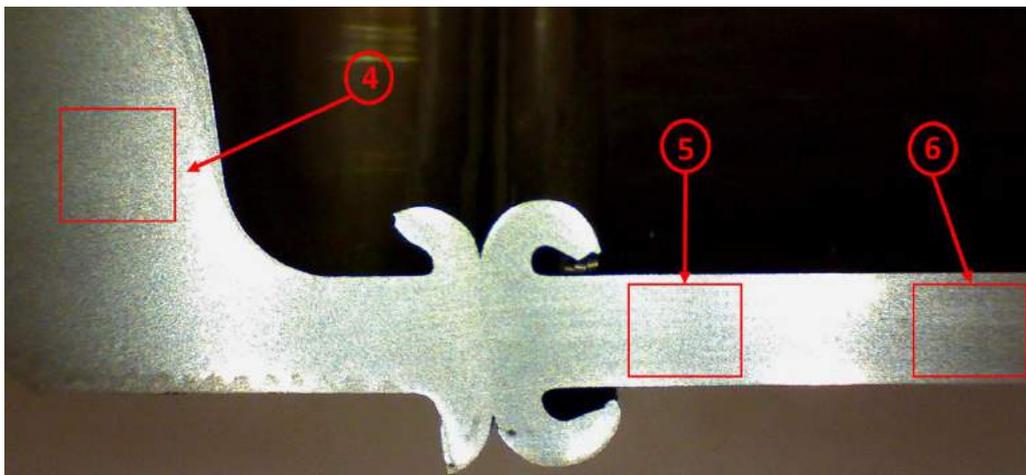


Figura A11 - Macrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ), na zona da união, com identificação de mais três zonas de interesse: 4) MB da metade à esquerda do CS; 5) ZTA da metade à direita do CS; 6) MB da metade à direita do CS.

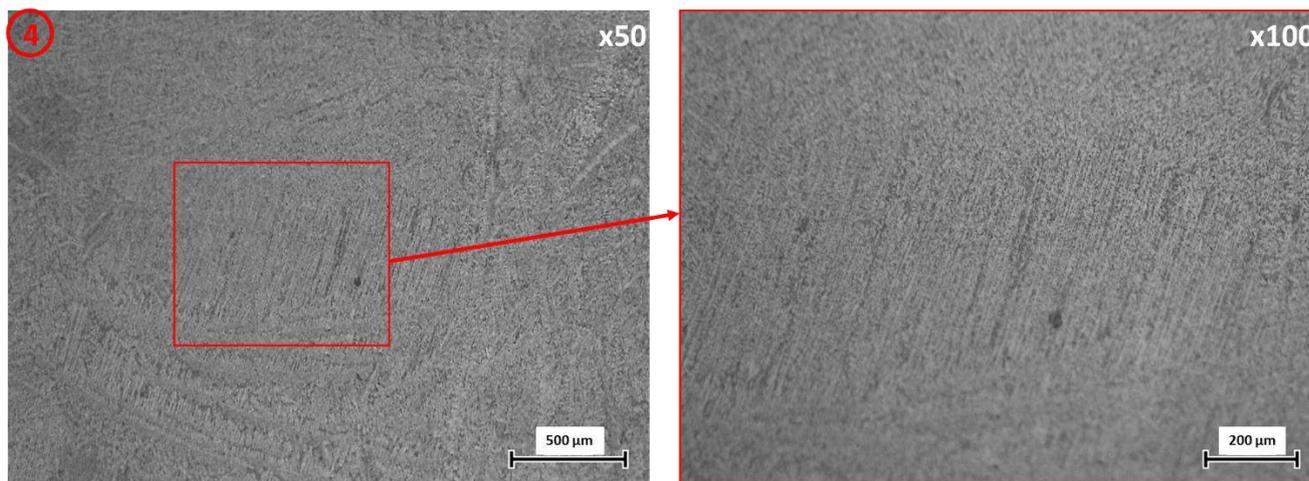


Figura A12 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 4.

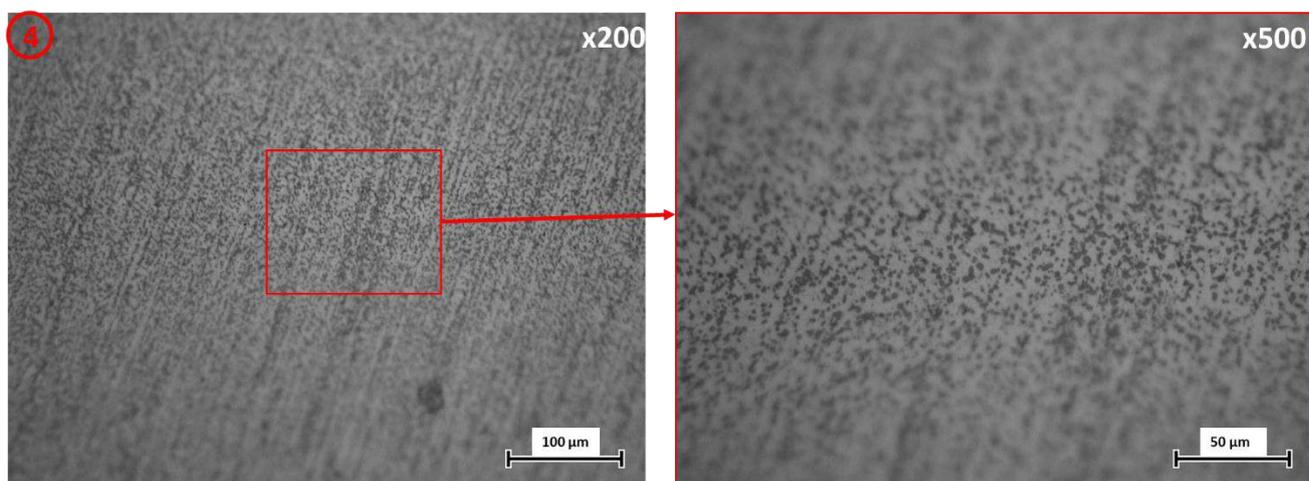


Figura A13 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 4.

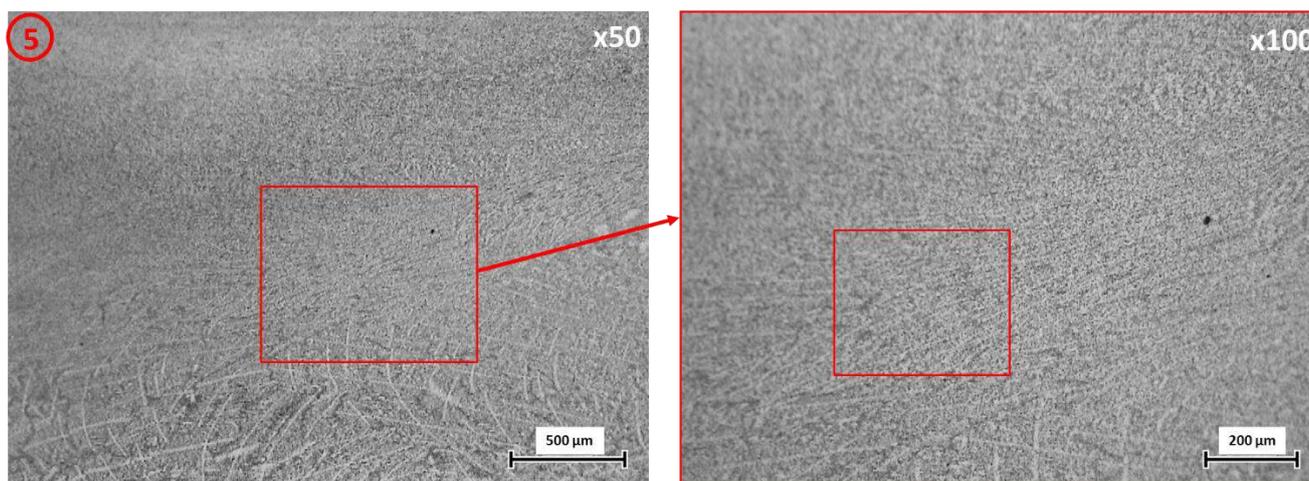


Figura A14 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 5.

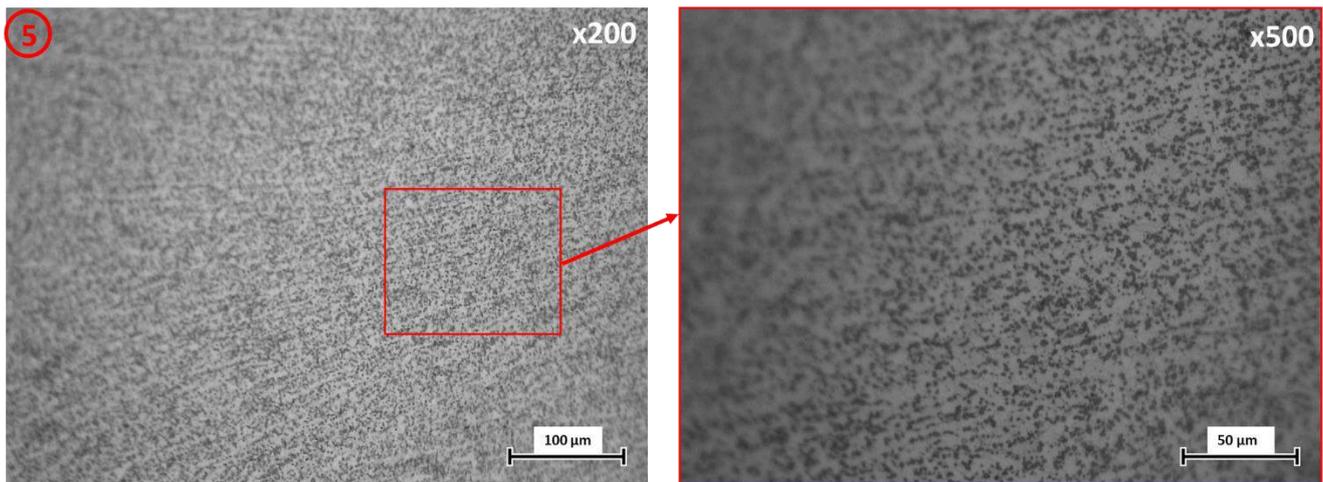


Figura A15 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 5.

