



Carlos Manuel Pragueira Simão

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Avaliação de diferentes técnicas de END para
materiais compósitos produzidos por
manufatura aditiva**

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor Doutor,
FCT, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguentes: Prof. Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso
Prof. Doutor João Pedro Oliveira
Vogal: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2017

Avaliação de diferentes técnicas de END para materiais compósitos produzidos por manufatura aditiva

Copyright © Carlos Manuel Pragueira Simão, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, sem os quais esta não se teria tornado uma realidade e aos quais estou eternamente grato.

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

À Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado pela disponibilidade para a transmissão de conhecimentos e pela ajuda na componente experimental da radiografia digital.

Um profundo agradecimento ao Eng.º Miguel Machado, Eng.º Patrick Inácio, Eng.º Pedro Riscado e ao Eng.º Diogo Pereira pela constante disponibilidade e ajuda indispensável, por me terem acompanhado ao longo de todo o trabalho e partilhado comigo as dificuldades e experiências, contribuindo com as suas ideias e críticas construtivas.

Ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, técnicos dos laboratórios de Processos Mecânicos de Materiais, Processamento Térmico de Materiais e Caracterização de Materiais, toda a ajuda que me deram durante a realização da parte experimental da presente dissertação.

Aos meus colegas do MySpot, nomeadamente ao Sr. António Camacho por toda a ajuda e compreensão ao longo da dissertação.

Aos meus colegas do laboratório de ensaios não destrutivos por partilharam comigo as suas ideias, experiências, opiniões e dificuldades, entre eles Samuel Simões, Frederico Coelho, João Bento e Rui Tareco.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, que me acompanharam durante todo o percurso académico Diogo Ferreira, Fábio Nogueira, Samuel Simões, Miguel Mousinho, Diogo Rodrigues, Ricardo Paulo, André Pereira e Duarte Rebelo.

Um especial agradecimento ao meu amigo Eng.º Tobias Pereira por todo o acompanhamento e partilha de conhecimentos não só neste trabalho, mas ao longo de todo o percurso de ensino.

A todos os meus amigos que me acompanham à muito tempo um profundo obrigado por toda a amizade, ajuda disponibilizada e pelos momentos de distração dando-me motivação para realizar este trabalho.

Por fim um agradecimento muito especial aos meus pais, por serem modelos de coragem, pelo seu apoio incondicional, incentivo, amizade e paciência demonstrados e total ajuda na superação de obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. A eles dedico este trabalho!

Esta tese foi desenvolvida no âmbito do projeto FIBR3D com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais Através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Nesse sentido agradeço também às instituições que financiaram este projecto.

RESUMO

O Processo de Manufatura Aditiva (MA) através da impressão 3D é uma das tecnologias de produção mais promissoras atualmente. No entanto, o desenvolvimento de Ensaio Não Destrutivo (END) fiáveis é um enorme desafio, já que os defeitos da MA apresentam novas morfologias, dimensões e localizações.

Alguns defeitos que podem surgir na MA de polímeros são: delaminações, falta de ligação entre a matriz e os reforços, porosidades, desalinhamento de reforços ou rugosidade superficial excessiva. A deteção destes defeitos com as técnicas de END existentes apresenta grandes limitações, uma vez que estas, foram desenvolvidas para outros requisitos e condições operacionais.

Esta dissertação foca-se num dos segmentos mais difíceis dos END: o objetivo é detetar defeitos em materiais compósitos produzidos por MA, em particular, os termoplásticos reforçados com fibras contínuas. Foram adaptadas, e avaliadas experimentalmente quatro técnicas de END: termografia ativa, radiografia digital, ultra-sons por imersão e correntes induzidas. Os testes foram realizados em provetes produzidos por MA contendo defeitos artificiais, utilizando matriz polimérica (PLA, ABS, NYLON e PEEK) reforçados com fibras contínuas introduzidas externamente (fibras de vidro e de carbono e arames de NiTi).

A termografia ativa com fontes de calor customizadas, mostrou-se adequada para detetar vazios e fibras de carbono. A radiografia digital também se mostrou eficaz na deteção de vazios e arames de NiTi. Com as correntes induzidas, só foi possível detetar arames de NiTi até 2 mm de profundidade. A inspeção por ultra-sons apresentou grandes limitações devido à elevada atenuação acústica dos polímeros.

Palavras-chave: Manufatura aditiva(MA), Ensaio não destrutivo(END), Materiais compósitos, Fibras contínuas.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) using 3D printing is one of the most promising manufacturing technologies nowadays. However, the development of reliable Non-Destructive Testing (NDT) techniques is a big challenge, as AM defects present new morphologies, dimensions and locations.

Possible defects that may arise include: delamination, lack of bonding between matrix and reinforcements, porosities, misalignment of reinforcements or excessive surface roughness. Detecting such defects with existing NDT techniques presents major limitations, as they were developed for other requirements and operational conditions.

This dissertation focuses on one of the high difficult segments of NDT spectrum: the challenge of detecting defects in composite materials produced by AM, in particular, using continuous fibre reinforcement thermoplastics (FRTP). Four different NDT techniques were studied: active thermography, digital X-ray, ultrasound by immersion and eddy currents. Tests were performed in composite samples produced by AM containing different artificial defects, using polymeric matrix (PLA, ABS, Polyamide and PEEK) reinforced with continuous fibres introduced externally (carbon and glass fibres and NiTi wires).

Active thermography with customized heat sources showed to be adequate for detecting voids and carbon fibres, X-ray was also effective detecting voids and NiTi wires and eddy currents with customized probes only allowed the identification of the NiTi wires placed 2 mm deep. Ultrasonic inspection presents major limitations due to the high acoustic attenuation of polymers.

Keywords: Additive manufacturing (AM), Non-Destructive Testing (NDT), Composite materials, Continuous fibers

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xxiii
Acrónimos	xxv
1 Introdução	1
2 Revisão do Estado da Arte	5
2.1 Introdução	5
2.2 Manufatura Aditiva	5
2.2.1 <i>Fused Deposition Modeling</i>	6
2.2.2 Parâmetros da tecnologia FDM	7
2.2.3 Defeitos associados ao processo de FDM	9
2.3 Materiais Compósitos	11
2.3.1 Matriz	11
2.3.2 Material de reforço	12
2.4 Técnicas de Ensaio Não Destrutivos (END)	16
2.4.1 Termografia	16
2.4.2 Radiografia	23
2.4.3 Ultra-Sons	25
2.4.4 Correntes Induzidas	28
3 Produção de provetes com defeitos padrão	33
3.1 Introdução	33
3.2 Modelos dos provetes	33
3.2.1 Produção dos modelos de provetes com vazios	34
3.3 Produção dos provetes	39
3.3.1 Impressora 3D	39

3.3.2	Provetes	39
3.3.3	Produção de defeitos reais	43
3.3.4	Defeitos de impressão e influência dos parâmetros	48
4	Desenvolvimento de Equipamento Laboratorial	51
4.1	Introdução	51
4.2	Equipamento para ensaios de Termografia	51
4.2.1	Equipamento disponível para a instalação laboratorial	51
4.2.2	Estação de ensaios preliminar	53
4.2.3	Suporte parabólico e elíptico	54
4.2.4	Estação de Ensaios vertical	58
4.2.5	Remodelação das estruturas reflectoras	60
4.2.6	Estruturas refletoras	60
4.2.7	Estação de Ensaios Horizontal	62
4.3	Equipamento para ensaios de Radiologia Digital	64
4.4	Equipamento para ensaios de Ultra-Sons	65
4.5	Equipamento para ensaios de Correntes Induzidas e Simulação	69
4.5.1	Modelos das sondas	69
4.5.2	Simulação	70
4.5.3	Produção das sondas e desenvolvimento laboratorial	72
5	Validação Experimental	75
5.1	Introdução	75
5.2	Resultados da Termografia	76
5.2.1	Ensaio com a estação preliminar	76
5.2.2	Ensaio na estação horizontal	79
5.3	Resultados do Raio-X	89
5.4	Resultados dos Ultra-Sons	93
5.4.1	Resultados dos Ultra-Sons com sonda de contacto	93
5.4.2	Resultados da técnica de Ultra-Sons por imersão	98
5.5	Resultados das Correntes Induzidas	101
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	109
6.1	Introdução	109
6.2	Conclusões	109
6.3	Propostas para desenvolvimentos futuros	111
	Bibliografia	113
A	Anexos	117

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema da máquina FDM fabricada pela <i>Stratasys</i> (Adaptado de [5]).	6
2.2	Exemplo de trajetórias (Adaptado de [7]).	7
2.3	Representação da influência dos parâmetros do processo de FDM (Adaptado de [5]).	8
2.4	Representação esquemática do fenómeno de <i>die swell</i> (Adaptado de [6]).	8
2.5	Representação macroscópica de vazios (Adaptado de [1]).	9
2.6	Representação de agregados de vazios em (b) e (c) (Adaptado de [1]).	9
2.7	Representação de falta de material (ii) ou a sobreposição deste em zonas adjacentes de uma peça (i) (Adaptado de [5]).	10
2.8	Representação macroscópica de aberturas de extrusão (a) e (b) (Adaptado de [1]).	10
2.9	Sub-divisão dos vários tipos de fibras (Adaptado de [12]).	13
2.10	Diferentes combinações da disposição das fibras (a) partículas aleatórias, (b) fibras descontínuas unidireccionais, (c) fibras descontínuas aleatórias, (d) fibras contínuas unidireccionais, (e) fibras contínuas bidireccionais e (f) fibras contínuas multidireccionais (Adaptado de [12]).	14
2.11	Exemplo de montagem experimental de TA (Adaptado de [15])	17
2.12	Ilustração do sistema de TAP (Adaptado de [2])	19
2.13	Ilustração da disposição dos defeitos introduzidos no material(Adaptado de [2])	19
2.14	Imagens térmicas (escala de 200 x 200 píxeis) (a) imagem sem tratamento, (b) imagem com pré-tratamento, (c) imagem processada por <i>Thermographic Signal Reconstruction</i> (TSR), (d) imagem reconstruído por MEEMD (Adaptado de [2])	20
2.15	Imagem termográfica da presença de defeitos (Adaptado de [16])	21
2.16	Ilustração do modelo computacional e da distribuição de temperaturas do modelo numérico da delaminação para a configuração (a) (Adaptado de [3]) .	22
2.17	Imagens termográficas a) configuração (a) e b) configuração (b) (Adaptado de [3])	22
2.18	Representação das porosidades e descontinuidades em peça produzida por FDM (Adaptado de [19]).	24
2.19	Configurações utilizadas - a) configuração baseada na transmissão sonora, b) configuração baseada na reflexão sonora (Adaptado de [21]).	27
2.20	Parâmetros da sonda (Adaptado de [21]).	29

2.21	Parâmetros do conjunto das sondas de emissão-receção. (Adaptado de [21]). . .	30
2.22	Deteção dos sinais de duas fraturas - (a)imagem da amplitude, (b)imagem da fase. (Adaptado de [21]).	30
2.23	Deteção de sinais de delaminação - (a)imagem da amplitude, (b)imagem da fase. (Adaptado de [21]).	30
2.24	Imagens do tecido da amostra - (a)imagem sem defeito, (b)imagem com impacto. (Adaptado de [21]).	31
3.1	Modelo Provete 1	
	a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.	35
3.2	Modelo Provete 2	
	a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.	35
3.3	Modelo Provete 3	
	a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.	35
3.4	Modelo provete 4	
	a) vista exterior, b) vista interior.	36
3.5	Modelo provete 5	
	a) vista exterior, b) vista interior.	37
3.6	Modelo provetes para serem testados nos ultra sons	
	a) modelo do provete 9, b) modelo do provete 10.	38
3.7	Impressora 3D <i>Prusa i3 BQ</i> do laboratório NOVA NDT Lab.	39
3.8	Provete 1 (50x50x5 mm)	
	a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.	40
3.9	Provete 1 ABS e Nylon (80x80x5 mm)	
	a) imagem captada durante a impressão do ABS, b) resultado final do ABS, c) imagem captada durante a impressão do Nylon, d) resultado final do Nylon.	41
3.10	Provete 2 (80x80x5 mm)	
	a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.	42
3.11	Provete 3 (50x50x5 mm)	
	a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.	42
3.12	Provetes 4 e 5	
	a) imagem captada durante a impressão do provete 4, b) imagem do provete 5.	43
3.13	Provete 6 (150x150x8 mm)	
	a) provete durante a impressão, b) esquema dos fios colocados no provete.	44
3.14	Provete 7 (150x150x6 mm)	
	a) imagem captada durante a impressão onde são vizíveis duas amostras, b) colocação da primeira amostra.	45
3.15	Provete com delaminações entre a 2 ^o e 3 ^o camadas	46
3.16	Provete com delaminações entre a 5 ^o e 6 ^o camadas.	46
3.17	Inclusões entre a sétima e oitava camadas	
	a) WD-40, b) Massa de lítio.	47

3.18	Provetes com enchimento de 100 %	
	a) provete 9, b) provete 10.	47
3.19	Provete de peek(150x150x6,7 mm)	
	a) face superior do provete, b) face inferior do provete, 1) e 2) são as caixas com 5 mm de diâmetro e 4 e 2 mm de profundidade respetivamente, 3) e 4) são caixas com 14 mm de diâmetro e 4 e 2 mm de profundidade respetivamente. .	48
3.20	Amostras ilustrativas das dificuldades de impressão	
	a) espaço vazio entre a deposição dos filamentos, b) falta de adesão entre a primeira e segunda camadas, c) má qualidade de impressão devido à velocidade e temperatura de impressão e d) impressão de PEEK.	49
4.1	Câmara termográfica (Fluke Ti 400).	52
4.2	Interface gráfica do <i>SmartView</i>	
	1) Visualizador da imagem térmica, 2) escala de temperaturas, 3) escala de cores, 4) emissividade, 5) controlo da gama de radiação a observar.	52
4.3	Estação termográfica preliminar	
	1) provete e respetivo suporte, 2) câmara termográfica, 3) suporte da câmara, 4) lâmpada de halogéneo de 400 W, A) distância da câmara ao provete, B) distância da fonte ao provete.	53
4.4	Esquema do percurso da radiação refletida pela parábola	
	1) fonte de calor, 2) provete.	54
4.5	Comprimento do arco da curva.	55
4.6	Desenho da parábola parametrizada	
	1)parâmetros da curva, 2)comprimento da curva.	56
4.7	Modelo do suporte parabólico	
	a) contas de atravancamento, b) pormenores do modelo.	57
4.8	Esquema da elipse	
	a) percurso da radiação refletida pela elipse (1) fonte de calor 2) provete), b) identificação dos pontos da elipse a definir.	57
4.9	Modelo do suporte elíptico	
	a) contas de atravancamento, b) pormenores do modelo: (1) furo que permite fazer a ligação do material refletor ao suporte elíptico, (2) referência do suporte elíptico e (3) saliência que permite a ligação ao perfil <i>bosh</i>	58
4.10	Estação de ensaios vertical	
	1) estrutura elíptica, 2) suporte e provete, 3) suporte para a fonte e os provetes, 4) câmara termográfica e 5) suporte para a câmara.	59

4.11	Novo suporte parabólico	
	a) pormenores do modelo ((1) saliência de modo a que a mica fique presa, (2) ajuste regulável para a outra extremidade da mica, (3) furo onde será colocado um parafuso M6, (4) saliência que serve de guia para o encaixe no perfil <i>bosh</i> com espaçamento para que o aperto seja possível), b) destaque dos pormenores do suporte parabólico.	60
4.12	Modelo da estrutura elíptica	
	1) lâmpada de infravermelhos (1300 W), 2) casquilho da lâmpada, 3) chapa da ligação do casquilho ao perfil <i>bosh</i> , 4) "folha"refletora coberta por fita adesiva de alumínio, 5) suporte elíptico, 6) perfil <i>bosh</i> 30 × 30 mm, 7) esquadro para acoplamento entre os perfis <i>bosh</i>	61
4.13	Estruturas refletoras	
	1) estrutura parabólica, 2) estrutura elíptica.	61
4.14	Montagem experimental da estação horizontal	
	1) estrutura elíptica, 2) câmara termográfica, 3) computador para controlo do <i>LabVIEW</i> , 4) suporte dos provetes, 5) estrutura parabólica, 6) componentes eletrônicos.	62
4.15	Componente eletrônica	
	1) compartimento que contém o relé, 2) placa da <i>National Instrumets</i>	63
4.16	Programa desenvolvido no <i>LabVIEW</i>	
	a) página de <i>Front Paine</i> l: 1) botão <i>Start</i> , 2) janela de escolha do tempo, 3) botão <i>Stop</i> , b) página de <i>Block Diagram</i>	63
4.17	Equipamento de raio-x	
	1) KODAK 2100 RX, 2) caixa de chumbo, 3) KODAK RVG 5100, 4) computador para observação e tratamento das imagens radiográficas.	64
4.18	Conjunto do equipamento para medição de espessuras e coeficiente de atenuação acústica	
	1) equipamento de ultra-sons (<i>Krautkramer USM 36</i>), 2) acoplamento(vaselina sólida), 3) provete de PEEK, 4) Sonda de 4 MHz.	65
4.19	Sonda utilizadas no método de ultra-sons	
	a) sonda de contacto 4 MHz, b) sonda de contacto 2 MHz c) sonda de imersão 10 MHz.	66
4.20	Suportes para sonda de ultra-sons	
	a) cotas de atravancamento do suporte para as sondas de 2 e 4 MHz, b) suporte para as sondas de 2 e 4 MHz, c) cotas de atravancamento do suporte para a sonda de 10 MHz, d) suporte para a sonda de 10 MHz).	67
4.21	Montagem experimental dos ensaios de ultra-sons	
	1) mesa xy, 2) recipiente com água para colocação do provete e sonda, 3) suporte para a sonda, 4) sonda de 4 MHz, 5) provete, 6) placa DAQ-6008 da <i>National Instruments</i> e 7) equipamento ultra-sons (<i>Krautkramer USM 36</i>).	67

4.22	Interface gráfica em <i>LabVIEW</i> para movimento da mesa xy e da visualização de resultados 1) <i>scanner</i> , 2) posicionamento da sonda, 3) área de inspeção e resolução, 4) equipamento de medição a utilizar, 5) dados do ensaio e de gravação, 6) controlo do ensaio, 7) evolução do ensaio e 8) resultados do ensaio.	68
4.23	Modelo das sondas em <i>Bridge</i> 1) apoio do conector do cabo lemo, 2) suporte da bobina de indução, 3) suporte da bobina de comparação, 4) superfície para ligação à mesa xy.	70
4.24	Modelo da sonda emissão-recepção a) cotas de atravancamento, b) localização das sondas.	70
4.25	Modelo e respetiva malha para simulação a) modelo de simulação da sonda(1) e fio(2), b) representação da malha de elementos.	71
4.26	Resultados do campo magnético a) resultados com frequência de 100 KHz, b) resultados com frequência de 1 MHz.	71
4.27	Resultados do campo magnético vectorial a) resultados com frequência de 100 KHz, b) resultados com frequência de 1 MHz.	71
4.28	Montagem experimental para enrolamento das bobinas.	72
4.29	Interface do programa <i>LabVIEW</i>	73
4.30	Sondas de correntes induzidas a) sonda 550 espiras, b) sonda 20 espiras, c) sonda de emissão-recepção.	73
4.31	Montagem experimental dos ensaios de correntes induzidas 1) mesa xy, 2) sonda de 20 espiras, 3) provete a inspecionar, 4) placa DAQ-6008 da <i>National Instruments</i> , 5) <i>Nortec 500C</i> da <i>Olympus</i>	74
5.1	Esquema dos parâmetros dos ensaios termográficos.	76
5.2	Resultados dos ensaios no provete 1 - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 10$ seg, $t_A = 20$ seg.	77
5.3	Resultados dos ensaios no provete 2 - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 10$ seg, $t_A = 20$ seg.	77
5.4	Resultados dos ensaios no provete 3 - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 15$ seg, $t_A = 20$ seg.	77
5.5	Secador térmico utilizado no método da termografia por reflexão.	78
5.6	Resultados do ensaio do provete 1 com secador - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 10$ seg, $t_A = 10$ seg.	78
5.7	Resultados do ensaio do provete 2 com secador - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 10$ seg, $t_A = 10$ seg.	79
5.8	Resultados do ensaio do provete 3 com secador - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP} = 7$ cm, $t_E = 10$ seg, $t_A = 15$ seg.	79

5.9	Imagens dos ensaios do provete 1	
	a) com 10 segundos - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) com 20 segundos - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=20$ seg.	81
5.10	Comparação do efeito sombra.	
	a) com a elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) com a parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg.	81
5.11	Foco de luz com a estrutura elíptica.	82
5.12	Comparação entre transmissão e reflexão	
	a) transmissão - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) reflexão - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=18$ seg.	83
5.13	Diferentes resultados do provete 2	
	a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=30$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=38$ seg, c) reflexão face frontal - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=10$ seg, d) reflexão face traseira - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=15$ seg.	83
5.14	Diferentes resultados do provete 2	
	a) transmissão com elipse - $d_{CP}=330$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com parábola - $d_{CP}=460$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg, c) reflexão normal - $d_{CP}=360$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=20$ seg, d) reflexão com ar comprimido - $d_{CP}=360$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, t_A quando aplicado ar comprimido.	84
5.15	Inspeção do provete PLA	
	a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=38$ seg).	85
5.16	Inspeção do provete ABS	
	a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=50$ seg).	85
5.17	Inspeção do provete Nylon	
	a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=30$ seg).	85
5.18	Imagens térmicas do provete 4	
	a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, c) reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=15$ seg.	86
5.19	Imagens térmicas do provete 5	
	a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=50$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=60$ seg, c) reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg, d) transmissão com parábola ampliado, e) transmissão com elipse ampliado, f) reflexão com elipse ampliado.	86

5.20	Imagens térmicas do provete 6	
	a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg,	
	b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, c)	
	reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=10$ seg, d) zona	
	dos fios de <i>Kevlar</i> ®, e) zona dos arames de NiTi.	87
5.21	Imagens térmicas do provete 7 (transmissão) - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm,	
	$t_E=10$ seg, $t_A=40$ seg; 1) amostra 2, 2) amostra 3, 3) amostra 4, 4) amostra 5 - a)	
	imagem original, b) imagem tratada.	88
5.22	Imagens térmicas do provete 7 (reflexão) - $d_{CP}=420$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$	
	seg, $t_A=24$ seg - a) imagem original, b) imagem tratada.	88
5.23	Pormenores das imagens térmicas do provete 8	
	a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg,	
	b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg,	
	c) zona da massa de lítio, d) zona do teflon.	89
5.24	Resultados da inspeção ao provete 1	
	a) provete PLA (13 ms), b) provete ABS (13 ms), c) provete Nylon (10 ms). . .	90
5.25	Resultados da inspeção do provete 3	
	a) vazio 1 e 4 (10 ms), b) Vazio 2 e 5 (10 ms), c) vazio 3 e 6 (10 ms), d) vazio 7	
	(10 ms), e) vazio 8 (10 ms), f) vazio 9 (10 ms)	90
5.26	Zona com NiTi(2), cobre(5) e ferro(6) - 20 ms.	91
5.27	Zona com Niti(1), ferro(6) e <i>Kevlar</i> ® (7) - 10 ms.	92
5.28	Zona com cobre(5) e a fibra de vidro (8) - 10ms.	92
5.29	Zona com NiTi (2), <i>Kevlar</i> ® (4), <i>Kevlar</i> ® (7), e a fibra de vidro (8) - 10 ms . . .	93
5.30	Resultados da inspeção do provete 7	
	a) 10 ms, b) 120 ms, c) 160 ms.	93
5.31	Imagem da janela do equipamento de ultra-sons	
	1) linha da função <i>GATE</i> , 2) exemplo do valor to tempo medido na <i>GATE</i> . . .	94
5.32	Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 4 MHz e	
	uma frequência de 4 MHz no equipamento.	96
5.33	Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 4 MHz	
	a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	99
5.34	Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 4 MHz	
	a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	99
5.35	Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 2 MHz	
	a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	100
5.36	Inspeção do provete 1 PLA 100 % com sonda de 2 MHz	
	a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	100
5.37	Inspeção do arame de NiTi não incluso	
	a) resultado do ensaio, b) vista lateral.	101
5.38	Inspeção sem arame de NiTi	
	a) resultado do ensaio, b) vista lateral.	102

5.39	Inspeção do arame de ferro	
	a) resultado do ensaio, b) vista lateral.	103
5.40	Inspeção do arame de cobre	
	a) resultado do ensaio, b) vista lateral.	104
5.41	Inspeção do arame de NiTi	
	a) resultado do ensaio, b) vista lateral.	105
5.42	Inspeção do arame de NiTi com sonda de 20 espiras.	106
5.43	Inspeção do arame de NiTi com sonda emissão-receção.	106
5.44	Inspeção das amostras a 1 mm, 2 mm e 3 mm da superfície do provete.	107
5.45	Inspeção das amostras a 4 mm e 5 mm da superfície do provete.	107
A.1	Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.	117
A.2	Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.	118
A.3	Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.	118
A.4	Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.	119
A.5	Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.	119
A.6	Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.	120
A.7	Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.	120
A.8	Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.	121
A.9	Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.	121
A.10	Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.	122
A.11	Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.	122
A.12	Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.	123
A.13	Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.	123
A.14	Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.	124
A.15	Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.	124

A.16 Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 2 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	125
A.17 Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 10 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	125
A.18 Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 2 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	126
A.19 Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 10 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	126
A.20 Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 4 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	127
A.21 Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 10 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	127
A.22 Inspeção do provete 1 PLA 100% com sonda de 4 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	128
A.23 Inspeção do provete 1 PLA 100% com sonda de 10 MHz	
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.	128
A.24 Inspeção do fio de ferro com sonda em <i>Bridge</i> de 20 espiras.	129
A.25 Inspeção do fio de cobre com sonda em <i>Bridge</i> de 20 espiras.	129
A.26 Inspeção do fio de ferro com sonda emissão-receção.	130
A.27 Inspeção do fio de cobre com sonda emissão-receção.	130

LISTA DE TABELAS

3.1	Relação entre os defeitos reais e os defeitos padrão	34
3.2	Dimensões dos defeitos do provete 3, em que " l " é a largura, " c " o comprimento, " h " a altura, " a " a aresta e " r " o raio.	36
3.3	Dimensões dos defeitos do provete 4, em que " l " é a largura, " c " o comprimento, " h " a altura, " a " a aresta e " r " o raio.	37
3.4	Parâmetros de impressão utilizados no provete 1 de PLA, ABS e Nylon.	40
3.5	Parâmetros de impressão provete 4 e 5	43
3.6	Identificação e descrição dos fios numerados na figura 3.13.	44
5.1	Valores correspondentes à regressão exponencial para o PEEK com a sonda de 4 MHz.	96
5.2	Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de medição a velocidade do som e do coeficiente de atenuação acústica, em que x é a espessura do material, x total é a distância percorrida pelo som, t total é o tempo do percurso do som, v a velocidade do som e α o coeficiente de atenuação acústica.	97

ACRÓNIMOS

ABS Acrilonitrila butadieno estireno.

CI Correntes Induzidas.

DAC Desenho Assistido por Computador.

DEMI Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial.

EEMD *Ensemble Empirical Mode Decomposition.*

EMAT *EletroMagnetic Acoustic Transducer.*

END Ensaio não Destrutivo.

FCT NOVA Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

FDM *Fused Deposition Modeling.*

LOM *Laminated Object Manufacturing.*

MA Manufatura Aditiva.

MEEMD *Multi-dimensional Ensemble Empirical Mode Decomposition.*

PEEK Poliéter-eter-cetona.

PLA Poliacido Láctico.

PR Prototipagem Rápida.

RD Radiografia Digital.

SLA *Stereolithography.*

SLM *Selective Laser Melting.*

SLS *Selective Laser Sintering.*

TA Termografia Ativa.

ACRÓNIMOS

TAP Termografia Ativa Pulsada.

ToFD *Time of Flight Diffraction*.

US Ultra-Sons.

WAAM *Wire Arc Additive Manufacturing*.

INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia que permite produzir peças físicas adicionando material camada a camada, diretamente a partir de um modelo virtual. Esta técnica oferece vantagens em muitas aplicações, uma vez que, as peças podem ser produzidas com elevada liberdade geométrica, sem necessidade de uma configuração elaborada da máquina ou de montagem final da peça [1].

Os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras têm sido vastamente utilizados na indústria aeroespacial, mecânica, civil, eletrónica, entre outras [2]. Apesar das vantagens significativas no uso de materiais compósitos, é possível o aparecimento de defeitos, como por exemplo, quebra e deslocamento das fibras, fissuras na matriz, delaminações e porosidades. Estes defeitos podem interagir uns com os outros e desenvolver estados que comprometem a integridade do conjunto, reduzindo significativamente as suas propriedades. Por vezes, essas falhas internas permanecem indetetáveis podendo colocar em risco a vida humana [3].

Este trabalho está relacionado com um projeto de investigação nacional designado FIBR3D¹ – Processos híbridos baseados em Fabrico Aditivo de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas. No âmbito deste projeto pretende-se produzir, através do processo de MA, componentes de elevada dimensão em materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas.

Os Ensaio não Destrutivos (END) são fundamentais para a inspeção de materiais e componentes, ainda para mais de materiais em desenvolvimento. Deste modo, é necessário adaptar/desenvolver novas técnicas para as referidas aplicações. Essas técnicas serão: Termografia Ativa (TA), Radiografia Digital (RD), Ultra-Sons (US) por imersão e Correntes

¹Projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414 é cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este é realizado em consórcio com o INEGI, IDMEC, UM, UA e com o UNIDEMI da FCT NOVA.

Induzidas (CI).

Esta dissertação está relacionada com a avaliação dos END possíveis de aplicar para a inspeção de defeitos em materiais compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras e produzidos por MA.

Neste trabalho pretende-se avaliar e testar o potencial de diferentes técnicas END. Serão consideradas as técnicas de termografia ativa, radiografia digital, ultra-sons por imersão e correntes induzidas. Estas técnicas serão adaptadas para a deteção de defeitos em materiais compósitos produzidos por MA, em particular, na utilização de termoplásticos reforçados por fibras contínuas.

Outro objetivo consiste em perceber quais os defeitos mais comuns neste tipo de materiais, para que se possam produzir provetes com defeitos artificiais o mais aproximados da realidade.

O objetivo de carácter tecnológico, consiste no desenvolvimento de uma estação de ensaios de termografia, com fontes de calor customizadas, para inspeção de provetes produzidos com defeitos artificiais. Pretende-se estudar e comparar os modos de transmissão e de reflexão, aplicados através da técnica de termografia ativa pulsada.

Pretende-se também realizar ensaios de radiografia digital, desenvolver meios de inspeção através de ultra-sons por imersão e produzir diferentes sondas de correntes induzidas.

Tendo em vista o cumprimento dos objetivos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica dividida em três áreas. A primeira análise incidiu nas características do processo de MA e nos defeitos que dele podem surgir. Seguidamente foi necessário estudar as características dos materiais compósitos. Por fim foi realizada uma pesquisa em torno dos métodos utilizados na deteção de defeitos para o caso em estudo.

Através da técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM) foram produzidos provetes que contêm: (i) vazios, (ii) fios de NiTi, cobre, ferro (98 % de ferro), *Kevlar*® e fibra de vidro, (iii) amostras de fibra de carbono e (iv) delaminações. Foram também produzidos provetes de diferentes polímeros: PLA, ABS, Nylon e PEEK.