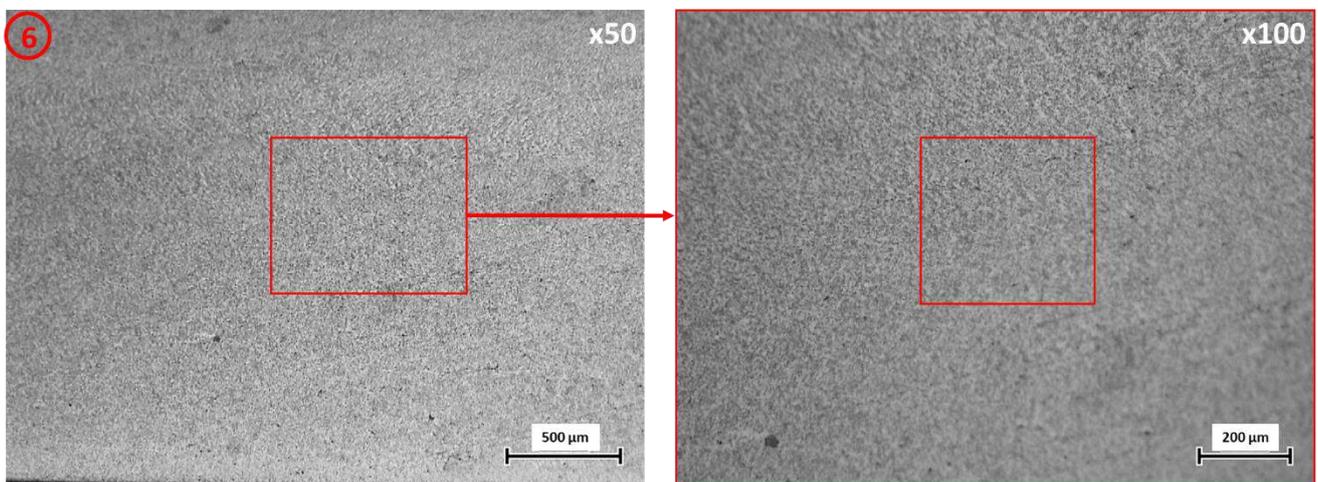


Figura A16 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 6.

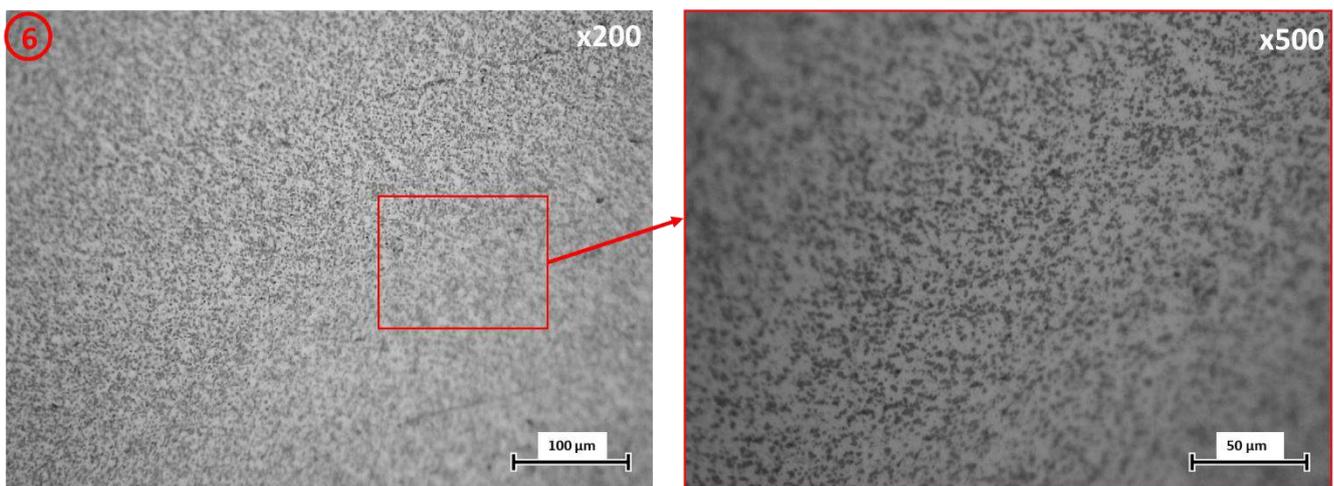


Figura A17 - Micrografia do provete #1B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 6.

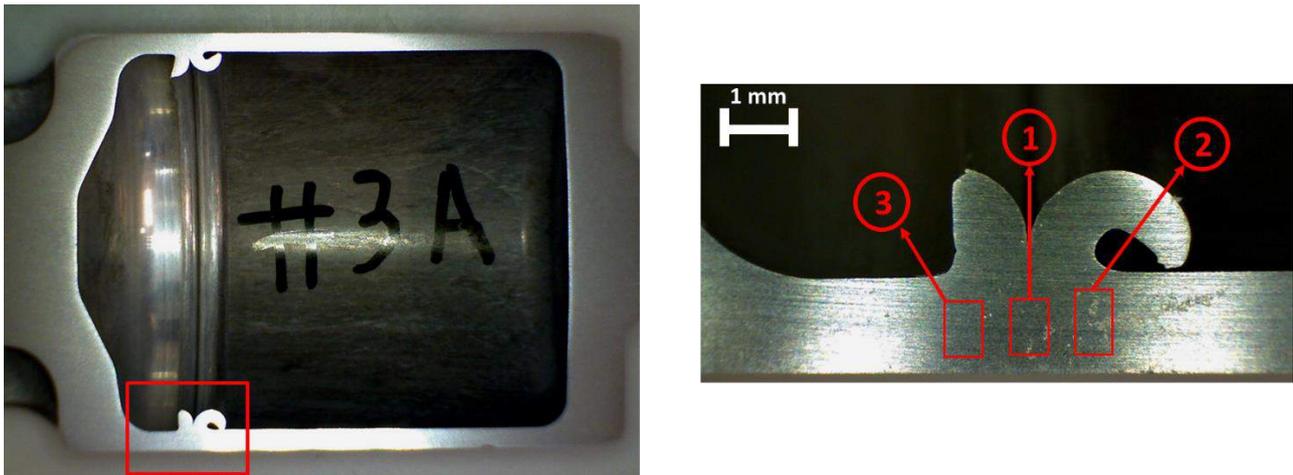


Figura A18 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA da metade à direita do CS; 3) ZTMA e ZTA da metade à esquerda.

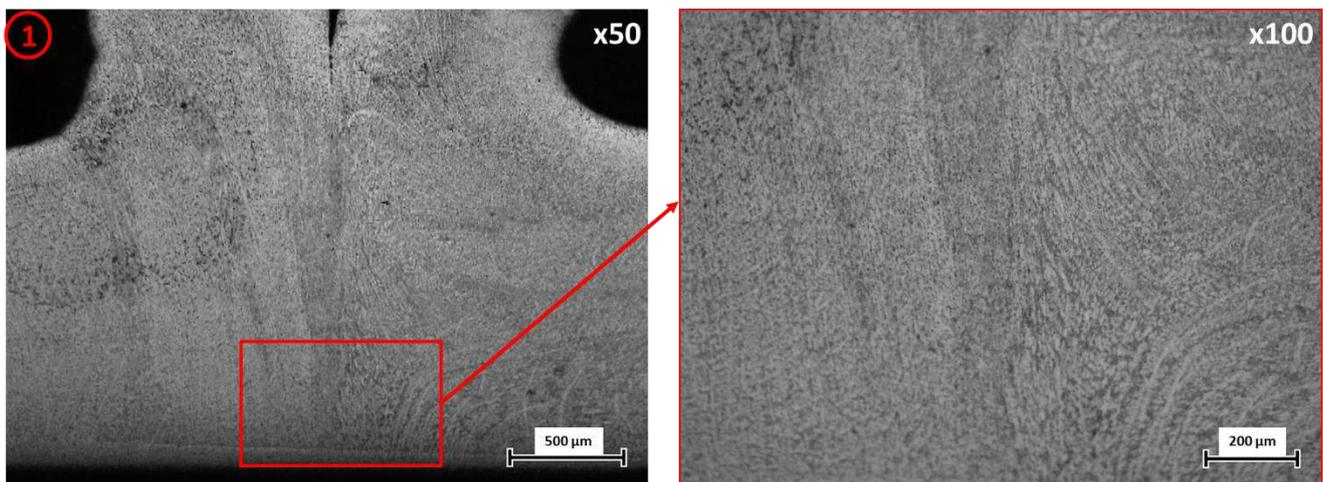


Figura A19 - Micrografia do provete #3<sup>a</sup> ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.

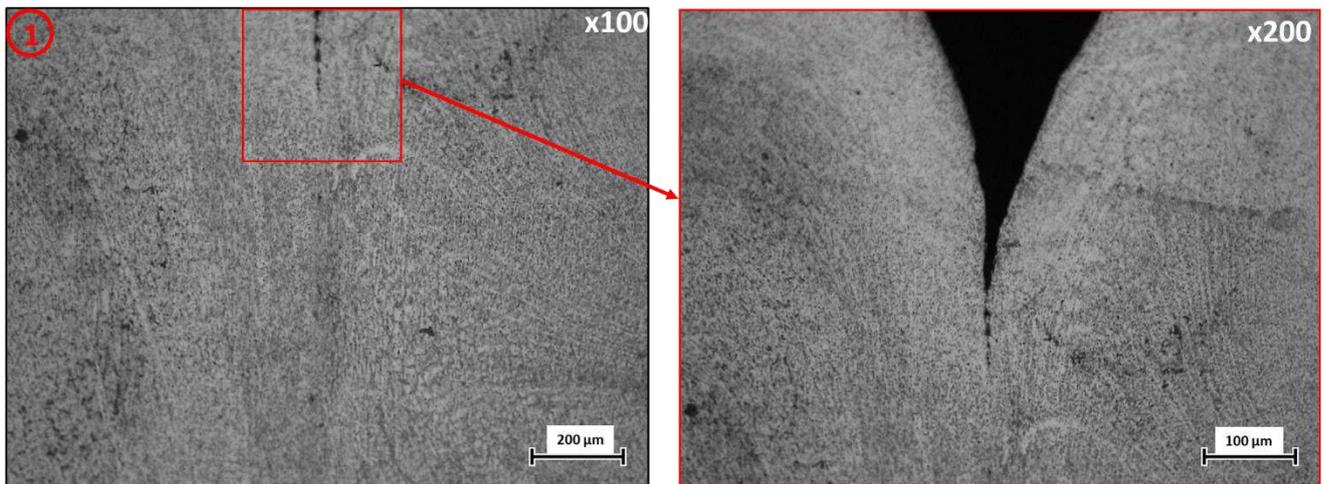


Figura A20 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 1.