Estes provetes foram inspecionados através da técnica de termografia ativa onde se variaram parâmetros como a distância da fonte de excitação ao provete, a distância da câmara ao provete, o tempo de excitação e o tempo de aquisição da radiação térmica emitida pelos provetes. Foi também testado o modo de reflexão e transmissão com a utilização de fontes de calor customizadas.

Para a realização dos ensaios de ultra-sons imersos foram produzidos suportes para as sondas, de modo a serem acopladas a uma mesa xy. Esta permite o deslocamento do provete em relação à sonda de modo a obter um resultado da amplitude da onda sonora refletida [dB] em função da posição [mm].

Com a mesma mesa xy foram testadas as sondas de correntes induzidas de forma analisar a alteração do valor do campo magnético devido à presença dos fios metálicos e das amostras de fibra de carbono. Para esta técnica foi ainda realizada uma simulação preliminar para uma das sondas.

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

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

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

-No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada na elaboração dos modelos e respetivos defeitos e dos parâmetros utilizados na produção dos provetes.

-No capítulo 4 é descrito o desenvolvimento laboratorial, que têm como objetivo detetar os defeitos inseridos nos provetes referidos no capítulo anterior.

-No capítulo 5 são demonstrados os resultados obtidos experimentalmente através das diferentes técnicas de END avaliadas nesta dissertação.

-No capítulo 6 encontram-se as conclusões de todo o trabalho realizado, bem como propostas para desenvolvimentos futuros.

REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a pesquisa bibliográfica relevante para os temas desenvolvidos ao longo da presente dissertação.

Em § 2.2 é apresentado o tema da Manufatura Aditiva (MA), mais especificamente da técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM) em § 2.2.1. De seguida (§ 2.3) será dedicado um subcapítulo aos materiais compósitos. Em § 2.4 é apresentado o estado da arte dos diferentes métodos de END já utilizados na deteção de defeitos e que se pretendem estudar e adaptar no âmbito deste trabalho.

2.2 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA), que antigamente era denominada de Prototipagem Rápida (PR), é uma tecnologia que constrói partes físicas através da adição de material, camada a camada. Deste modo, um modelo em três dimensões, modelado através de Desenho Assistido por Computador (DAC) é transferido para a impressora sem ser necessário ter um plano de processos tradicional. Em relação aos métodos de fabrico tradicionais, este processo apresenta a grande vantagem de ser possível produzir peças com elevada liberdade geométrica. As principais áreas de aplicabilidade da MA têm sido o setor médico, tecnologia aeroespacial, indústria automóvel e construção civil.

Algumas variantes da MA são: *Selective Laser Melting* (SLM), *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), *Stereolithography* (SLA), *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Laminated Object Manufacturing* (LOM). De acordo com o tema de dissertação que irá ser abordado, as peças serão produzidas através da tecnologia de FDM. Como tal, optou-se por abordar em detalhe este processo.

2.2.1 Fused Deposition Modeling

A tecnologia FDM foi desenvolvida e patenteada por Scott Crump em 1988, que posteriormente fundou a empresa Stratasys. No início dos anos 90, foram comercializadas as primeiras máquinas de FDM. Esta é uma tecnologia muito usada maioritariamente nas áreas aeroespacial, médica e de construção.

Tradicionalmente os materiais mais usados em FDM eram o PLA e o ABS, contudo na atualidade esta tecnologia está alargada a compósitos de fibra curta, polímeros bio reabsorvíveis e misturas de materiais metálicos com polímeros [4].

Os autores Carneiro, Silva e Gomes [5] apontam como vantagens deste processo o facto de ser seguro e eficiente, com durabilidade, baixo investimento inicial (incluindo o preço relativamente baixo dos materiais usados), a facilidade de processar em ambientes fechados e ainda o baixo desperdício de material. Por outro lado, consideram como desvantagens o facto de os materiais usados terem de apresentar baixas temperaturas de fusão e a necessidade de acabamentos superficiais posteriores, devido à sua superfície irregular.

Na figura 2.1 está representado o processo onde um (ou mais que um) material, em forma de filamento, é forçado a entrar num extrusor, através de um sistema de engrenagens. Dentro do extrusor, o filamento é aquecido até uma temperatura superior à sua temperatura de fusão, de modo a que seja possível a passagem para o estado líquido, sem o qual era impossível realizar a impressão.

De seguida, o material é extrudido através de um bocal cónico aquecido e depositado horizontalmente numa placa onde solidifica rapidamente.

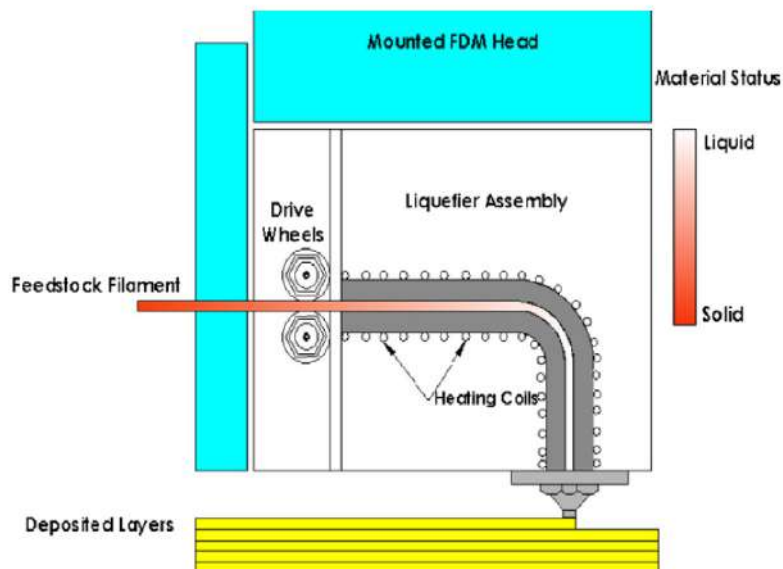


Figura 2.1: Esquema da máquina FDM fabricada pela *Stratasys* (Adaptado de [5]).

Os autores Nikzad, Masood e Sbarski [6] referem que os materiais usados no processo de FDM devem ter propriedades adequadas de rigidez, flexibilidade e condutividade. O filamento atua também como um pistão na entrada da cabeça do extrusor, forçando desta forma o material fundido a sair para fora do bocal. Se o filamento exibir uma baixa rigidez ou alta viscosidade, a encurvadura ocorrerá imediatamente antes da entrada do liquidificador, tornando assim o processamento FDM impossível de se realizar.

De acordo com os autores Li, Li e Liu [7], a impressão funciona com base em duas trajetórias diferentes: reta (a) e curva (b), como apresentado na figura 2.2. Deste modo, consideram que a área de secção de saída do bocal terá de ser circular, de forma a não ocorrerem variações no filamento depositado com mudança da direção de impressão.

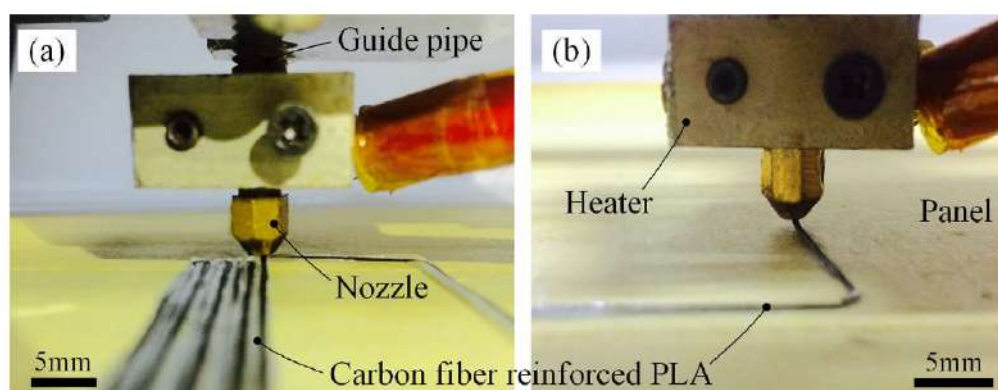


Figura 2.2: Exemplo de trajetórias (Adaptado de [7]).

2.2.2 Parâmetros da tecnologia FDM

De acordo com Carneiro, Silva e Gomes [5], os parâmetros da tecnologia de FDM são (i) taxa de alimentação do filamento, (ii) largura de extrusão, (iii) velocidade de deposição do filamento e (iv) espessura da camada extrudida.

Os mesmos autores mostram que, para uma dada espessura, tal como é representado na figura 2.3, a largura do filamento extrudido depende da taxa de alimentação do filamento e da velocidade de deposição. Ou seja, para uma taxa de alimentação maior (ou velocidade de deposição menor), a largura do polímero extrudido é maior.

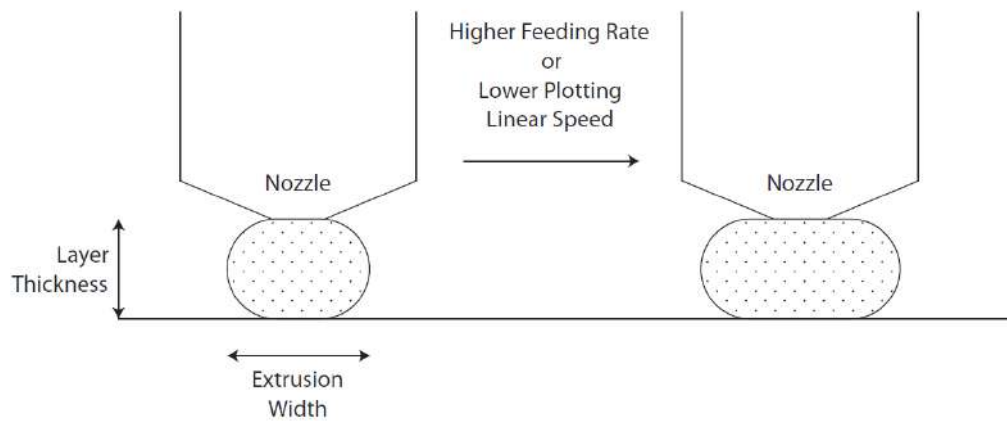


Figura 2.3: Representação da influência dos parâmetros do processo de FDM (Adaptado de [5]).

Uma das grandes desvantagens desta tecnologia é o mau acabamento superficial das peças que são produzidas. Isto implica a existência de operações secundárias para que as peças cumpram os requisitos funcionais. Deste modo, é necessário mais tempo despendido e a existência de maior investimento.

Confirmando o que já foi referido, os autores Anitha, Arunachalam e Radhakrishnan [8] desenvolveram uma investigação sobre os parâmetros críticos que afetam o acabamento superficial das peças produzidas por FDM. Concluiu-se que o parâmetro que tem mais influência é a espessura da camada depositada.

Durante o processo de extrusão do filamento de polímero, ocorre o fenómeno de *die swell*, em que o polímero incha à medida que é extrudido, como é demonstrado na figura 2.4. De acordo com os autores Nikzad, Masood e Sbarski [6], este fenómeno deve-se à recuperação elástica do polímero aquecido.

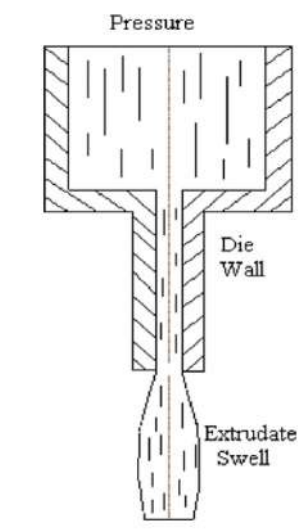


Figura 2.4: Representação esquemática do fenómeno de *die swell* (Adaptado de [6]).

2.2.3 Defeitos associados ao processo de FDM

O defeito mais comum associado ao processo de FDM é a presença de vazios. Na figura 2.5, os autores Boschetto, Bottini e Veniali [1] mostram uma representação de uma estrutura produzida por FDM com a presença de vazios. Os filamentos são descritos como sendo cilindros com a secção de área elíptica. Os referidos autores mencionam ainda a presença de anisotropia nas peças que advém do processo de FDM.

Ainda relativamente à figura 2.5, encontra-se a representação da direção normal, que está inclinada de um ângulo alfa (ângulo de deposição do material), em relação à direção de estratificação (direção pela qual se vão sobrepondo os filamentos).

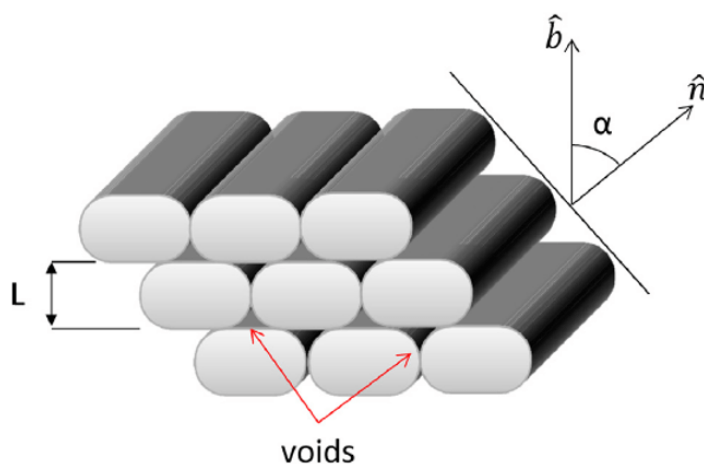


Figura 2.5: Representação macroscópica de vazios (Adaptado de [1]).

Segundo o mesmo autor, a área de secção elíptica dos filamentos é provocada devido ao arrefecimento da peça e ao empilhamento e sobreposição dos filamentos. Isto faz com que a sua junção provoque a formação de agregados de vazios, como é apresentado na figura 2.6 em (a) e (b).

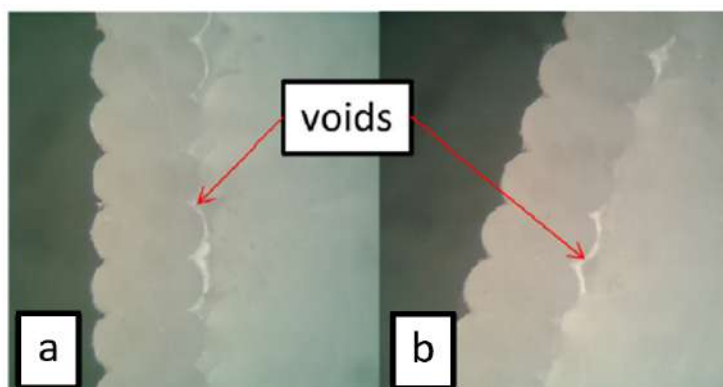


Figura 2.6: Representação de agregados de vazios em (b) e (c) (Adaptado de [1]).

Os autores Carneiro, Silva e Gomes [5] referem a existência de defeitos, que correspondem a uma falta de material, ou à sobreposição deste, nas zonas adjacentes da peça, como

é apresentado na figura 2.7. Este fenómeno deve-se, em casos extremos, a dois cenários: (i) trajetórias muito próximas, o que provoca a sobreposição das mesmas, levando a uma deposição excessiva de material e (ii) trajetórias distantes umas das outras, o que resulta em intervalos e ligações mínimas ou que simplesmente não existem entre elas, provocando assim uma redução da integridade estrutural da peça.

Este problema foi também identificado pelos autores Boschetto, Bottini e Veniali [1], que justificaram este defeito devido ao chamado erro de perfil, proveniente das estratégias de geração de trajetórias da ferramenta. Este ocorre quando o caminho de preenchimento do modelo encontra o contorno e é necessária uma flexão do filamento, originando um fenómeno a que foi chamado de abertura de extrusão (*extruding aperture*), o qual se apresenta na figura 2.8 em (a) e (b)).

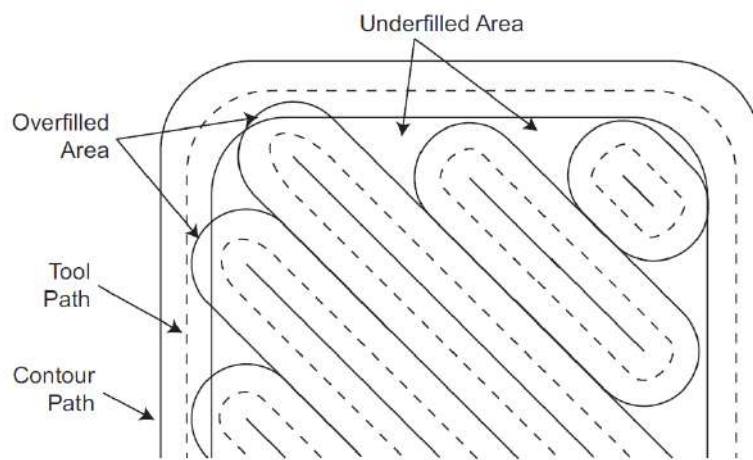


Figura 2.7: Representação de falta de material (ii) ou a sobreposição deste em zonas adjacentes de uma peça (i) (Adaptado de [5]).

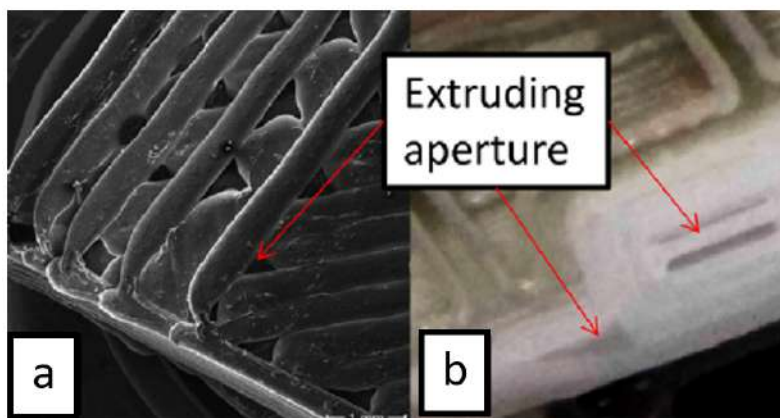


Figura 2.8: Representação macroscópica de aberturas de extrusão (a) e (b) (Adaptado de [1]).

2.3 Materiais Compósitos

Definem-se como compósitos os materiais que são compostos por mais do que um material, onde se verificam propriedades físicas e químicas bastante distintas. O principal objetivo ao recorrer a este tipo de materiais é o de aumentar a resistência mecânica, ao mesmo tempo que se diminui o peso através da redução da densidade.

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados na indústria, nomeadamente aeroespacial, mecânica, civil e eletrónica, devido às suas excelentes propriedades, como a relação rigidez/peso, resistência à corrosão e a possibilidade de fabricar elementos de formas complexas [9].— face aos componentes produzidos apenas com um tipo de material (metais, polímeros ou cerâmicos).

Os materiais compósitos são agrupados em três subconjuntos mais gerais: polímero-cerâmico, metal-polímero e metal-cerâmico. Cada um dos materiais presentes na mistura têm uma funcionalidade diferente. Um deles será o material ligante (matriz) e o outro o material de reforço (enchimento).

2.3.1 Matriz

A matriz é a base onde é incorporado o material de reforço, que poderá apresentar várias configurações. Este material terá funções como o suporte das fibras, a diminuição do peso, a absorção das deformações, assegurar resistência à estrutura, transferência de tensões ao longo das fibras, evitar a propagação de fissuras, proteção contra efeitos ambientais, conferir estabilidade térmica, entre outros.

No âmbito da presente dissertação as peças de material compósito terão uma matriz polimérica que poderá ser composta por materiais como Poliácido Láctico (PLA), Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Nylon®e Poliéter-eter-cetona (PEEK).

- **PLA**

O PLA é um polímero derivado do Ácido Láctico, sendo um material biodegradável que se insere no grupo dos termoplásticos. Dependendo da pureza da sua estrutura molecular, este material pode ser semi-cristalino ou totalmente amorfo. Este é provavelmente o material mais utilizado no processo de manufatura aditiva por FDM, devido à necessidade de uma temperatura de extrusão inferior aos restantes polímeros.

- **ABS**

O ABS é um polímero composto pela combinação dos monómeros Acrilonitrilo, Butadieno e Estireno. Este termoplástico é bastante usado em engenharia devido às suas boas propriedades mecânicas, resistência química e facilidade de processamento. Como desvantagem apresenta a sua inflamabilidade inerente, o que leva a uma necessidade de compreender formas de aumentar a sua estabilidade térmica [10]. Em relação ao processo de manufatura aditiva este é um material já bastante usado pelo que se torna fácil de produzir.

- **Nylon®**

Pertence ao grupo de plásticos conhecido como poliamidas. Estes materiais são normalmente formados por grupos amida e abrangem uma extensa gama, de modo a que se obtém uma ampla quantidade de propriedades disponíveis, como por exemplo o Nylon 6,6; Nylon 4,6; Nylon 12; entre muitos outros. Na sua maioria, os nylons são polímeros que tendem a ser semi-cristalinos e geralmente são materiais com boa resistência térmica e química. Este tipo de polímero tem também uma boa resistência à maioria dos produtos químicos, no entanto são suscetíveis aos ácidos fortes.

- **PEEK**

É um polímero termoplástico semi-cristalino com excelentes propriedades mecânicas, sendo por isso aplicado como matriz de compósitos de alto desempenho. Este material é reconhecido por manter excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas, entre elas a resistência química, de desgaste, elétrica e de temperatura, bem como a boa estabilidade dimensional e numerosas capacidades de processamento [11]. Por outro lado, este é um material que possui uma alta temperatura de impressão. Deste modo, apresenta também uma dificuldade extra no processo de impressão por manufatura aditiva.

2.3.2 Material de reforço

O material de reforço terá a função fornecer rigidez e resistência ao conjunto. Dependendo das características de reforço, tais como o tipo de geometria e orientação, os compósitos podem ser classificados como de fibras contínuas (ou longas), fibras curtas ou partículas. Deste modo, cada tipo de configuração apresenta diferentes propriedades que levam à escolha do compósito tendo em conta a sua aplicação.

Os compósitos de fibras contínuas apresentam uma maior relação comprimento/diâmetro, quando comparadas com as fibras curtas, resultando numa maior rigidez e resistência mecânica. Neste tipo de compósitos, as fibras podem estar dispostas de diferentes formas, alinhadas em paralelo, em direções perpendiculares ou ainda orientadas ao longo de várias direções, formando estruturas do tipo unidirecional, bidirecional e multidirecional, respetivamente [12].

Os compósitos de fibras curtas são formados por pequenas fibras, também conhecidas por *whiskers*. Estas fibras podem ser dispostas de modo orientado ou aleatório, apresentado também uma elevada relação comprimento/diâmetro, mesmo sendo consideradas curtas. Quando dispostas de modo orientado, o material pode ser ortotrópico, transversalmente ortotrópico ou até mesmo anisotrópico.

Em relação às partículas que reforçam os compósitos, estas podem apresentar diferentes dimensões e ser dispostas de várias e formas. Dependendo do nível de dispersão das partículas, estes compósitos podem ser considerados materiais quase homogêneos e

quase isotrópicos. Na figura 2.9 é apresentado um esquema resumo da informação exposta anteriormente.

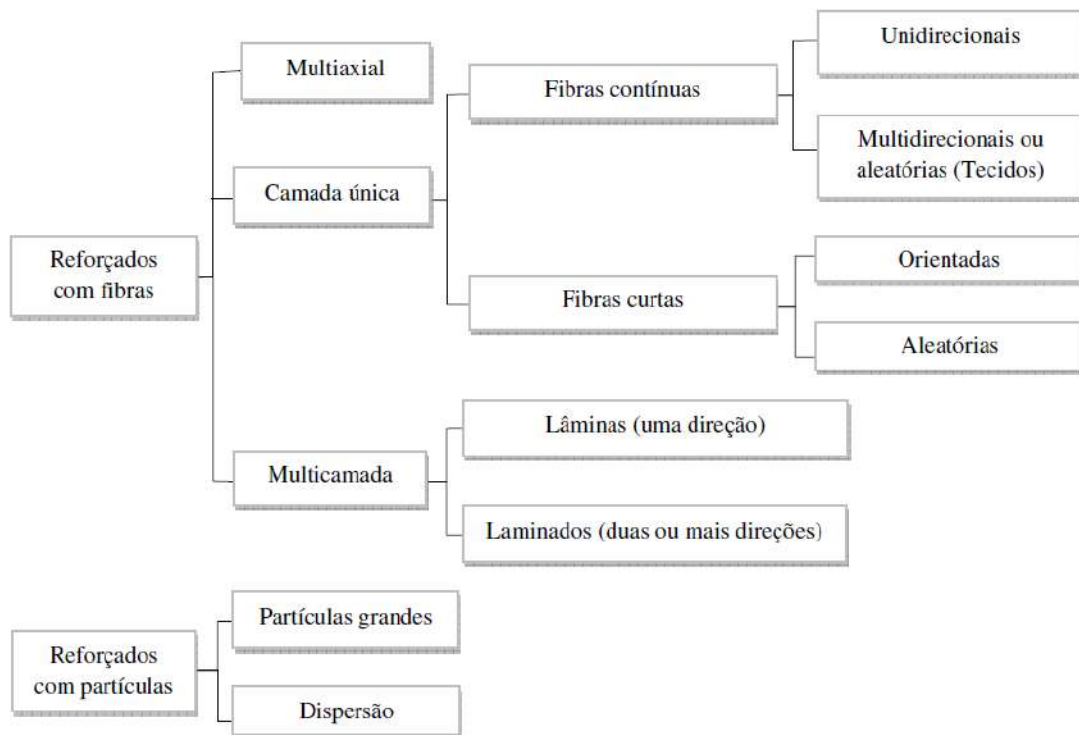


Figura 2.9: Sub-divisão dos vários tipos de fibras (Adaptado de [12]).

De acordo com Henrique Silva [12] as principais razões que levam à escolha do tipo de fibras são as seguintes:

- **Tamanho do reforço**

O tamanho de um material está relacionado com o número médio de defeitos na sua secção transversal, pois quanto menor for o material, menor a probabilidade de um maior número de defeitos e maior a probabilidade de suporte de carregamentos mecânicos, ou seja, maior a sua resistência.

- **Efeito macroestrutural**

O processo de tornar os materiais em fibras faz com que estes possam apresentar uma estrutura cristalina ou molecular orientada no sentido longitudinal aumentando a resistência da fibra obtida.

- **Efeito geométrico**

A forma geométrica de uma fibra possui uma relação área de contacto/volume muito alta.

De um modo geral, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. No caso das

fibras contínuas, normalmente estas distribuem-se em planos perpendiculares à espessura da peça, designado reforço no plano.

Nas direções perpendiculares à espessura, a eficácia do reforço é menor e as propriedades são consideravelmente condicionadas pela matriz. Esta debilidade pode ser compensada no plano através da utilização de materiais laminados multidirecionais, compostos por camadas com diferentes orientações. Ainda assim, as propriedades destes materiais permanecem relativamente fracas na direção da espessura.

É ainda importante referir que no reforço bidirecional a quantidade de fibras em cada direção pode variar, gerando deste modo diferentes padrões de entrelaçamento. No caso das fibras unidirecionais, estas são arranjadas de modo a que cerca de 95% apresentem a direção 0° . Pelo contrário num tecido plano, as fibras nas direções 0° e 90° são igualmente distribuídas.

Na figura 2.10 estão representadas diferentes possíveis configurações de disposição das fibras.

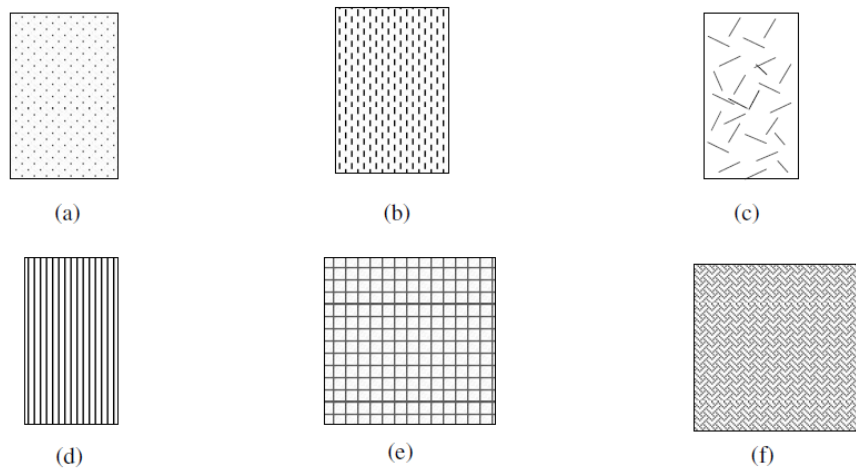


Figura 2.10: Diferentes combinações da disposição das fibras

(a) partículas aleatórias, (b) fibras descontínuas unidirecionais, (c) fibras descontínuas aleatórias, (d) fibras contínuas unidirecionais, (e) fibras contínuas bidirecionais e (f) fibras contínuas multidirecionais (Adaptado de [12]).

Uma das características importantes nos materiais compósitos já referidos anteriormente neste trabalho é a anisotropia. Um compósito é anisotrópico quando as suas propriedades mecânicas, físicas, térmicas ou elétricas num ponto do material variam em função da direção. A anisotropia pode ser benéfica, uma vez que, é possível dispor a maior resistência do componente na direção em que se verifica a maior tensão de serviço.

No âmbito deste trabalho, o material de reforço poderá ser fibra de carbono, fibra de vidro ou arames de Níquel-Titânio (NiTi).

- **Fibras de vidro**

As fibras de vidro são um dos tipos de reforço mais utilizados na produção de materiais compósitos. São várias as razões para esta vasta utilização, sendo elas a boa relação de adesão entre as fibras e a matriz, a elevada resistência mecânica, as boas propriedades dielétricas, a incombustibilidade, estabilidade dimensional e boa resistência aos agentes químicos. Os preços competitivos, a boa manipulação, facilidade de processamento e a elevada relação propriedade/custo são também fatores que contribuem para a preferência na utilização deste tipo de reforço.

- **Fibras de carbono**

As fibras de carbono possuem elevados valores de resistência à tração, excedendo muitas vezes os valores dos materiais metálicos. A excelente resistência à fadiga e corrosão, absorção de impacto, resistência térmica, estabilidade dimensional, boa resistência elétrica e o facto de ser quimicamente inerte (exceto quanto à oxidação), são fatores que fazem deste um dos materiais mais utilizados no âmbito da engenharia. Outro fator muito importante para projetos de engenharia, onde é requerida a estabilidade térmica, é o facto do seu coeficiente de expansão térmico ser aproximadamente zero. Isto implica que ao contrário dos metais, quando aquecida, a fibra de carbono mantém praticamente a sua forma original [13].

- **Arames de NiTi**

NiTi é uma liga metálica composta por níquel e titânio. Os arames de NiTi apresentam duas propriedades únicas e que estão relacionadas com a transformação de fase do material. O efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE). O EMF ocorre quando a liga recupera completamente a sua forma original após (aquecimento) variações térmicas do material deformado na fase martensítica. A SE ocorre quando o material é deformado na fase austenítica e a recuperação da forma ocorre quase que instantaneamente após a retirada da carga, sem necessidade de aquecimento [14].

2.4 Técnicas de Ensaio Não Destrutivos (END)

2.4.1 Termografia

- **Contexto histórico**

Em 1992, Milne e Reynolds propuseram a técnica de termografia através de infravermelhos como método de ensaios não destrutivos, evidenciando como principal vantagem a elevada velocidade na inspeção de defeitos nos materiais [15].