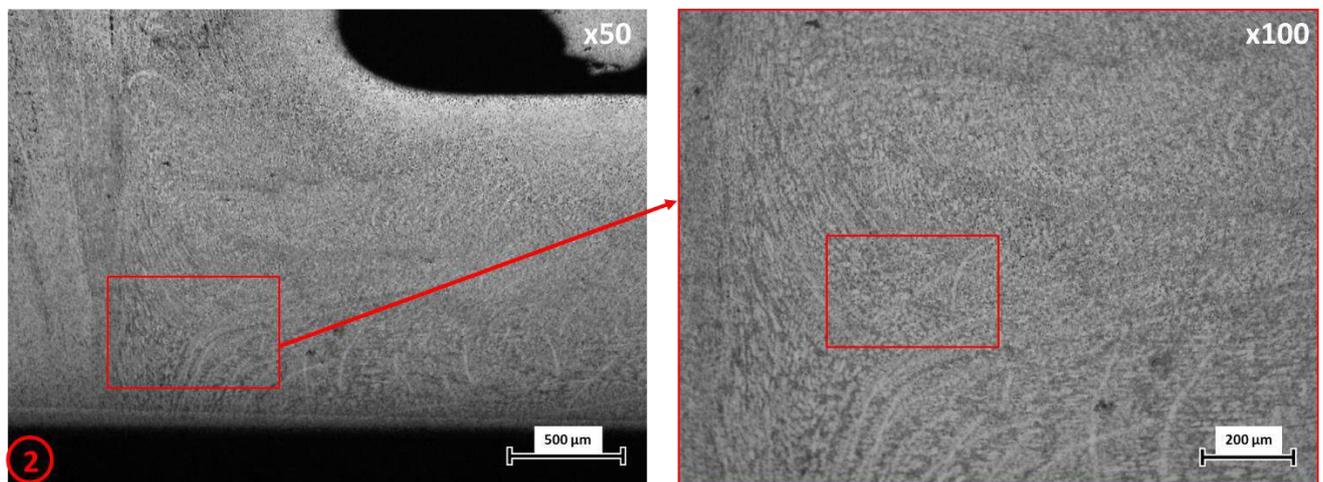


Figura A21 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.

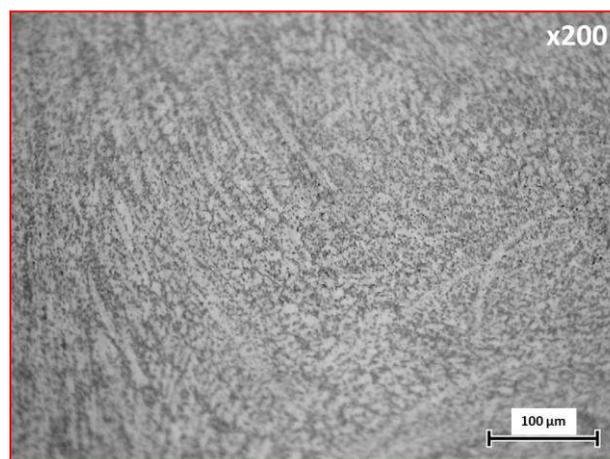


Figura A22 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 200x da zona 2.

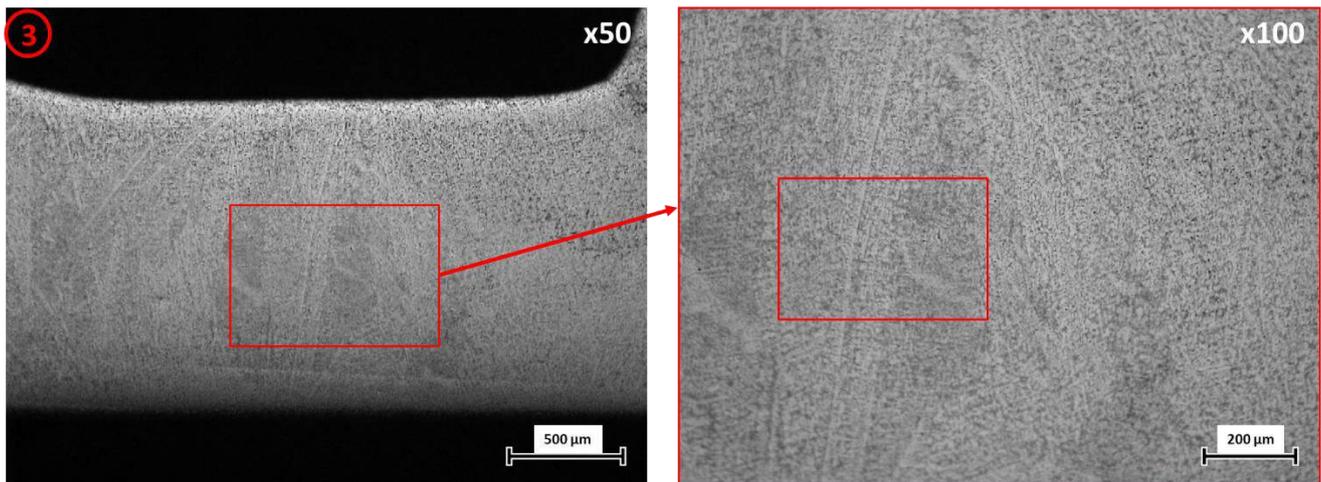


Figura A23 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.

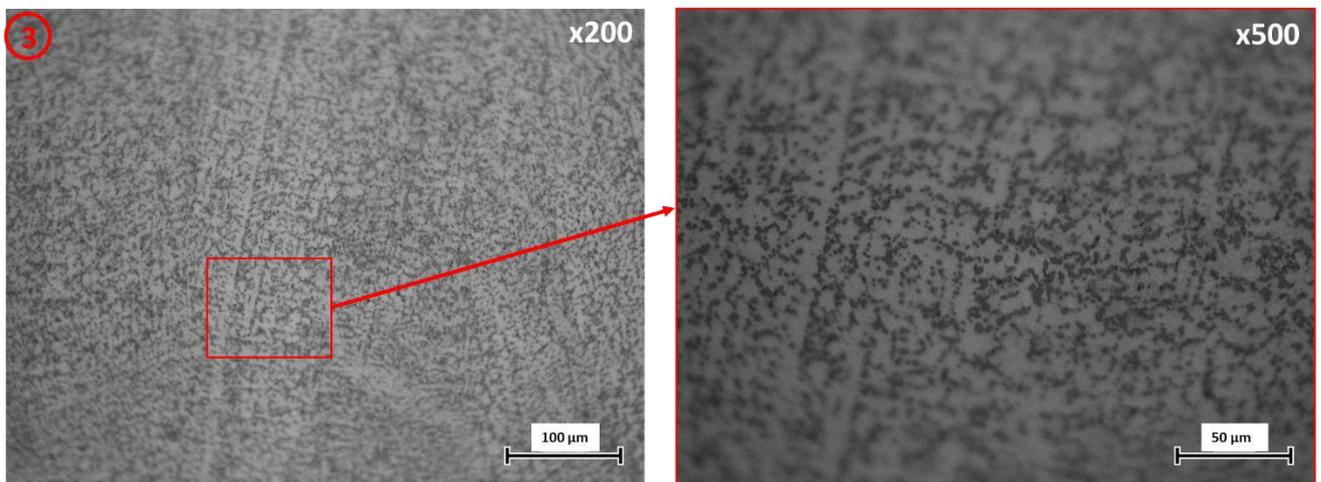


Figura A24 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 3.

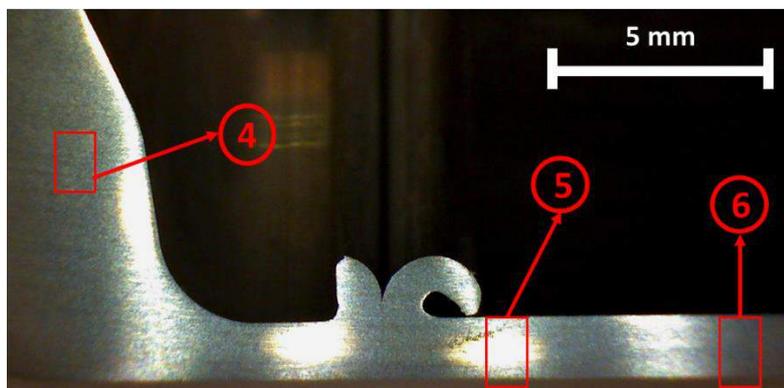


Figura A25 - Macrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ), na zona da união, com identificação de mais três zonas de interesse: 4) MB da metade à esquerda do CS; 5) ZTA da metade à direita do CS; 6) MB da metade à direita do CS.

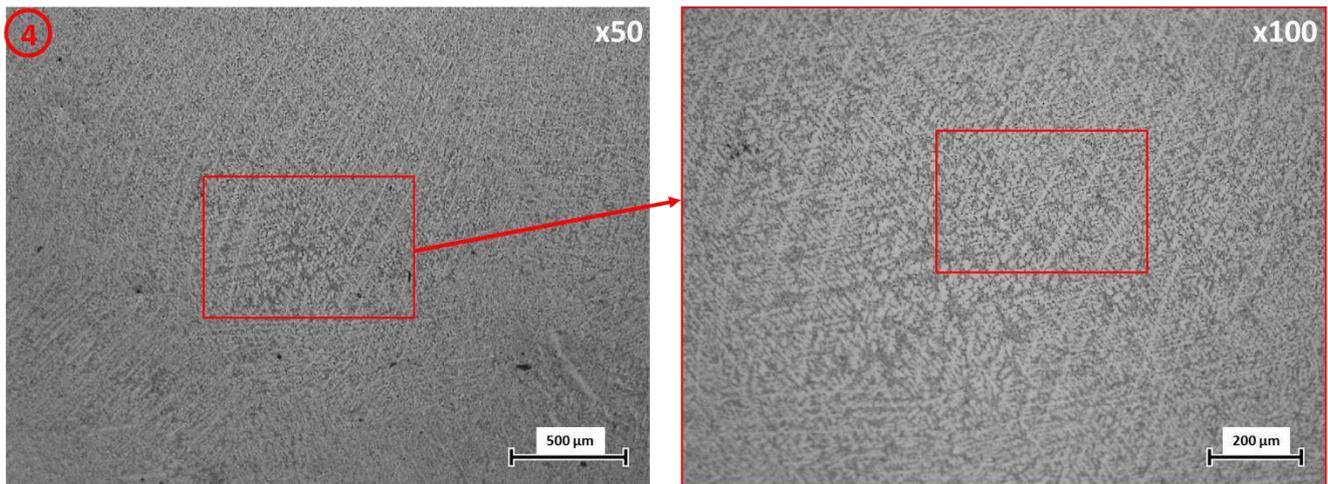


Figura A26 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 4.

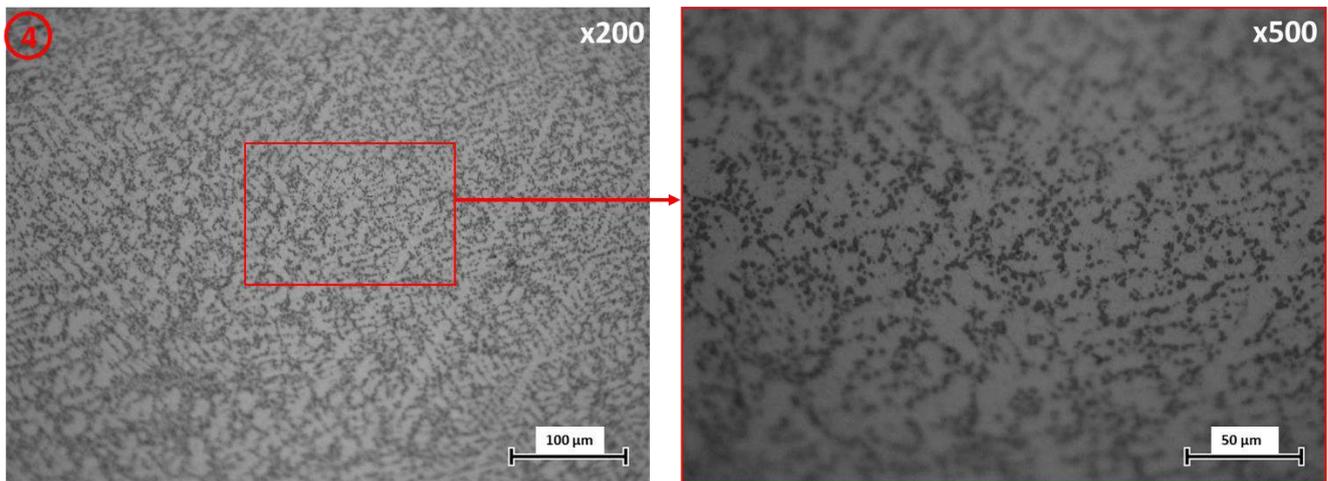


Figura A27 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 4.