As técnicas de infravermelhos são hoje em dia muito utilizadas na inspeção de componentes e estruturas em sectores industriais como a aeronáutica, transportes, energia eólica, engenharia civil e eletrónica [16].

- **Princípio físico e aplicações**

Todos os objetos acima da temperatura de referência zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$ ou 0 K) emitem radiação térmica.

Esta referida radiação também é conhecida como radiação infravermelha, uma vez que, a maior parte é emitida na banda espectral correspondente à radiação infravermelha do espectro eletromagnético.

A termografia por infravermelhos pode ser dividida em dois grandes grupos: (i) passiva e (ii) ativa.

- (i) Na variante passiva o material a inspecionar encontra-se naturalmente a uma temperatura diferente do meio ambiente, que geralmente é superior. A termografia passiva tem um papel importante no controlo dos processos industriais, onde a temperatura é o parâmetro essencial no diagnóstico da condição do equipamento em serviço. Aplica-se em processos de produção, manutenção preventiva, eficiência de edifícios e também certas aplicações no domínio dos ensaios não destrutivos [17].
- (ii) A termografia ativa (TA) requer que o material em estudo seja estimulado por uma fonte externa. Essa excitação pode ser realizada através de diferentes dispositivos: mecânicos (vibrotermografia), elétricos (termómetros por correntes de Foucault), ou térmicos (pulsado ou transitório) [16].

Devido à diferença de condutividade térmica entre os defeitos (ausência de material) e o material, é possível observar uma diferença na temperatura da superfície da amostra. Deste modo, a sua resposta térmica é analisada, sendo normalmente gravada através de uma câmara termográfica e depois processada usando um software de análise específico. O resultado é um conjunto de imagens térmicas que representam a emissão de calor superficial do objeto em estudo, em que os contrastes gerados pela presença de defeitos internos podem ser visualizados num computador. Esta variante encontra numerosas aplicações como método de ensaios não destrutivos.

Um exemplo de montagem experimental para este método é apresentado na figura 2.11, pelos autores Li et al. [15], onde é representado o material a ser estimulado por uma

fonte mecânica (Ultra-Sons (US)) e por uma fonte térmica (Termografia Ativa (TA)) com uma lâmpada de xénon.

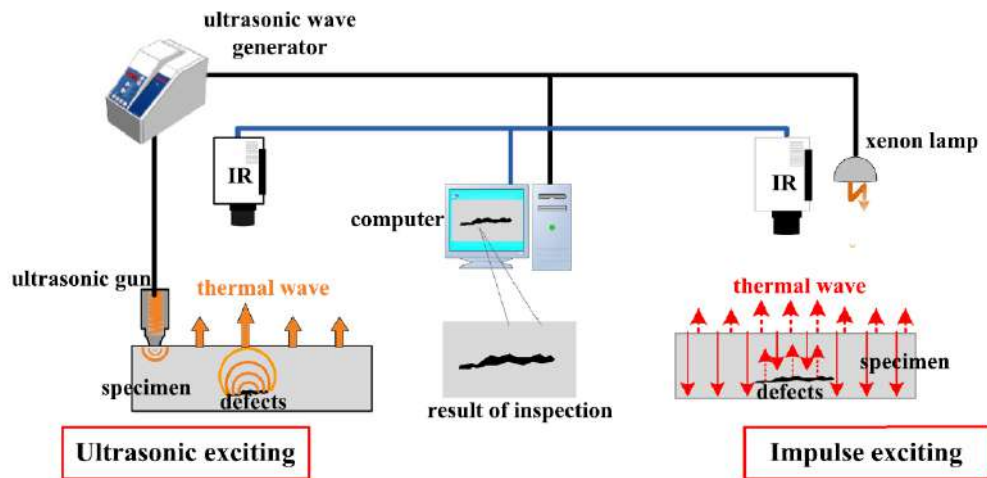


Figura 2.11: Exemplo de montagem experimental de TA (Adaptado de [15])

• Vantagens e desvantagens da técnica de termografia

De acordo com o CANEND [17], é apresentada uma lista de vantagens e desvantagens deste processo.

Vantagens:

- (i) Rapidez: pode abranger uma vasta área numa única exposição;
- (ii) Sem contacto: não é afetada pelos inconvenientes resultantes do contacto da sonda com a superfície da peça;
- (iii) Resultados relativamente fáceis de interpretar;

Desvantagens:

- (i) Dificuldade na obtenção de uma excitação térmica rápida, uniforme e de alta energia em superfícies de grandes dimensões;
- (ii) As perdas térmicas produzem contrastes térmicos com efeitos prejudiciais sobre a fiabilidade dos resultados;
- (iii) Custo do equipamento;
- (iv) Limitado à deteção de defeitos resultantes de variações térmicas consideráveis;
- (v) Problemas na emissividade de alguns materiais.

• Estudos efetuados na área da TA

Os autores Chang et al. [2] estudaram um dos casos relevantes para este tema de dissertação, que diz respeito à aplicação da técnica de infravermelhos em compósitos de polímeros reforçados com fibra de carbono.

Neste estudo é aplicada a Termografia Ativa Pulsada (TAP), que é uma das técnicas mais utilizadas neste tipo de materiais, tendo como vantagens o baixo custo da técnica, a facilidade de operação, rápida capacidade de detecção e elevada área inspecionada.

Nesta técnica, são gerados impulsos de energia que fazem com que o material aqueça e o calor se difunda ao longo do mesmo. Através do uso de uma câmara infravermelha será registada, em regime transiente, a resposta térmica libertada pelo material numa série temporal de imagens térmicas. Deste modo, os defeitos na estrutura do material podem ser identificados a partir do contraste da temperatura entre a região sem defeito e com defeito [2].

Contudo, segundo os mesmos autores, os dados termográficos são contaminados por ruídos de medição inevitáveis e de fundos não uniformes induzidos por aquecimento desigual, o que torna difícil identificar com precisão as regiões onde existem defeitos.

Deste modo, foi proposto a utilização de um método de decomposição de sinal não paramétrico denominado *Multi-dimensional Ensemble Empirical Mode Decomposition* (ME-EMD) para decompor a imagem térmica em três partes. Serão (i) o ruído de alta frequência associado à medição, (ii) os de baixa frequência dos fundos e (iii) os sinais úteis para a detecção de defeitos.

Geralmente, o ruído associado à medição é de alta frequência, enquanto que os sinais de fundo mudam gradualmente de direção espacial. Por este motivo, os ruídos e os sinais de fundo podem ser removidos de uma só vez por decomposição da imagem térmica em domínios de frequência, melhorando o resultado dos dados termográficos e a consequente detecção dos defeitos.

Apesar de já existirem bons métodos como *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD), este só consegue lidar com séries de dados unidimensionais. De modo a melhorar o campo de aplicabilidade foi desenvolvido o método de MEEMD que pode resolver problemas de grandes dimensões e que apresentam uma carga computacional relativamente menor que algumas extensões multidimensionais de EEMD.

Na figura 2.12 é representado o modelo experimental composto por duas lâmpadas de flash (Force-A-Series 3200 W) como fonte de energia para o material em estudo, uma câmara de infravermelhos (TAS-G100EXD) com uma taxa de amostragem de 30 *frames* por segundo. O material é composto por 25 camadas de folhas de fibra de carbono com espessuras de 0,26 cm com reforço de resina epoxy.

Para a validação experimental foram introduzidos defeitos (10 tiras de teflon) de diferentes tamanhos (1 x 1 cm e 1,5 x 1,5 cm) e profundidades, antes de injetar a resina no material (figura 2.13). Assim foi possível testar o desempenho de diferentes métodos de processamento dos dados térmicos.

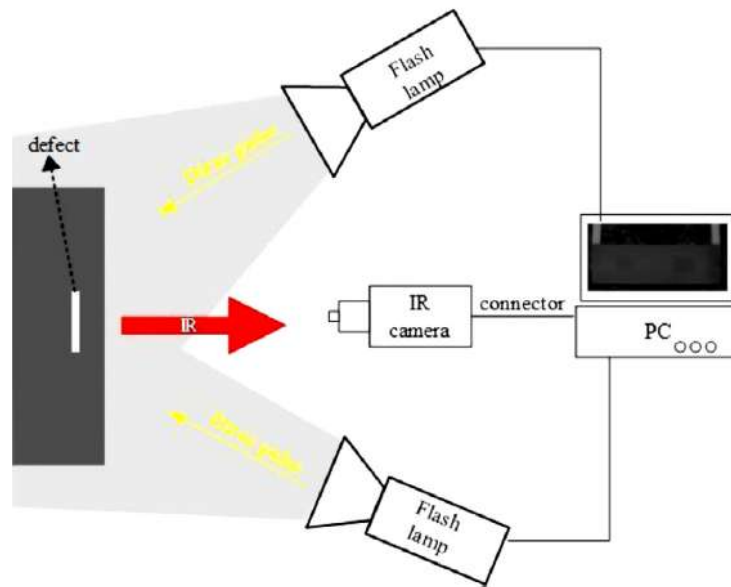


Figura 2.12: Ilustração do sistema de TAP (Adaptado de [2])

Na figura 2.14 é evidente a vantagem no uso do método proposto em [2], onde em (d) é bastante melhor a distinção dos defeitos introduzidos no material, relativamente aos outros métodos.

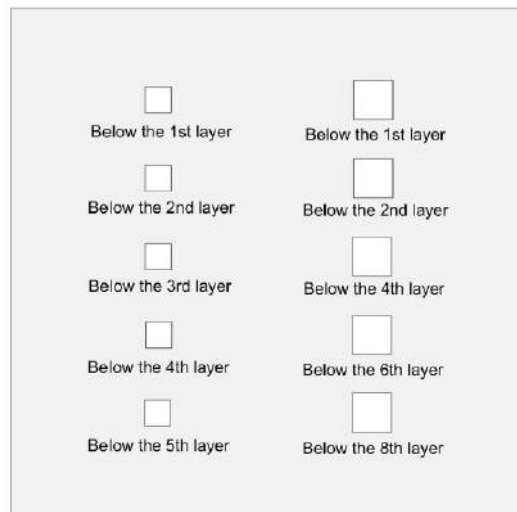


Figura 2.13: Ilustração da disposição dos defeitos introduzidos no material(Adaptado de [2])

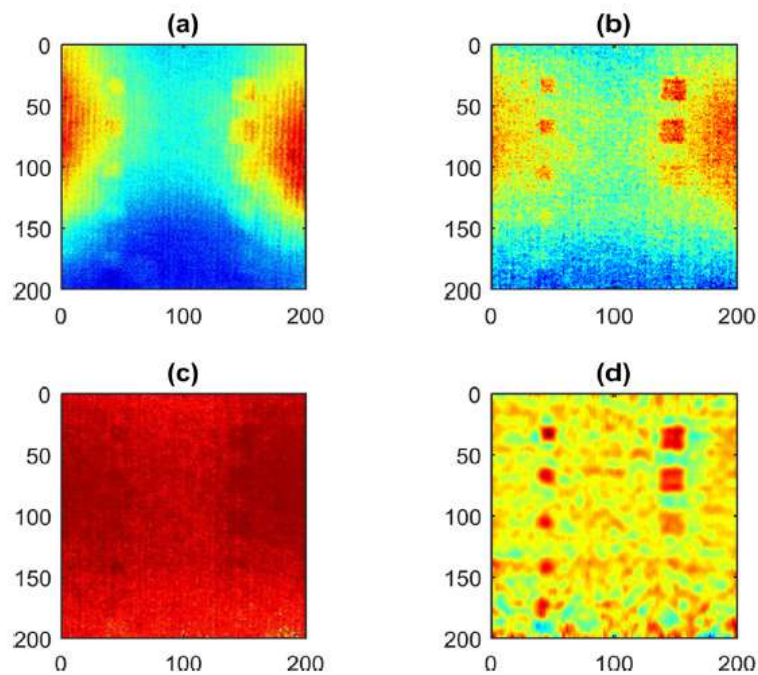


Figura 2.14: Imagens térmicas (escala de 200 x 200 píxeis)
 (a) imagem sem tratamento, (b) imagem com pré-tratamento, (c) imagem processada por *Termographic Signal Reconstruction* (TSR), (d) imagem reconstruído por MEEMD
 (Adaptado de [2])

Os autores Lizaranzu et al.[16] realizaram testes de TAP para a análise de materiais compósitos.

Este refere que a resposta do material, ou seja a radiação que emite, dependerá das suas propriedades: térmica (condutividade, difusividade, efusividade e calor específico) e espectral (emissividade, absorção e reflexão).

Deste modo, os defeitos como vazios, poros, inclusões, entre outros, apresentam propriedades diferentes do material base, o que implica que o fluxo de calor é afetado o que leva a aparecerem gradientes de temperatura na superfície da amostra. A câmara termográfica regista estes gradientes de temperatura e representa-os através de imagens com contrastes luminosos.

Na figura 2.15 são ilustrados os resultados dos defeitos observados pelo autor na amostra do compósito de fibras de carbono. As machas claras representam a presença de zonas de efusividade inferior em relação ao material em estudo: (1) delaminação, (2) inclusões de papel de silicone e a zona escura (3) é a presença de uma lâmina metálica, pois esta apresenta uma elevada efusividade, deste modo a câmara termográfica deteta menos radiação.

Os resultados deste trabalho experimental revelaram-se muito satisfatórios, principalmente para defeitos que estavam próximos da superfície (2-3 mm).

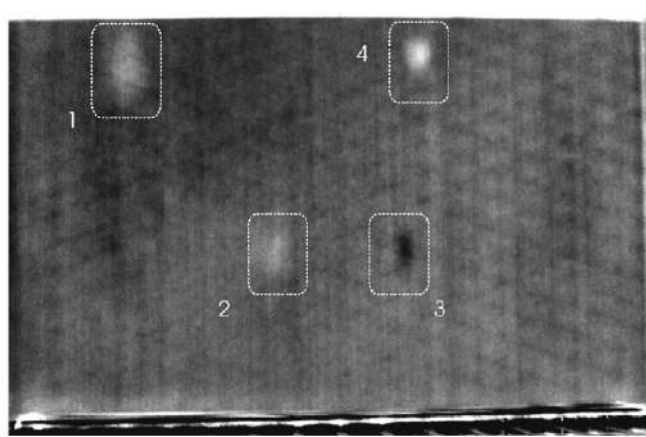


Figura 2.15: Imagem termográfica da presença de defeitos (Adaptado de [16])

Segundo o autor Pastuszak [3], apesar das vantagens significativas no uso de materiais compósitos, estes estão sujeitos a diversos defeitos, como a quebra das fibras, descolamento das fibras, fissuras na matriz e delaminação. Estes defeitos podem interagir uns com os outros e desenvolver estados que comprometem a integridade do conjunto, reduzindo significativamente as suas propriedades. Por vezes, essas falhas internas permanecem indetetáveis podendo por em risco a saúde ou a vida humana.

Neste caso, foi testado o uso do método de elementos finitos para a técnica de termografia. Através deste método, consegue-se uma melhor compreensão dos processos térmicos, que são base da análise termográfica. A investigação numérica pode simular o fluxo de calor que atravessa o material, bem como as distribuições de tensão e deformação durante condições de carga, incluindo cargas mecânicas e térmicas. A representação do método bem como o resultado da distribuição da temperatura ao longo da superfície do material são ilustrados na figura 2.16.

Neste trabalho experimental o mesmo autor, usou duas amostras, a configuração (a) com delaminação (folha de Teflon) em forma de quadrado (60x60 mm) com 50 μm de profundidade, e a (b) com um quadrado de (10x10 mm) e 400 μm de profundidade. Na figura 2.17 são representados os termogramas das respetivas configurações. Em (a) a delaminação é pouco visível comparada com (b).

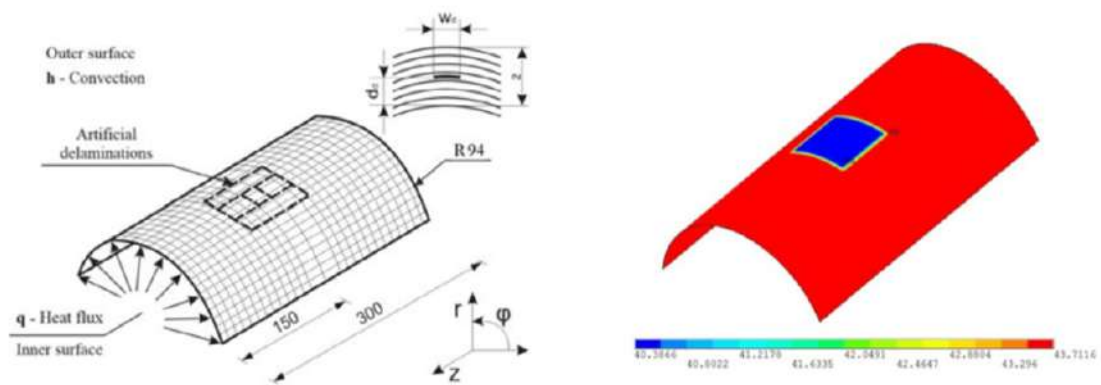


Figura 2.16: Ilustração do modelo computacional e da distribuição de temperaturas do modelo numérico da delaminação para a configuração (a) (Adaptado de [3])

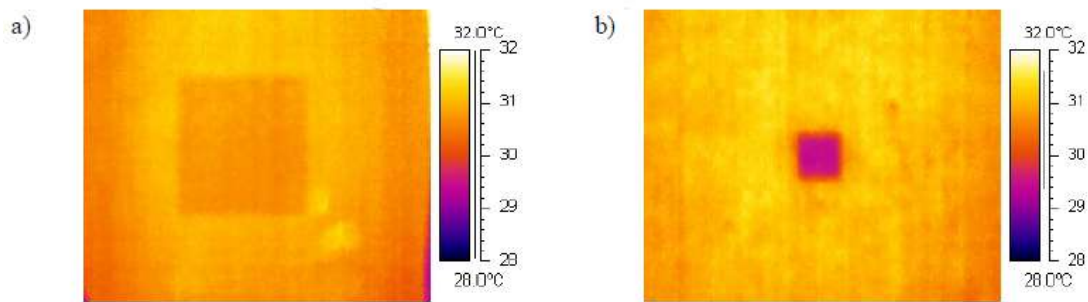


Figura 2.17: Imagens termográficas
 a) configuração (a) e b) configuração (b) (Adaptado de [3])

2.4.2 Radiografia

•Contexto histórico

No final de 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen estava a trabalhar com um tubo de raios catódicos no seu laboratório. Numa das suas experiências evacuou todo o ar contido nos tubos e encheu-o com um gás, passando uma corrente elétrica de alta tensão no seu interior. Quando o fez, o tubo produziu um brilho fluorescente. Röntgen protegeu o tubo com papel preto pesado e descobriu que uma luz verde poderia ser vista numa tela que estava a alguns metros do tubo. E foi neste momento que se apercebeu que tinha produzido uma “luz invisível” ao qual lhe chamou raio-X.

Entretanto a tecnologia de raio-X foi desenvolvida e começou a ser usada no domínio industrial em 1922. As primeiras radiografias a soldaduras ocorreram no ano de 1927. Na atualidade, este é um poderoso método na indústria tecnológica para a inspeção de defeitos superficiais, subsuperficiais e em volume.

•Princípio físico e aplicações

A radiografia envolve a penetração do material com radiação eletromagnética de curto comprimento de onda (0,01 a 10 nanómetros). A quantidade de radiação que passa através do material a inspecionar, é capturada por um detetor. A absorção depende da densidade e da espessura do material. Deste modo, cavidades e descontinuidades, são detetáveis por uma variação na radiação absorvida [18].

•Estudos efetuados na área do Raio-X

Os autores Nouri, Guessasma e Belhabib [19], referem a capacidade de detetar imperfeições estruturais provenientes dos processos de FDM, utilizando a técnica de imagem 3D baseada na micro tomografia de raio-X, como é apresentado na figura 2.18.

No canto superior direito da respetiva figura, é apresentada a morfologia típica dos poros. São identificadas dimensões da ordem de centenas de microns e mesmo porosidades de escalas milimétricas. No canto inferior direito, a topografia das superfícies externas é ilustrada, onde são apresentadas as rugosidades médias e máximas.

No lado esquerdo estão representadas vistas próximas dos arranjos dos filamentos, onde são visíveis as fissuras e porosidades com as respetivas dimensões. A extremidade do poro identificada na mesma figura (*pore at edge*) deve-se às mudanças bruscas na trajetória e desacelerações na deposição dos filamentos. Como tal, a variação de caminhos, provoca situações de cruzamentos, onde é provável que haja conectividade entre os poros, mas também, tal como já foi referido a existência de vazios. A probabilidade da ocorrência de descontinuidades é tanto maior quanto mais camadas se forem criando em que a presença de poros se verifique.

De referir ainda que, devido aos rápidos ciclos de aquecimento e arrefecimento do material, pode existir acumulação de tensões residuais, durante a deposição dos filamentos para a formação da peça [4]. Este fenómeno pode levar a problemas de distorção

e delaminações, que afetam seriamente a forma e dimensões das partes finais, ou até impedir a finalização dos objetos devido à separação das camadas da peça.

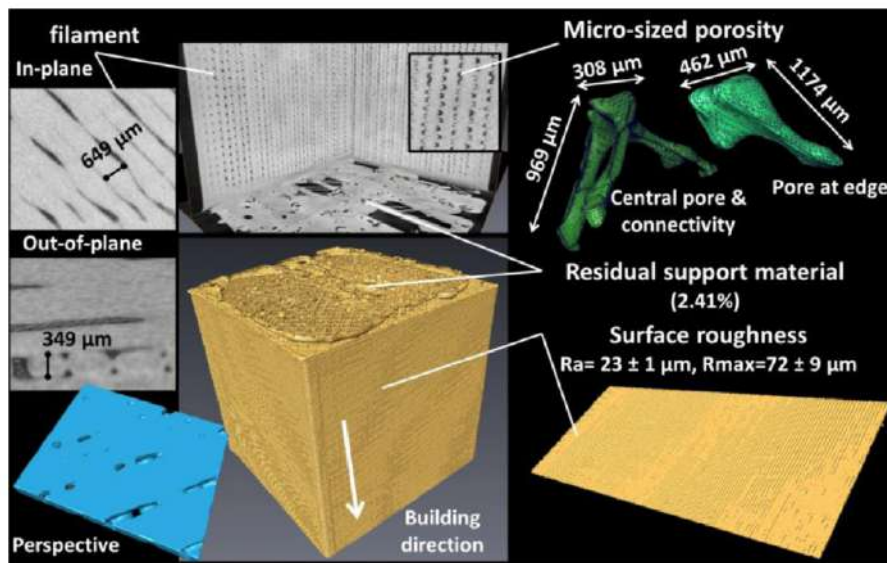


Figura 2.18: Representação das porosidades e discontinuidades em peça produzida por FDM (Adaptado de [19]).

Os mesmos autores referem que uma técnica possível para evitar este problema é a utilização de uma cama aquecida, com a colocação de um adesivo sobre a mesma.

Uma outra tecnologia reportada para a resolução do mesmo problema é o método de *hole-drilling*. Neste método semi-destrutivo, a introdução de um furo causa uma relaxação das tensões localizadas e deformação na periferia do referido furo. A distribuição de tensões pode ser medida através de extensómetros ou de técnicas óticas.

2.4.3 Ultra-Sons

●Contexto histórico

A primeira aplicação dos ultra-sons (US) foi realizada no ano de 1881, quando Jacques e Pierre Curie publicaram os resultados obtidos ao experimentar a aplicação de um campo elétrico alternado sobre cristais de quartzo e turmalina, os quais produziram ondas sonoras de altas frequências.

Em 1917, Paul Langevin e Chilowsky produziram o primeiro gerador piezoelétrico de US, cujo cristal servia também de recetor, e gerava alterações elétricas ao receber vibrações mecânicas. Este aparelho foi muito útil para a investigação do fundo dos oceanos. No ano de 1929, o russo Sergei Sokolov propôs o uso de US para detetar fendas em material metálico, e também para microscopia, surgindo assim a primeira aplicação deste tipo de onda como ensaio não destrutivo [20].

●Princípio físico e aplicações

O método de US consiste na aplicação de ondas sonoras de alta frequência, mais especificamente acima dos 20 KHz, a um material com o objetivo de obter a resposta do movimento das partículas.

As ondas ultra-sonoras são geradas através de cristais piezoelétricos² tais como o quartzo, titanato de bário, sulfato de lítio e o metaniobato de chumbo.

As ondas sonoras sofrem variações quando se propagam no material, podendo ser refletidas ou atenuadas. Assumindo que não existem reflexões relevantes, existem três causas de atenuação: difração, dispersão e absorção.

O modo de propagação das ondas é importante para a seleção da técnica de ensaio, podendo ser através de ondas longitudinais, ondas transversais, ondas de superfície (Rayleigh) e ondas de placa (Lamb). Cada modo possui um tipo particular de trajetória das partículas e velocidade de propagação de onda, sendo escolhido o mais favorável para a deteção das discontinuidades no material em estudo.

●Variantes do método de US

Existem diferentes variantes da técnica de US bem-sucedidas na deteção e caracterização de defeitos: (i) *Creeping*, (ii) *Time of Flight Diffraction* (ToFD), (iii) *Phased Array*, (iv) *EletroMagnetic Acoustic Transducer* (EMAT), (v) *Guided Waves*, e (vi) através de laser.

Um das melhorias que se têm observado no campo dos US é o desenvolvimento de procedimentos em que não é necessário o contacto da sonda com a amostra a inspecionar, são exemplos os testes de imersão, o método de EMAT e os US por laser. De facto, esta melhoria permite aumentar significativamente a precisão dos dados medidos, variar livremente a posição dos transdutores e da amostra, e obter uma quantidade elevada de

²A piezoelectricidade é a capacidade de certos materiais, quando sujeitos a pressões mecânicas, produzirem tensões elétricas. Para a produção de US é então aplicado o método inverso (piezoelectricidade inversa) em que ao aplicarmos uma tensão elétrica alternada ao material, as partículas atômicas que o constituem oscilam entre si e propagam umas às outras a energia vibratória, a que se chama ondas sonoras.

dados para a análises subsequentes destinadas à caracterização da resposta mecânica do material [21].

A não necessidade de contato entre a sonda e o material verifica-se de extrema importância, pois como já foi referido no capítulo anterior, através do processo de FDM são obtidos materiais com elevada rugosidade superficial, o que dificultaria a obtenção de resultados com o acoplante tradicional.

•Estudos efetuados na área dos US

Os autores Castellano et al. [21], estudaram um caso experimental para a caracterização da resposta elástica de materiais compósitos anisotrópicos, através de testes de US por imersão. Neste estudo, foi utilizado a variante de ToFD.

Para além da análise de defeitos, este método pode também ser usado para a classificação do grau de anisotropia, determinação da resposta mecânica e dos módulos de elasticidade necessários para a descrição mecânica do material.

Estas são informações úteis para a caracterização dos materiais que são difíceis de alcançar através das técnicas convencionais, comparativamente com os US.

O método desenvolvido neste trabalho experimental, mostra que é possível estimar facilmente os cinco módulos elásticos do compósito reforçado com fibras de carbono, isotrópico transversal unidirecional, e que esta abordagem tem potencial para a análise de compósitos anisotrópicos mais complexos.

Segundo os mesmos autores, a caracterização da resposta elástica através deste método não destrutivo requer a medição da velocidade das ondas ultra-sonoras, que se propagam em direções a serem escolhidas, dependendo do grau de anisotropia do material. No caso de isotropia transversal, a determinação dos cinco módulos de elasticidade independentes necessitam da determinação das velocidades das ondas sonoras, que se propagam no plano isotrópico e num plano que contem o eixo da isotropia transversal.

São ainda referidas dificuldades devido aos transdutores ultra-sonoros apenas emitirem e receberem ondas longitudinais puras ou ondas transversais puras, enquanto que a medição da velocidade das ondas não puras também é necessária. Outras dificuldades referidas são: (i) a necessidade de gerar ondas que se propagam em direções com orientações particulares em relação às superfícies da amostra; (ii) os fenómenos de refração e dispersão típicos de ondas em meios anisotrópicos e (iii) a necessidade de um acoplamento eficiente para a precisão das medições da velocidade.

Todas estas dificuldades podem ser superadas através da utilização dos dispositivos goniométricos e da técnica de US imersos, pois tanto a amostra como os transdutores são imersos num tanque de água sem contato direto. A água funciona como acoplamento permitindo um acoplamento acústico ideal. Os dispositivos goniométricos, que atuam sobre os transdutores e as amostras, tornam possível alterar o ângulo entre o feixe ultra-sonoro e as superfícies da amostra.

A água só suporta ondas longitudinais, mas podem ser geradas ondas transversais e ondas não puras na amostra por conversão do modo, isto é, pela mudança da polarização

da onda que atravessa a interface entre os dois meios. O modo de conversão é descrito pela lei de Snell dada pela equação 2.1 [21].

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2.1)$$

Em que α_1 e α_2 são os ângulos de incidência no meio 1 e meio 2 respetivamente, e C_1 e C_2 são as velocidades no meio 1 e meio 2 respetivamente.

Foram realizados testes com duas diferentes configurações experimentais. Na primeira configuração apresentada na figura 2.19 em a), são usadas duas sondas opostas, uma a funcionar como transmissor e outra como recetor. Sendo deste modo um teste realizado com base no fenómeno de transmissão das ondas sonoras.

Na segunda configuração apresentada na figura 2.19 em b), apenas é utilizado um transdutor, e no lado oposto é colocada uma superfície refletora de acrílico. Deste modo, o transdutor atua ao mesmo tempo que o transmissor e o recetor sendo posteriormente realizados ensaios de reflexão. Esta configuração foi adotada de modo a evitar problemas relacionados com a refração acústica.

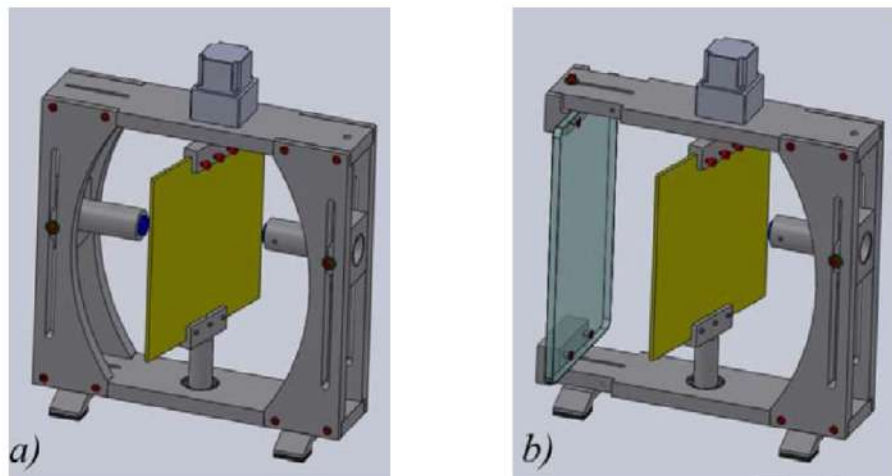


Figura 2.19: Configurações utilizadas - a) configuração baseada na transmissão sonora, b) configuração baseada na reflexão sonora (Adaptado de [21]).

Verificou-se que as análises numéricas realizadas apresentam valores muito próximos aos obtidos nos testes experimentais de US, validando deste modo o modelo numérico.