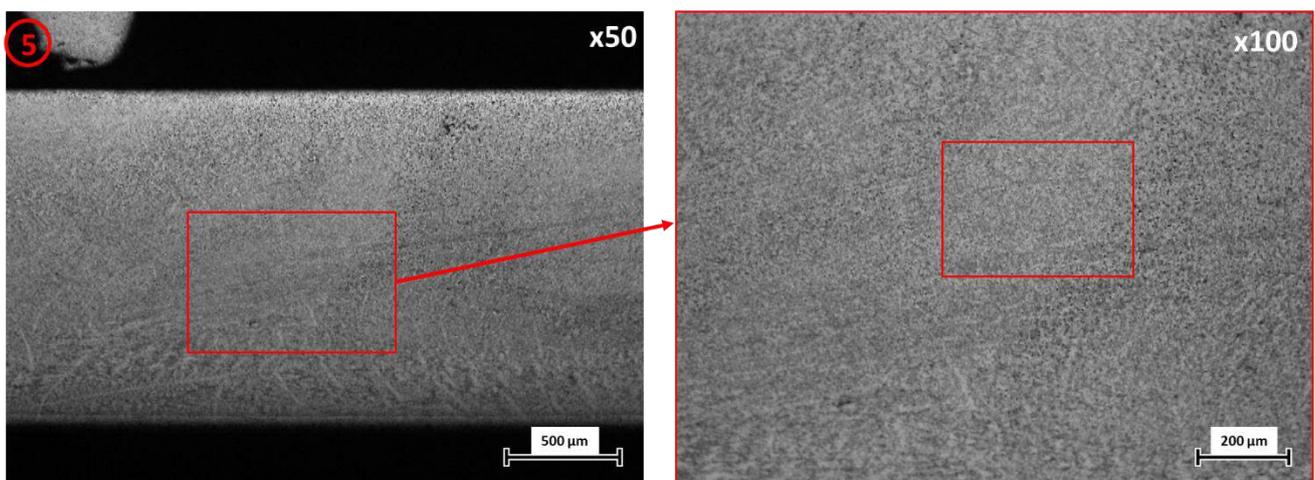


Figura A28 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 5.

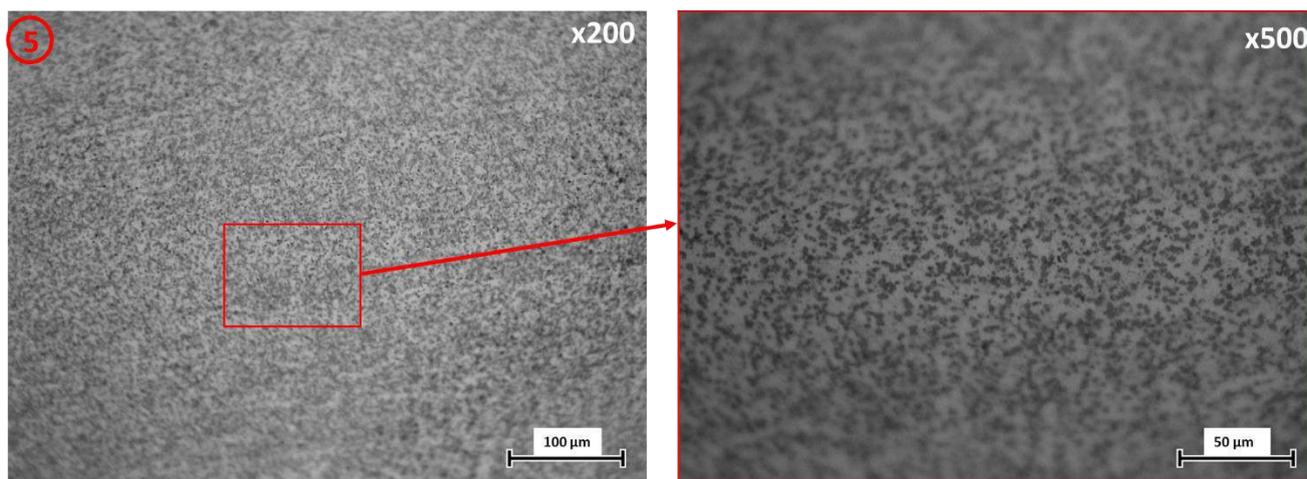


Figura A29 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 5.

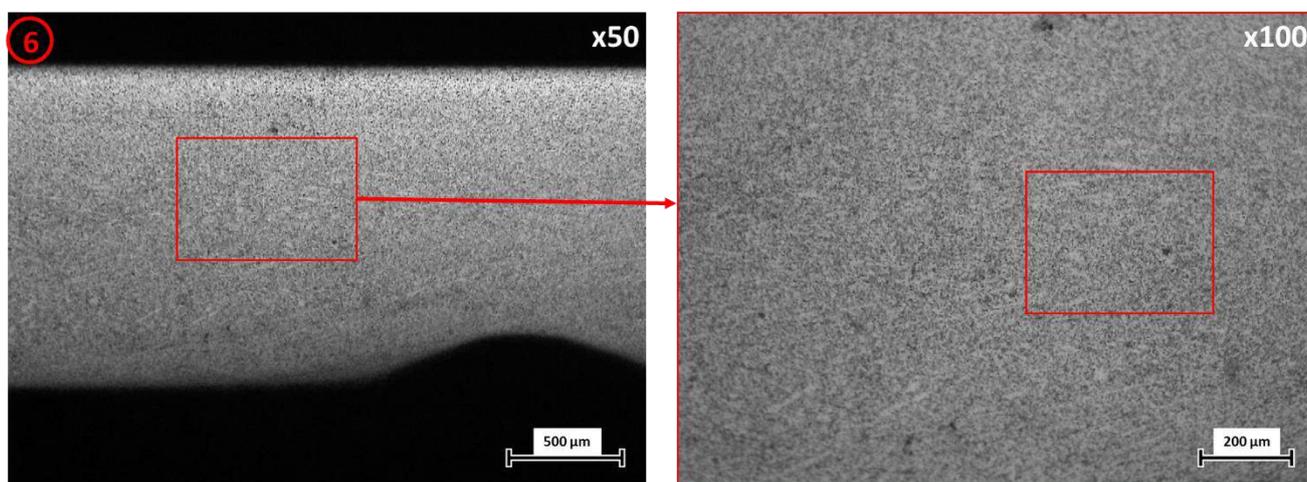


Figura A30 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 6.

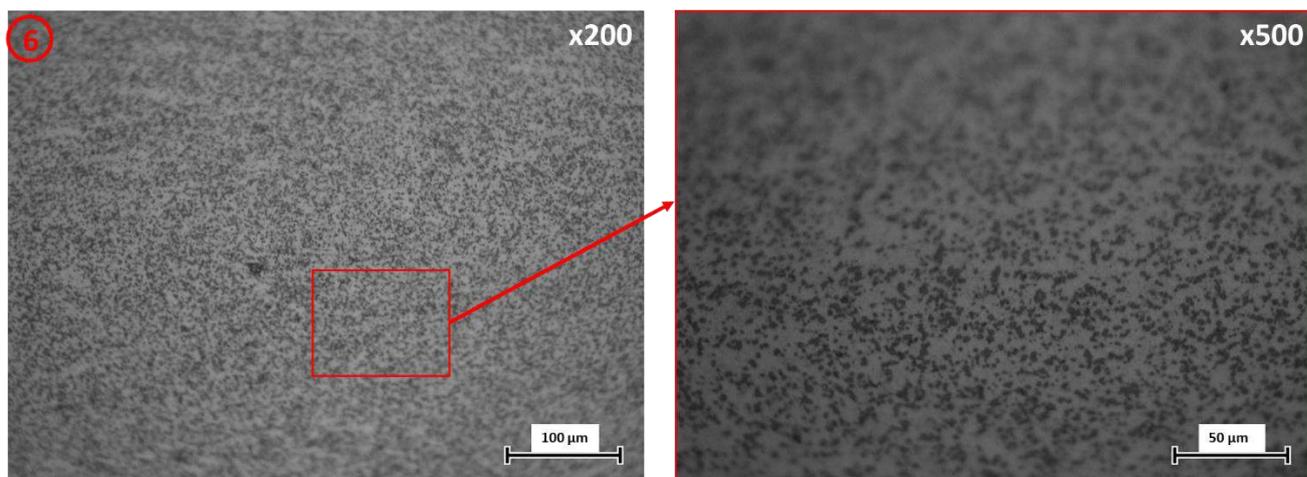


Figura A31 - Micrografia do provete #3A ( $\theta = 270^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 6.

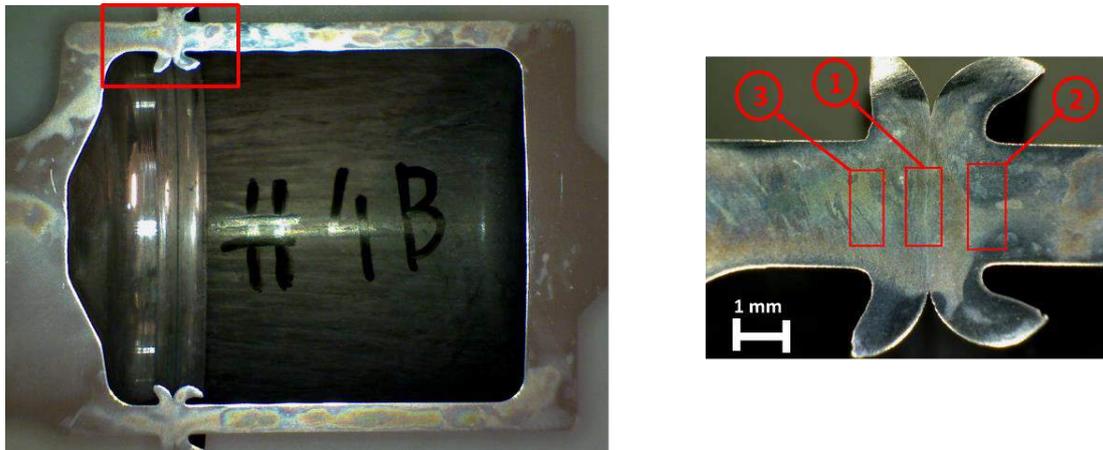


Figura A32 - Macrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ), na zona da união, e identificação das zonas de interesse: 1) Centro de Soldadura; 2) ZTMA e ZTA da metade à direita do CS; 3) ZTMA e ZTA da metade à esquerda.

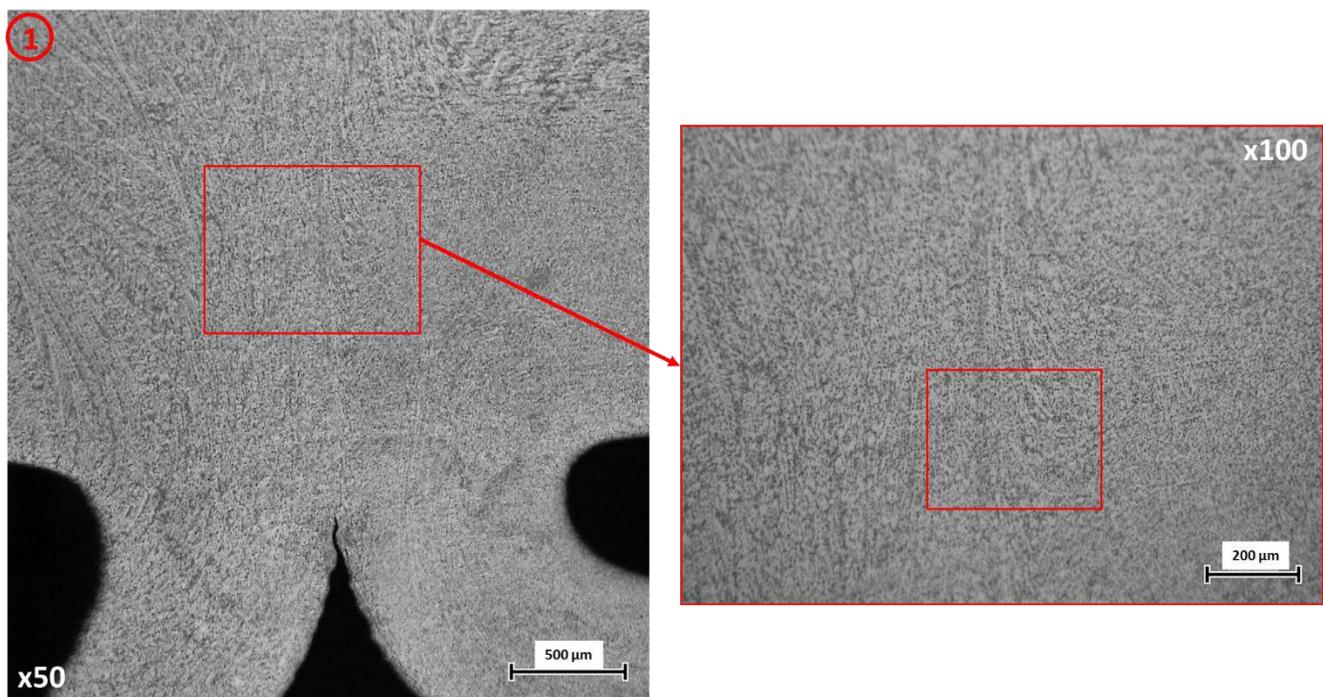


Figura A33 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.

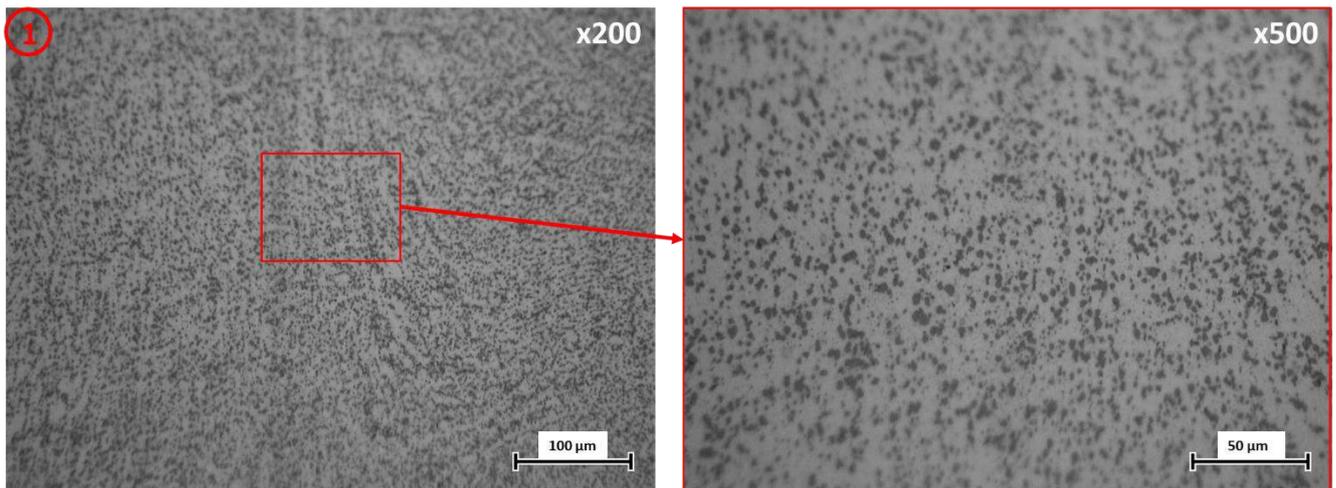


Figura A34 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 1.

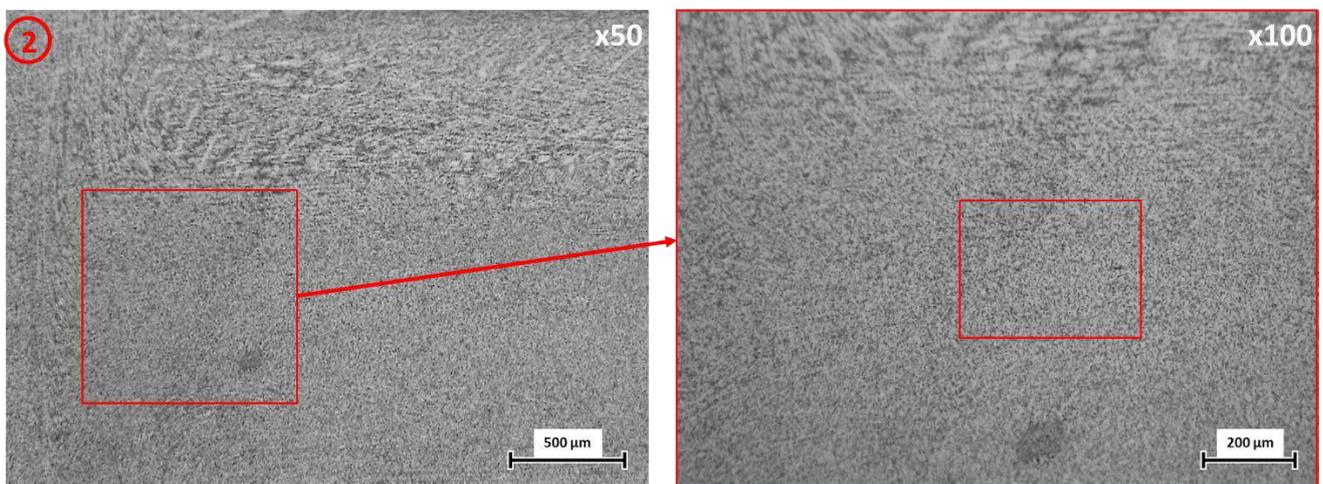


Figura A35 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 2.

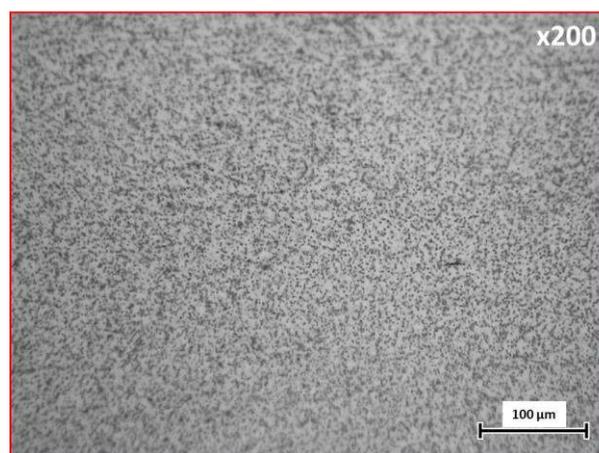


Figura A36 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 1.

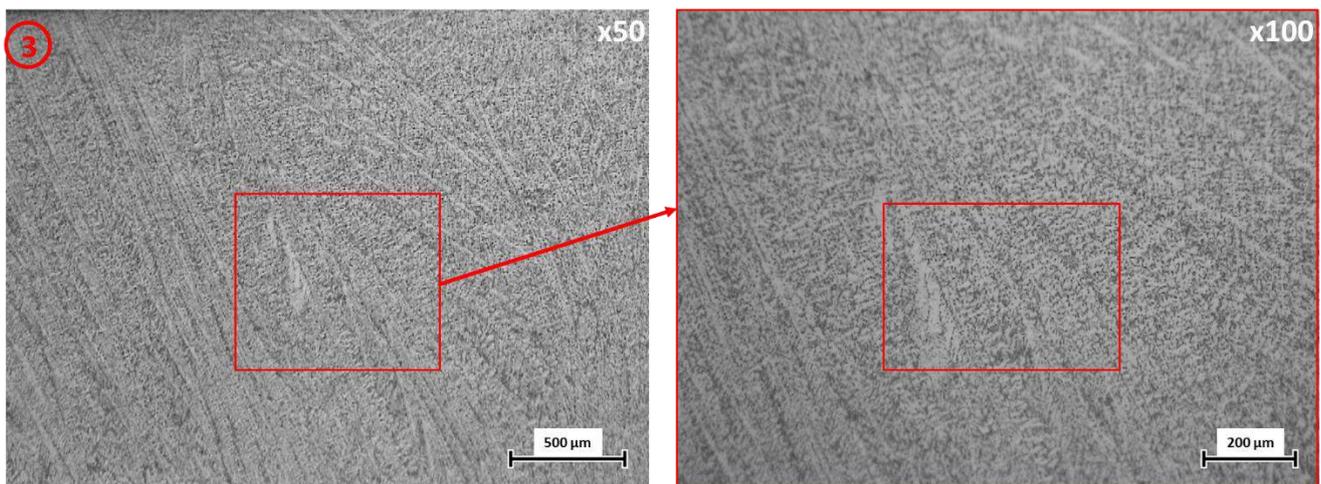


Figura A37 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 3.