As simulações numéricas têm muitas vantagens como: (i) identificar as zonas com anisotrópica onde a intensidade do feixe ultra-sonoro se concentra, (ii) medir a velocidade e fase dos ângulos, com o objetivo de definir o posicionamento ótimo dos transdutor nos testes experimentais, (iii) simular os efeitos das rotações da amostra e dos transdutores na propagação do feixe sonoro para a amostra (útil para o manuseio do dispositivo gonio-métrico) e (iv) determinar os ângulos de incidência do feixe sonoro necessário para gerar ondas longitudinais e transversais em modos puros ou quase com energia máxima.

2.4.4 Correntes Induzidas

•Contexto histórico

Só nas últimas décadas surgiu efetivamente a aplicabilidade das correntes induzidas (CI) como método de análise não destrutiva, para a inspeção de defeitos nos materiais.

Os princípios associados à indução eletromagnética devem-se ao conceituado físico Michael Faraday, que em 1831 descobriu que quando um campo magnético passa através de um material condutor, ou quando um condutor se move por um campo magnético não uniforme, uma corrente elétrica passa através desse condutor se houver um caminho fechado para que esta possa circular.

Posteriormente, em 1879, David E. Hughes demonstrou que as propriedades de uma bobina mudam quando esta é colocada em contacto com um material de diferente condutividade térmica e permeabilidade, produzindo uma alteração da sua impedância elétrica.

No entanto, só durante a 2ª Guerra é que estes conhecimentos foram postos em prática no campo dos ensaios não destrutivos. Hoje em dia, devido aos estudos efetuados e aos avanços tecnológicos, o método de CI é um dos mais utilizados para a deteção de defeitos superficiais ou subsuperficiais.

•Princípio físico e aplicações

O princípio de funcionamento dos END por CI baseia-se no fenómeno da indução eletromagnética. Os defeitos são detetados com base na variação da impedância elétrica aos terminais de uma bobina (que constitui a sonda). Esta bobina é sujeita a uma corrente elétrica alternada, a qual se desloca ao longo de um material condutor elétrico. No caso de existir um defeito no material a circulação das CI é perturbada. Consequentemente, o campo magnético será menos intenso e essa alteração pode ser medida, permitindo assim detetar eventuais defeitos ou outras alterações das propriedades dos materiais.

As CI num material condutor não se distribuem uniformemente ao longo da profundidade do material, mas concentram-se na superfície, tornando-se progressivamente menos intensas. Este fenómeno é descrito de acordo com a seguinte equação 2.2, em que I é a densidade de corrente [$A \cdot m^{-2}$], f é a frequência de excitação [s^{-1}], μ é a permeabilidade magnética [$H \cdot m^{-1}$] e σ é a condutividade elétrica [S/m].

$$I_x = I_0 \times e^{-x(\pi \times f \times \mu \times \sigma)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

A profundidade a que as CI circulam, depende das características da corrente induzida, nomeadamente da sua frequência: quanto menor é, maior será a profundidade possível de analisar. Medindo esta variação obtêm-se as características do defeito existente, que será comparada com a resposta obtida a partir de um componente de características iguais sem quaisquer defeitos, denominado de padrão. A profundidade a que a intensidade das CI se

reduz a 36 % relativamente à intensidade das CI à superfície é dada pela equação 2.3.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2.3)$$

Existem dois tipos de sonda, que são classificadas de acordo com a sua forma: sondas helicoidais cilíndricas e as espirais planas. As primeiras têm como principal aplicação a deteção de defeitos mais profundos, uma vez que apresentam uma maior resolução espacial, enquanto que as sondas planas, apesar de menor resolução espacial, têm uma maior proximidade com o material diminuindo o efeito de *lift-off*. Este efeito diz respeito à alteração da posição da sonda em relação ao material que se pretende inspecionar. Esta variação produz uma alteração na impedância elétrica, podendo esta ser superior à variação provocada pela existência do defeito.

• Estudos efetuados na área das CI

Tendo em conta a baixa condutividade elétrica do carbono, os autores Cheng et al. [22] referem que a técnica de CI com uma frequência até 100 MHz pode ser considerada adequada para este tipo de material. No entanto este método com alta frequência é mais suscetível a vários fatores de interferência que causam dificuldades na interpretação dos resultados.

Deste modo os mesmos autores desenvolveram um sistema de CI com uma frequência de trabalho de 250 KHz com uma sonda de emissão-receção com núcleo de ar. As características da sonda são ilustradas na figura 2.20 e as características do conjunto das sondas de emissão-receção são ilustradas na figura 2.21.

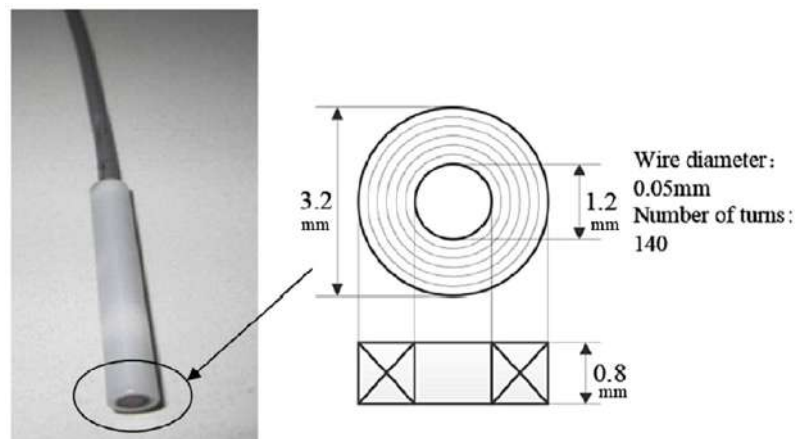


Figura 2.20: Parâmetros da sonda (Adaptado de [21]).

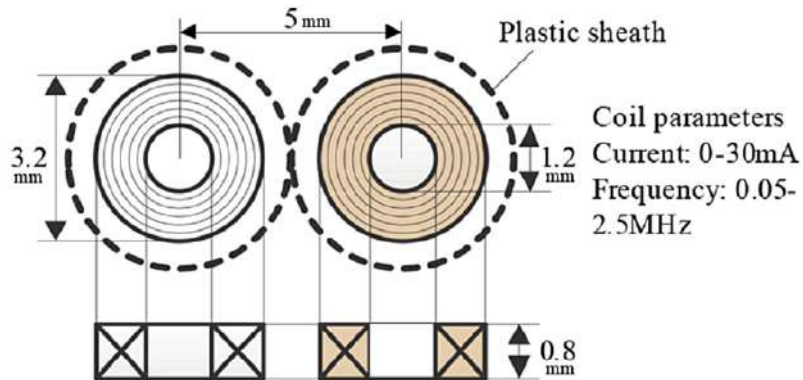


Figura 2.21: Parâmetros do conjunto das sondas de emissão-recepção. (Adaptado de [21]).

Através da utilização de uma mesa xy, os referidos autores realizaram varrimentos ao material em estudo onde foi possível detetar vários tipos de defeitos tais como: a orientação das fibras, fibras desalinhas, fraturas no material delaminações e danos causados por impacto. Nas figuras 2.22, 2.23 e 2.24, estão ilustrados respetivamente os defeitos de fratura, delaminação e impacto.

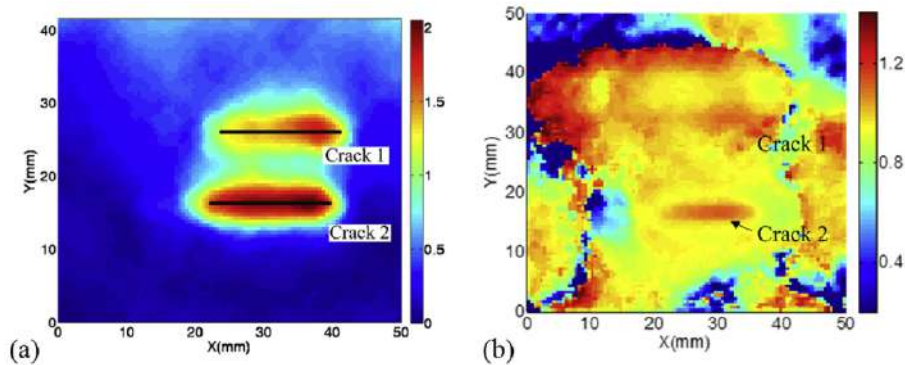


Figura 2.22: Detecção dos sinais de duas fraturas - (a)imagem da amplitude, (b)imagem da fase. (Adaptado de [21]).

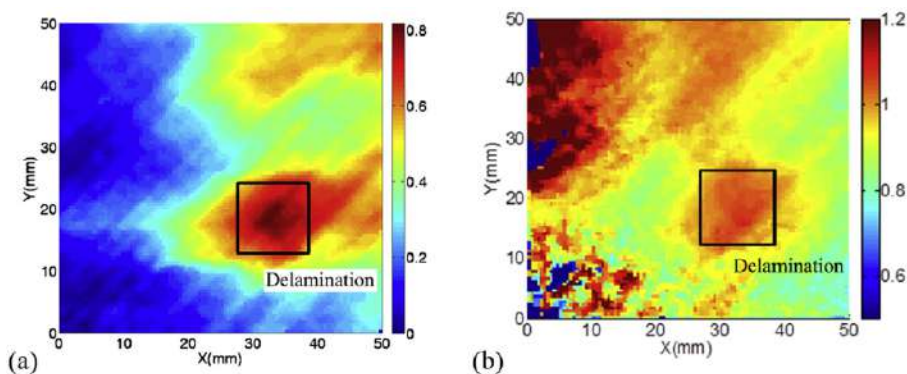


Figura 2.23: Detecção de sinais de delaminação - (a)imagem da amplitude, (b)imagem da fase. (Adaptado de [21]).

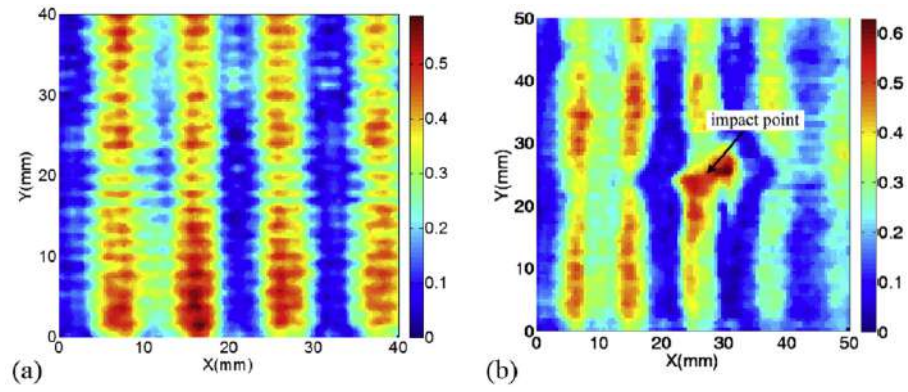


Figura 2.24: Imagens do tecido da amostra - (a)imagem sem defeito, (b)imagem com impacto. (Adaptado de [21]).

PRODUÇÃO DE PROVETES COM DEFEITOS PADRÃO

3.1 Introdução

Com o objetivo de conseguir detetar a existência de defeitos nos materiais produzidos por Manufatura Aditiva (MA), foi necessário proceder à produção de provetes. Nestes foram criados e inseridos defeitos artificiais de forma a reproduzir os que se formam naturalmente durante o referido processo.

Neste capítulo serão descritos os modelos e respetivos provetes para posterior inspeção através de técnicas END. São apresentados dois subcapítulos: modelos dos provetes e produção dos provetes.

No primeiro (§ 3.2) são explicados os defeitos que se pretendem reproduzir (vazios, delaminações e colocação de material de reforço) a partir dos modelos que darão origem aos provetes. No segundo subcapítulo (§ 3.3) são descritas as características da impressora utilizada bem como todos os provetes produzidos, o material inserido e os parâmetros da sua produção. Será ainda realizada uma abordagem aos problemas que surgiram durante o processo de impressão e aos parâmetros de impressão utilizados.

3.2 Modelos dos provetes

Tal como foi referido ao longo do capítulo anterior, os principais defeitos possíveis de ocorrer na produção de peças através do método de *Fused Deposition Modeling* (FDM) são: (i) porosidades/vazios, (ii) o desalinhamento do material de reforço, (iii) a falta de ligação entre o reforço e a matriz, (iv) as delaminações entre as camadas da matriz e (v) o mau acabamento superficial.

Na tabela 3.1 está descrita a metodologia usada para proceder à produção dos provetes com defeitos padrão na tentativa de os aproximar o mais possível dos defeitos reais. Estão também indicados os provetes que contém os referidos defeitos.

Tabela 3.1: Relação entre os defeitos reais e os defeitos padrão

Defeitos reais	Defeitos padrão	Provetes
Porosidades/Vazios	Provetes com diferentes formas e dimensões de vazios	1-5
Desalinhamento do material de reforço Falta de ligação entre o reforço e a matriz	Colocação de fios durante a impressão	6-7
Delaminação entre camadas da matriz	Colocação de material para provocar a separação das camadas	8
Mau acabamento superficial	Verificar a diferença com e sem mau acabamento superficial	9-10

Para o desenho dos modelos 3D dos referidos provetes foi utilizado o programa *Solidworks*®. Neste programa é possível guardar o ficheiro do modelo em formato STL que posteriormente será usado para ser lido por um programa de definição dos parâmetros da impressora e produção do ficheiro *gcode*. Este último ficheiro contém o código que indica à impressora o caminho e os parâmetros de impressão para a produção das peças.

3.2.1 Produção dos modelos de provetes com vazios

O primeiro modelo produzido foi uma peça quadrada de dimensões 50x50x5 mm. Neste modelo foi desenhado um espaço vazio no seu interior com a forma de um quadrado de dimensões 15x15x2 mm, centrado e a meio da espessura. Este vazio apresenta dimensões acima daquelas que são esperadas nos defeitos reais, para que sejam realizados ensaios preliminares, de modo a facilitar o ajuste dos parâmetros das técnicas de END utilizadas. Na figura 3.1 é apresentado o modelo produzido no *SolidWorks*®.

De modo a ser testada a fiabilidade de precisão das técnicas de END na deteção da forma dos vazios, foi produzido um provete com as dimensões de 80x80x5 mm, com um vazio novamente a meio da espessura, com a forma do símbolo do projeto FIBR3D, onde as letras apresentam dimensões da mesma ordem de grandeza do vazio do provete anterior. Na figura 3.2 é ilustrado o referido provete.

Com a finalidade de perceber qual é o limiar da detetabilidade dos END para os vazios com a variação da sua forma, foi produzido o modelo do provete 3 com as dimensões de 50x50x5 mm. Este modelo com a respetiva identificação dos defeitos é ilustrado na figura 3.3.

Na tabela 3.2 é associado um número ao tipo de geometria e dimensões dos vazios representados em b) da figura 3.3.

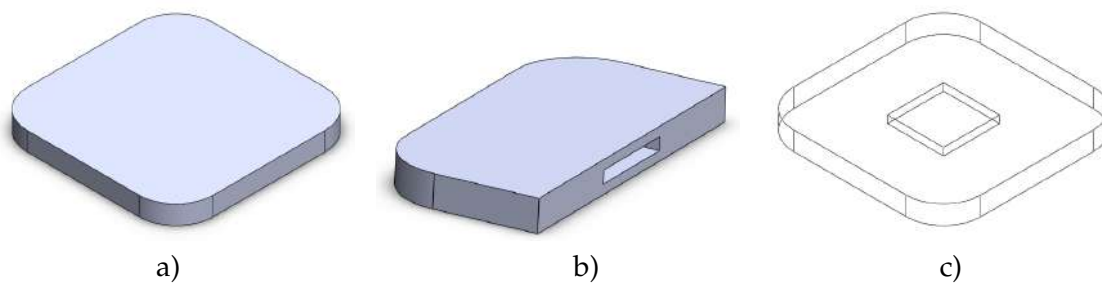


Figura 3.1: Modelo Provette 1
a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.