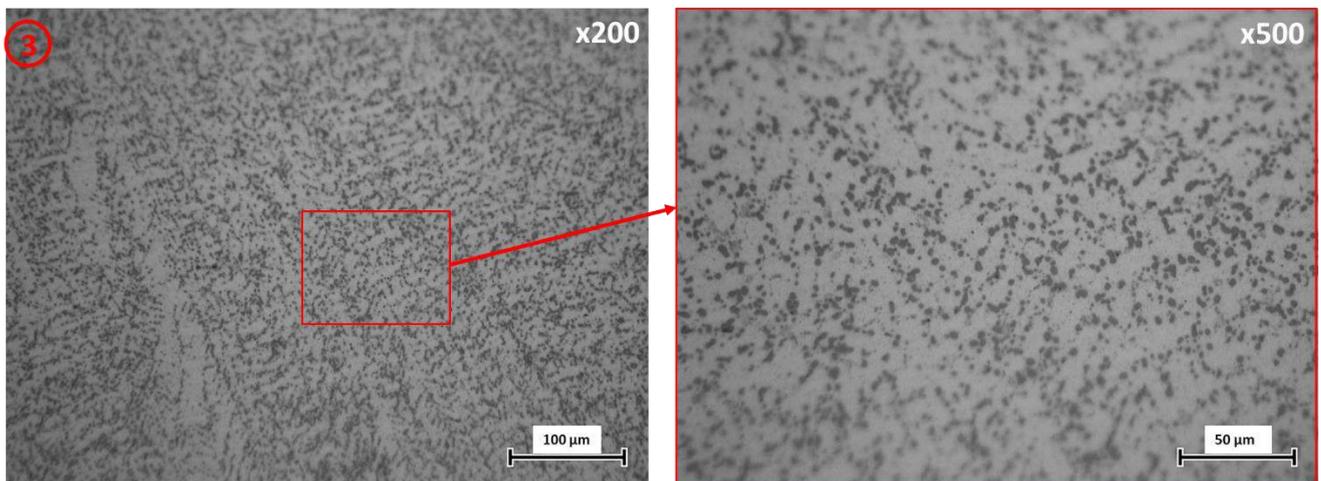


Figura A38 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 200x e 500x da zona 3.

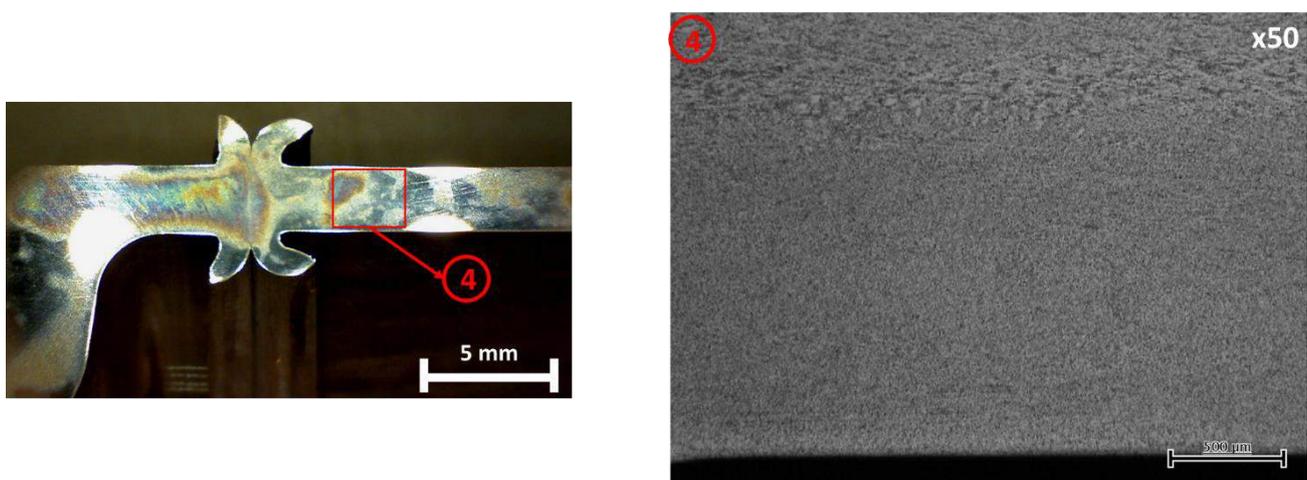


Figura A39 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 50x e 100x da zona 4.

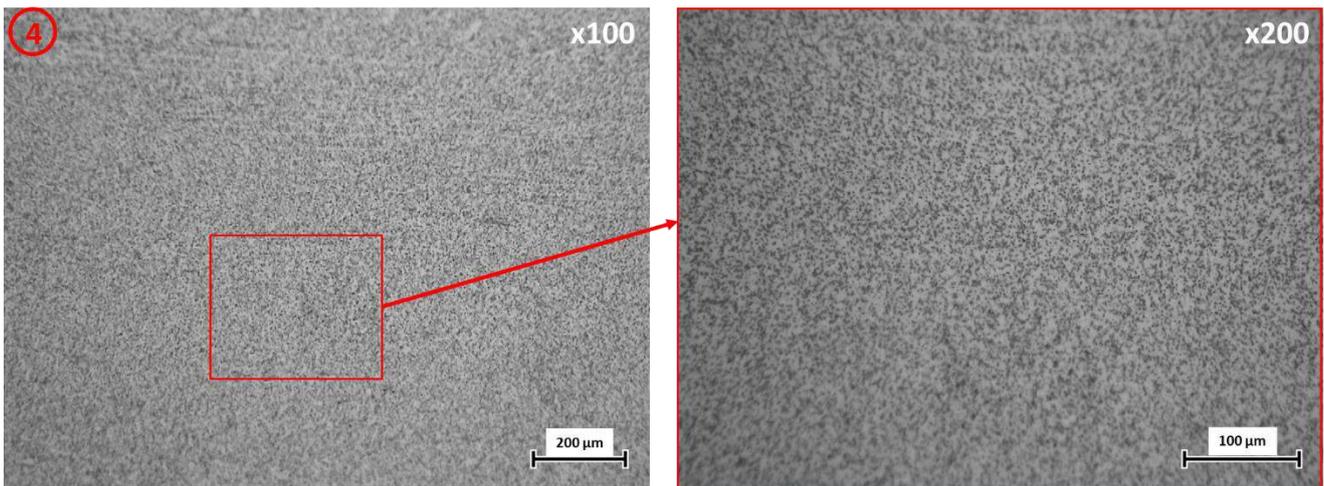


Figura A40 - Micrografia do provete #4B ( $\theta = 0^\circ$ ) ampliada em 100x e 200x da zona 4.

**Anexo 5 – Resultados dos perfis de condutividade nos provetes #5 e #6 para diferentes frequências**

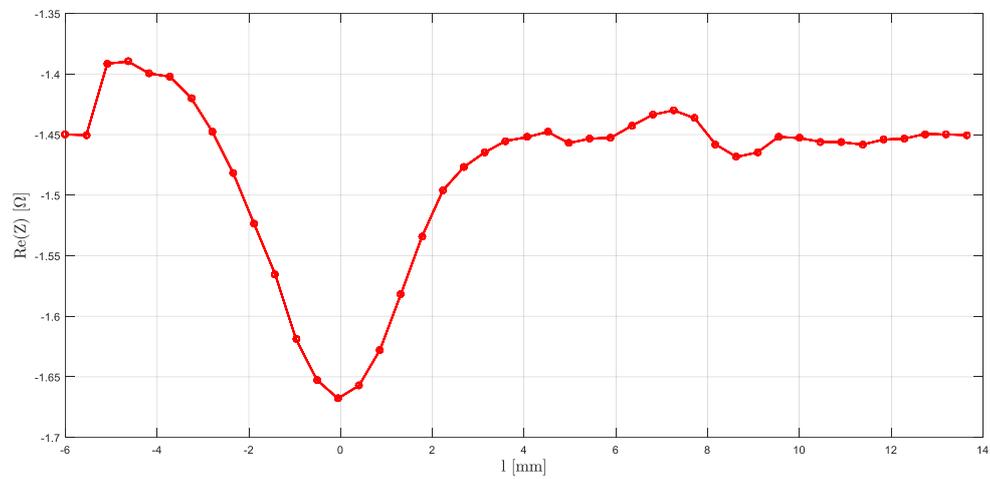


Figura A41 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 100 KHz.

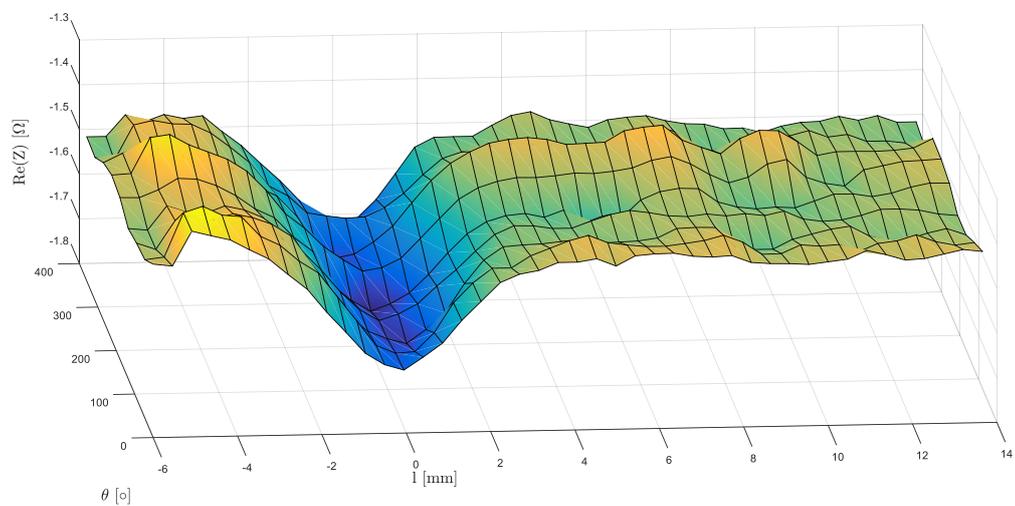


Figura A42 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 100 KHz.

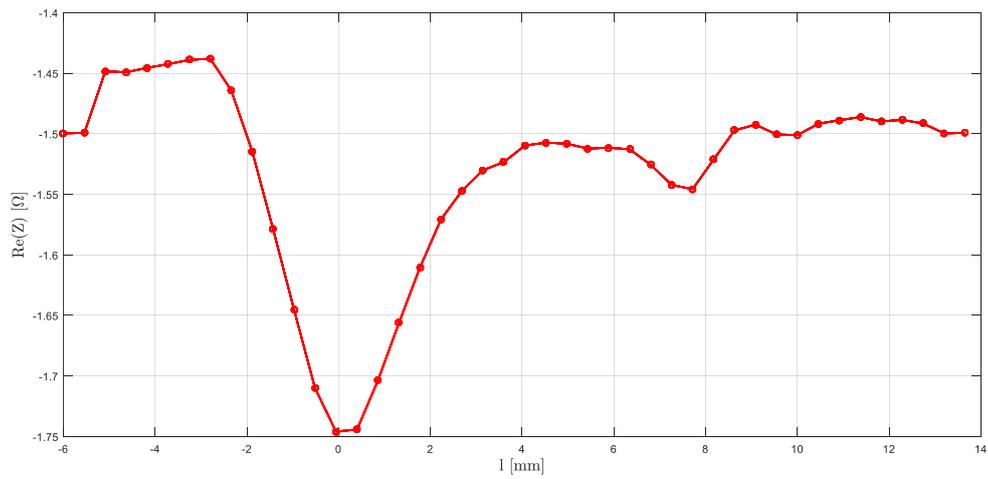


Figura A43 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 500 KHz.

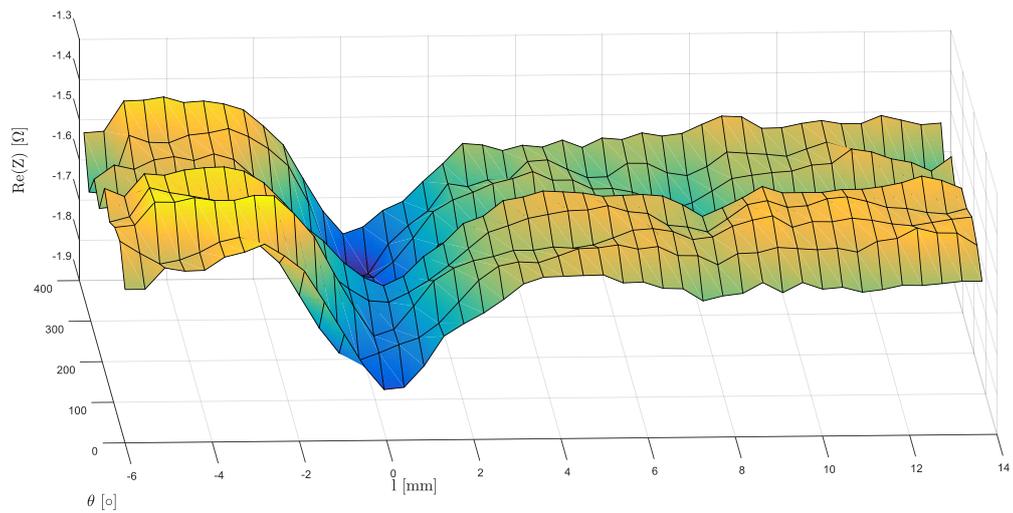


Figura A44 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 500 KHz.

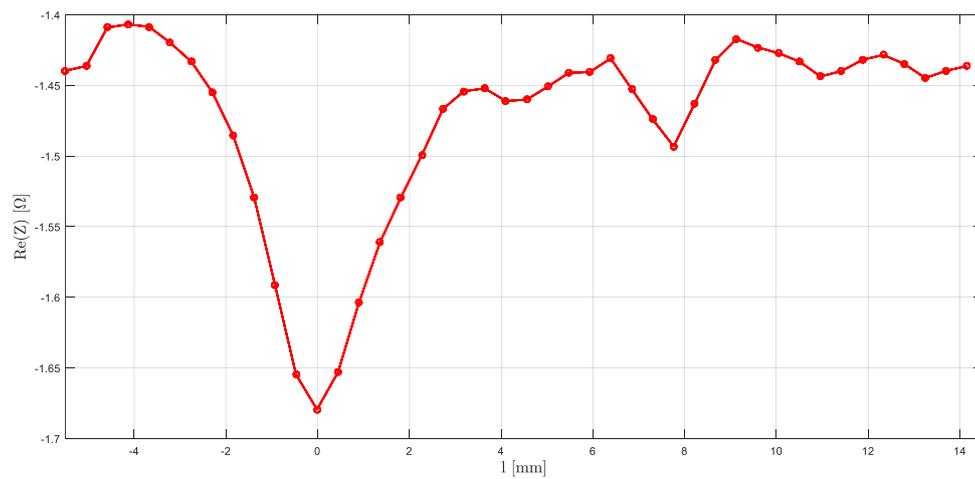


Figura A45 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 600 KHz.

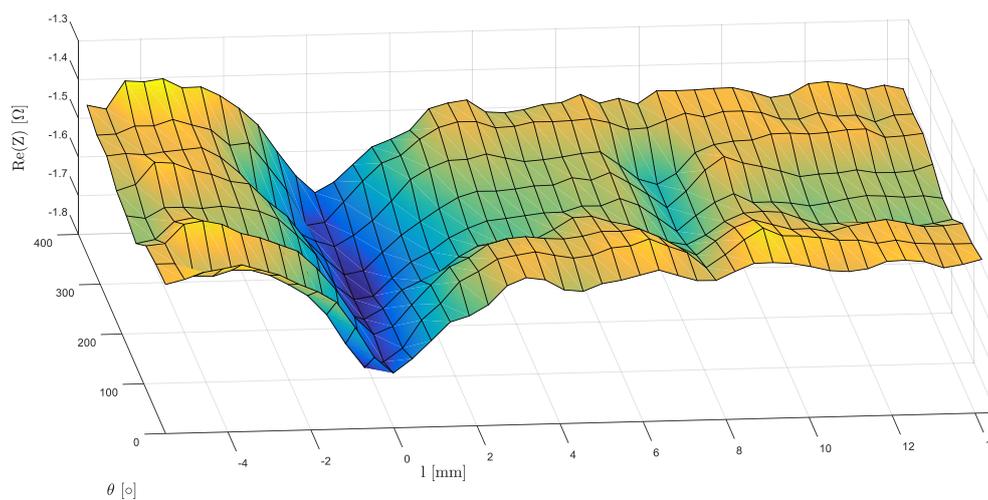


Figura A46 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 600 KHz.

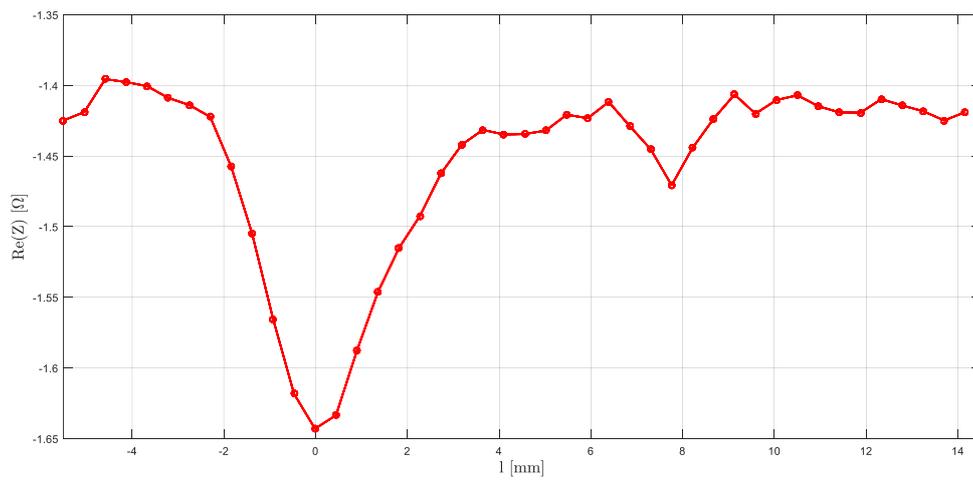


Figura A47 - Perfil de condutividade no provete #5 a uma frequência de 800 KHz.

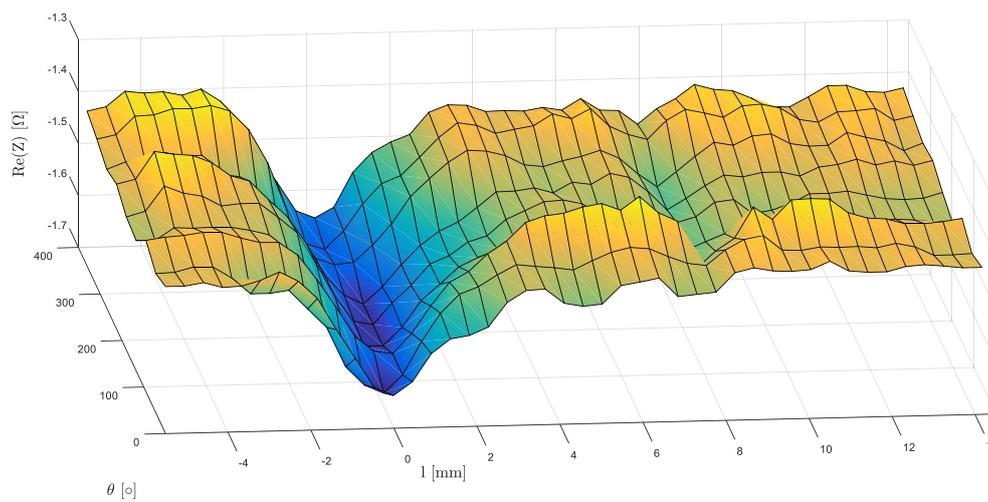


Figura A48 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #5 a 800 KHz.

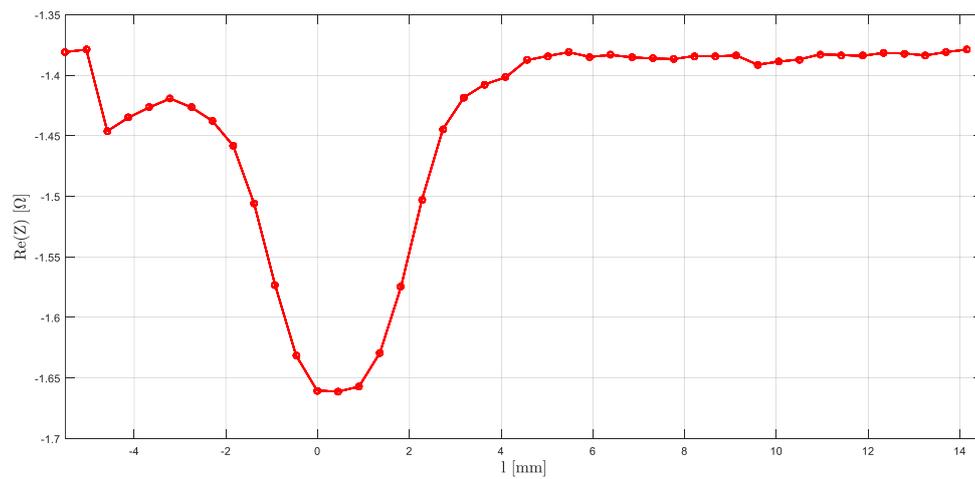


Figura A49 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 100 KHz.

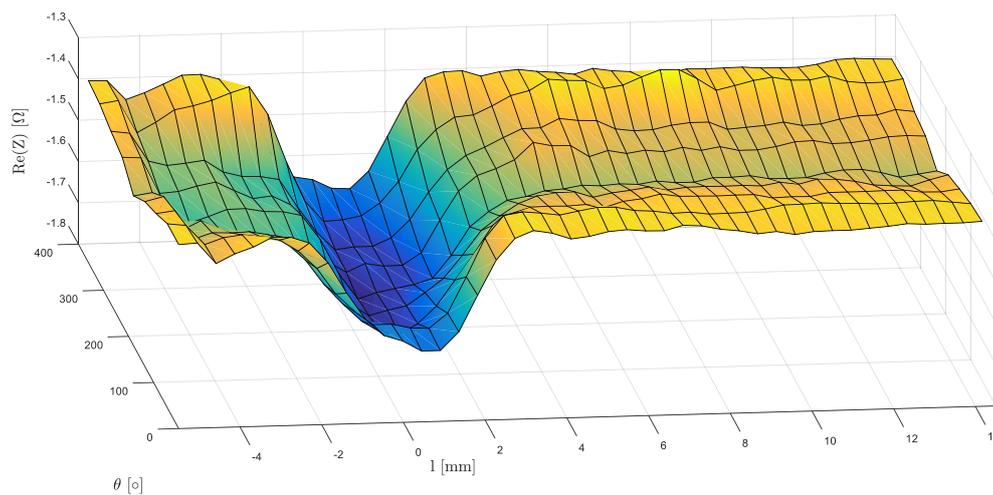


Figura A50 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a 100 KHz.

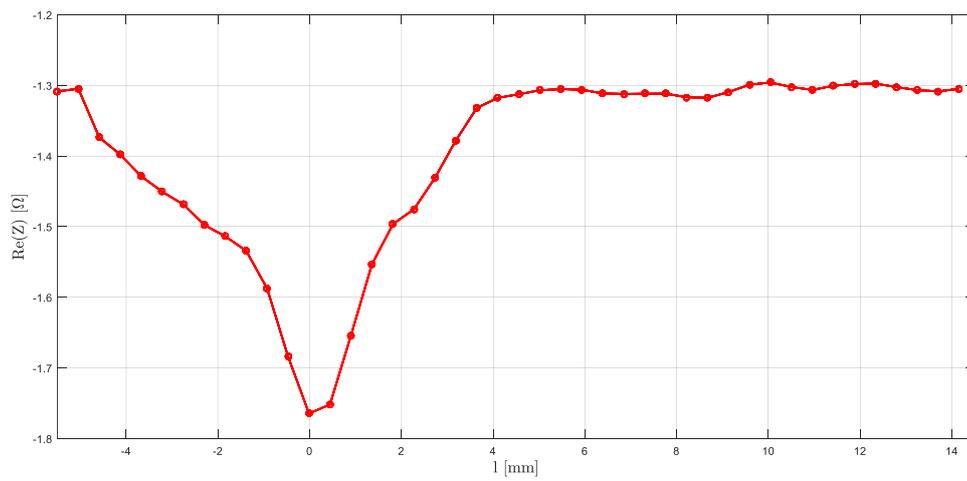


Figura A51 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 300 KHz.

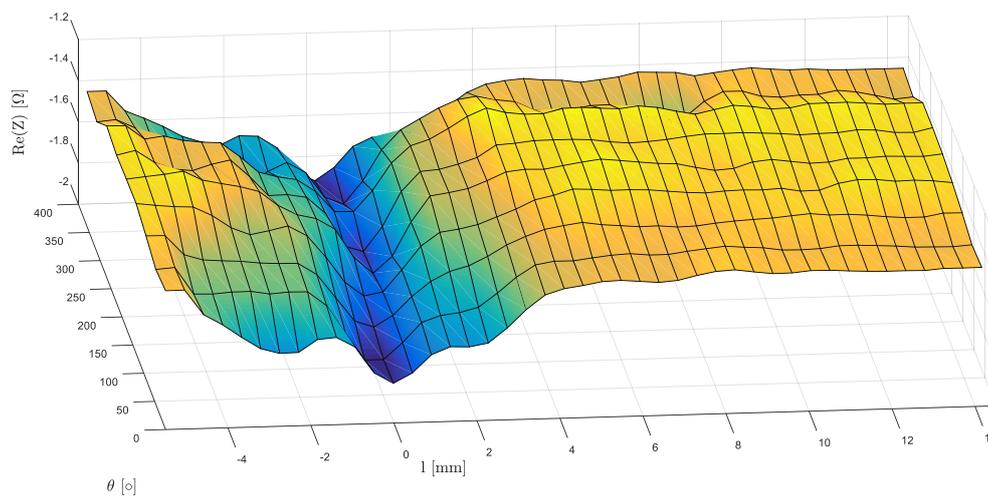


Figura A52 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a 300 KHz.

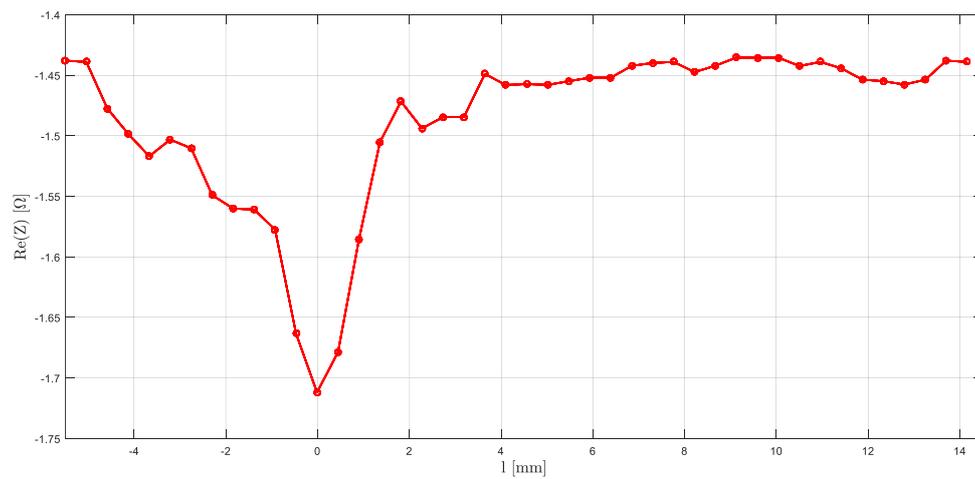


Figura A53 - Perfil de condutividade no provete #6 a uma frequência de 800 KHz.

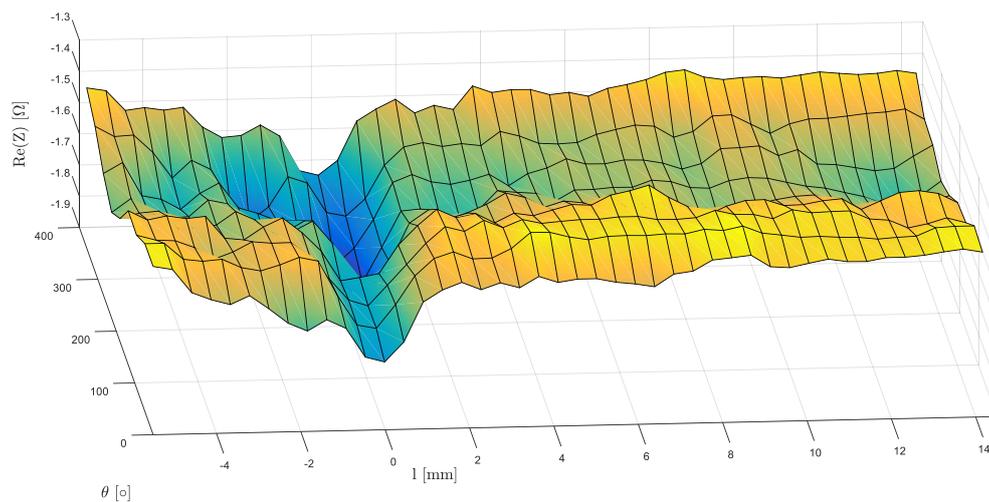


Figura A54 - Perfil de condutividade em 3D ao longo do perímetro do provete #6 a 800 KHz.

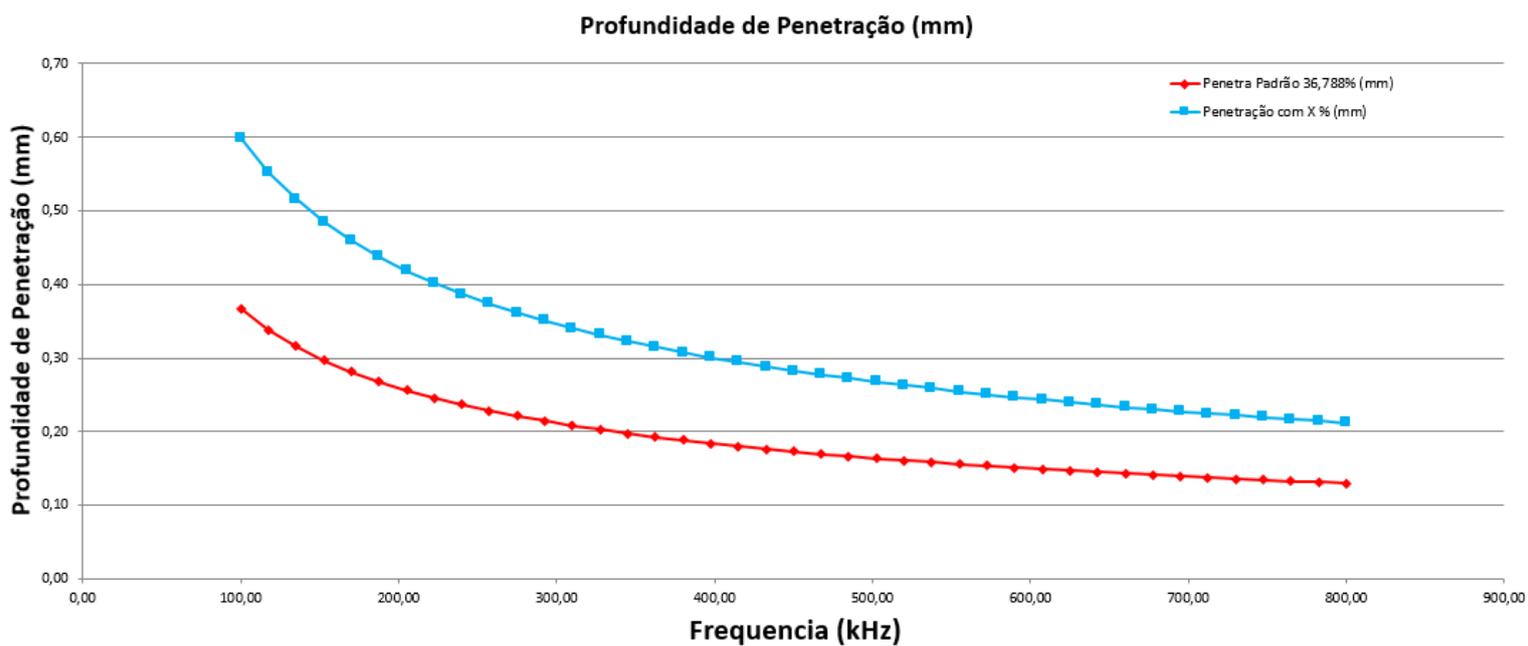


Figura A55 – Curva aproximada de penetração das CI no material base dos êmbolos.  
A vermelha – curva padrão. A azul – para uma penetração de 20% das correntes.