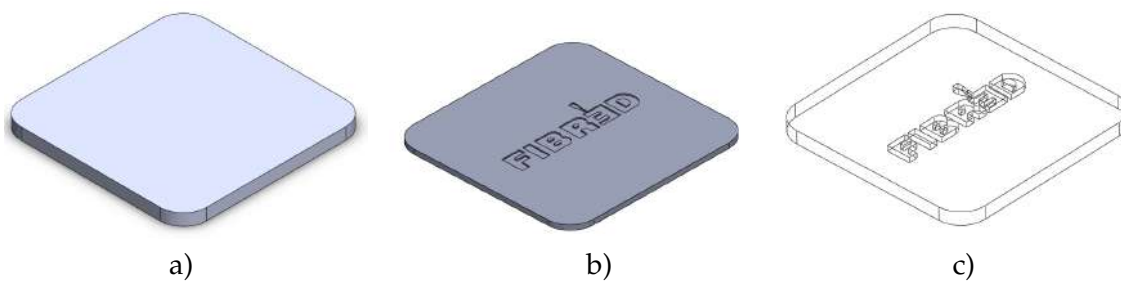


Figura 3.2: Modelo Provette 2
a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.

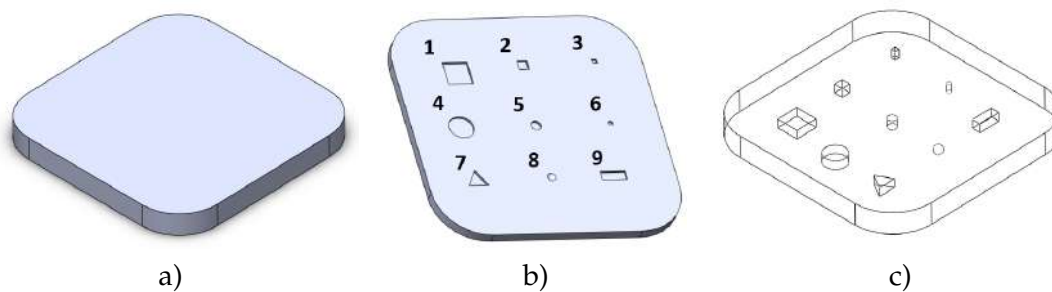


Figura 3.3: Modelo Provette 3
a) Vista exterior, b) Vista de corte, c) Vista interior.

Tabela 3.2: Dimensões dos defeitos do provete 3, em que " l " é a largura, " c " o comprimento, " h " a altura, " a " a aresta e " r " o raio.

Geometria	Nº do defeito	Dimensões (mm)
Paralelepípedo ($l \times c \times h$)	1	($5 \times 2 \times 2$)
	2	($2 \times 2 \times 2$)
	3	($1 \times 1 \times 2$)
Cilindro ($r \times h$)	4	($2,5 \times 2$)
	5	(1×2)
	6	($0,5 \times 2$)
Prisma triangular ($a \times h$)	7	(4×2)
Esfera (r)	8	(1)
Paralelepípedo ($l \times c \times h$)	9	($5 \times 2 \times 2$)

De forma a ser testado um diâmetro do bocal da extrusora mais próximo do que será utilizado no projeto FIBR3D (3 mm), foi utilizado um bocal com 1,4 mm de diâmetro. Deste modo, foram criados dois modelos (4 e 5) com o mesmo tipo de vazios, mas com o objetivo de testar esta nova espessura de filamento e o efeito da curvatura. Com os vazios 13, 14, 15 e 16 pretendeu-se também simular a delaminação entre as camadas da matriz.

O modelo ilustrado na figura 3.4 apresenta as dimensões de 150x150x9 mm.

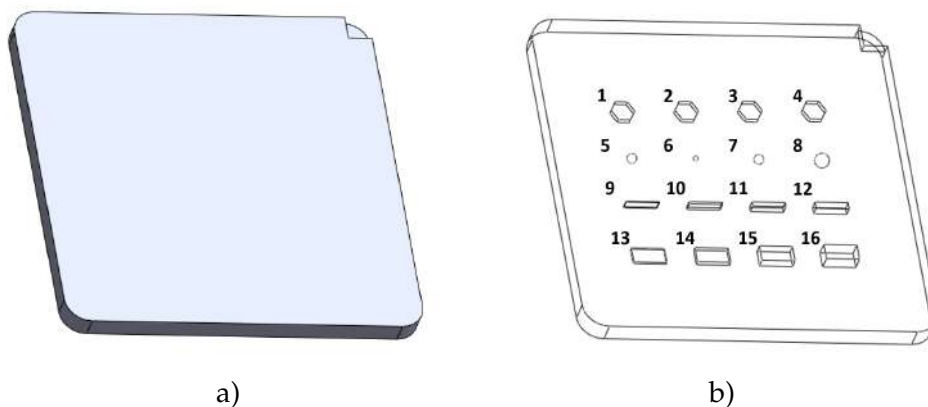


Figura 3.4: Modelo provete 4
a) vista exterior, b) vista interior.

Tabela 3.3: Dimensões dos defeitos do provete 4, em que " l " é a largura, " c " o comprimento, " h " a altura, " a " a aresta e " r " o raio.

Geometria	Nº do defeito	Dimensões (mm)	Profundidade (mm)
Hexágono ($a \times h$)	1	(5×2)	6
	2	(5×2)	5
	3	(5×2)	4
	4	(5×2)	3
Esfera (r)	5	(2)	4
	6	(1)	4
	7	(2)	3
	8	(3)	2
Paralelepípedo ($l \times c \times h$)	9	($0,5 \times 14 \times 4$)	3
	10	($1 \times 14 \times 4$)	3
	11	($2 \times 14 \times 4$)	3
	12	($3 \times 14 \times 4$)	3
Paralelepípedo ($l \times c \times h$)	13	($7 \times 14 \times 1$)	7
	14	($7 \times 14 \times 2$)	6
	15	($7 \times 14 \times 4$)	4
	16	($7 \times 14 \times 6$)	2

Tal como foi referido, foi também elaborado um modelo com os referidos defeitos mas com uma geometria curva, com um raio de curvatura de 106 mm, 150mm de altura e 8,4 mm de espessura. Neste caso os defeitos que simulam as delaminações entre camadas são o 9, 10, 11 e 12 pois são os que se apresentam na direcção perpendicular à produção do provete.

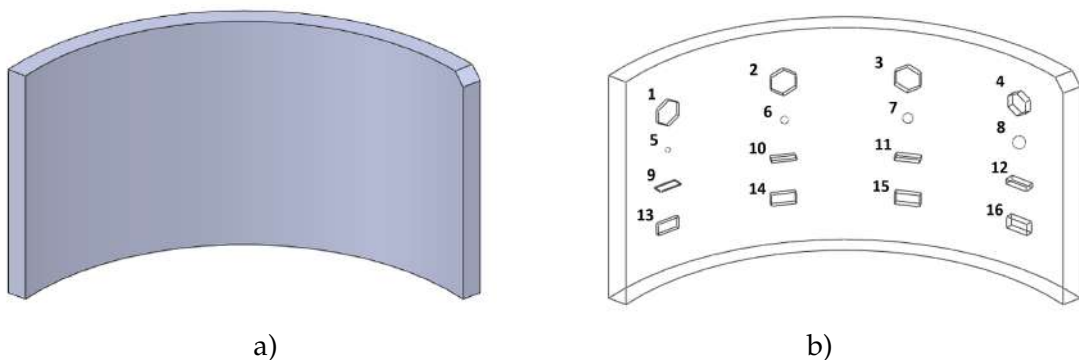


Figura 3.5: Modelo provete 5
a) vista exterior, b) vista interior.

Não sendo possível no nosso laboratório (NOVA NDT Lab.), produzir peças com material de reforço em forma de fibra contínua, foi produzido um novo modelo quadrado com as dimensões de 150x150x8 mm. Durante a impressão do respetivo provete, serão colocados fios de diversos materiais: NiTi, *Kevlar*®, cobre, ferro e fibra de ótica para posterior inspeção do possível desalinhamento do reforço ou falta de ligação entre este e a matriz.

O mesmo modelo foi utilizado para produzir um provete com fibra de carbono (modelo 7) e um provete para simular as delaminações entre camadas da matriz polimérica (provetes 8).

Foi criado um modelo quadrado com dimensões 150x150x8 mm, onde durante a impressão serão colocados fios de diversos materiais: NiTi, *Kevlar*®, cobre, ferro e fibra de vidro. O mesmo modelo foi utilizado para produzir um provete com fibra de carbono e um provete para simular as delaminações entre camadas da matriz polimérica.

O mau acabamento superficial é uma característica muito difícil de controlar no método de FDM. Apesar disso e com o objetivo de conseguir analisar os polímeros através do método de ultra-sons foram criados dois novos modelos.

O modelo do provete 9 possui as dimensões de 83x31 mm em que a espessura varia de acordo com os 4 patamares de 7, 9, 11 e 13 mm, representados na figura 3.6 respetivamente por 1, 2, 3 e 4.

Para perceber se a direção do feixe ultra-sonoro relativamente à direção de deposição das camadas tem influência nos resultados, foi criado o modelo do provete 10. O provete 10 de dimensões de 31x21x41 mm foi impresso na direção vertical, contrariamente à direção de impressão do provete 9.

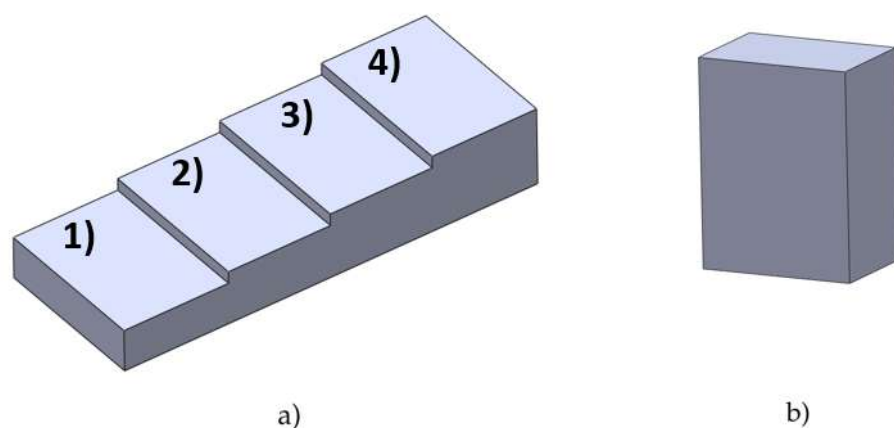


Figura 3.6: Modelo provetes para serem testados nos ultra sons
 a) modelo do provete 9, b) modelo do provete 10.

3.3 Produção dos provetes

3.3.1 Impressora 3D

Após criados os modelos em *SolidWorks*®, estes são convertidos para o formato *Stereolithography* (*.STL) para que possam ser usados em programas de edição dos parâmetros de impressão. Os programas usados para este fim foram o *Cura* e o *Simplify3D*. Na impressão com o *nozzle* de 1,4 mm de diâmetro o *Simplify3D* revelou-se mais eficaz relativamente à qualidade de impressão, deste modo este foi usado mais vezes. Quando terminada a edição dos parâmetros a usar na impressão, os modelos são guardados num ficheiro em formato *gcode*. Este ficheiro contém o código que indica à impressora o caminho e os parâmetros de impressão para a produção das peças.

Para a produção dos provetes foi usada a impressora 3D (Prusa i3 BQ [23]) do NOVA NDT Lab. Esta impressora (figura 3.7), permite produzir peças com as dimensões máximas de 210 mm em x, 180 mm em y e 170 mm em z. Foram utilizados diferentes tipos de materiais como o PLA, ABS, Nylon e PEEK em forma de filamento (1,75 mm de diâmetro) para se recorrer ao processo de FDM.

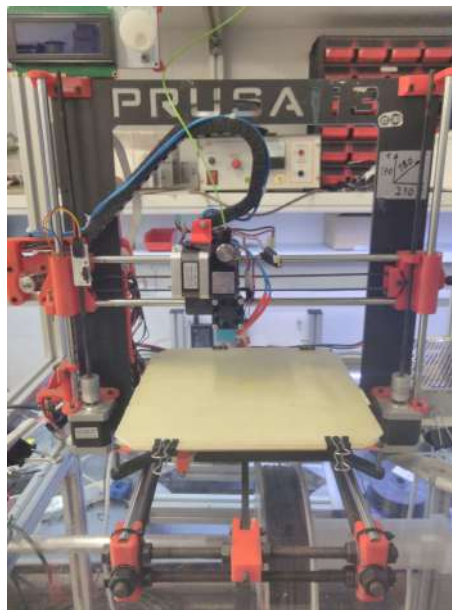


Figura 3.7: Impressora 3D *Prusa i3 BQ* do laboratório NOVA NDT Lab.

3.3.2 Provetes

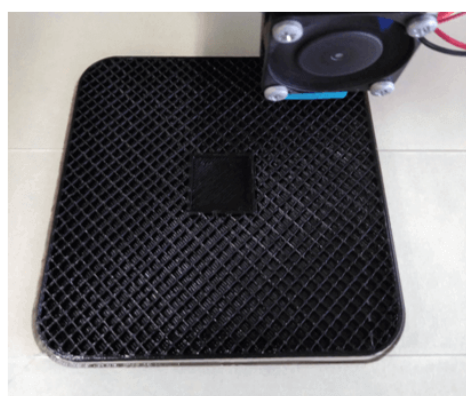
Como foi apresentado em § 2, é de extrema importância inserir os parâmetros adequados para que se consiga uma impressão com boa qualidade. Foram testados diferentes parâmetros de impressão onde se verificou de modo experimental e iterativo que os descritos na tabela 3.4, apresentam os melhores resultados na qualidade de impressão dos referidos provetes.

Para comparação da detecção dos vazios tendo em conta os diferentes polímeros (PLA, ABS e Nylon), foram produzidos mais três provetes. Estes foram produzidos através do modelo do provete 1, com as dimensões de 80x80x5 mm. Os parâmetros de impressão para os provetes de ABS e Nylon estão também descritos na tabela 3.4. No caso do Nylon, para além de ser necessário elevar bastante a temperatura da cama, foi também necessário utilizar mais um parâmetro de impressão designado *Brim*. Este consiste na criação de um perímetro de material de modo a que a adesão da peça à cama seja mais eficaz. Neste caso o *Brim* foi utilizado nas duas primeiras camadas iniciais, e no final da impressão é retirado do provete final.

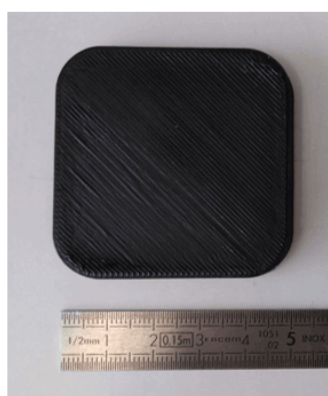
Na figura 3.9 são apresentadas as imagens de ambos os provetes durante a impressão e quando finalizados. De notar que o provete de Nylon em d) apresenta um notável mau acabamento superficial comparado com o de PLA e de ABS.

Tabela 3.4: Parâmetros de impressão utilizados no provete 1 de PLA, ABS e Nylon.

Parâmetro	PLA	ABS	Nylon
Diâmetro do Filamento (mm)	1,75	1,75	1,75
Fluxo (%)	180	180	180
Diâmetro do Bocal (<i>Nozzle</i>) (mm)	0,4	0,4	0,4
Altura da Camada (mm)	0,4	0,4	0,4
Densidade de Enchimento (%)	30	30	30
Camadas Sólidas Superiores	1	3	3
Camadas Sólidas Inferiores	1	3	3
<i>Brim</i> (mm)	-	-	6
Velocidade de Impressão (mm/s)	40	40	40
Temperatura de Impressão (°C)	215	240	285
Temperatura da Cama (°C)	60	80	110



a)



b)

Figura 3.8: Provette 1 (50x50x5 mm)

a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.

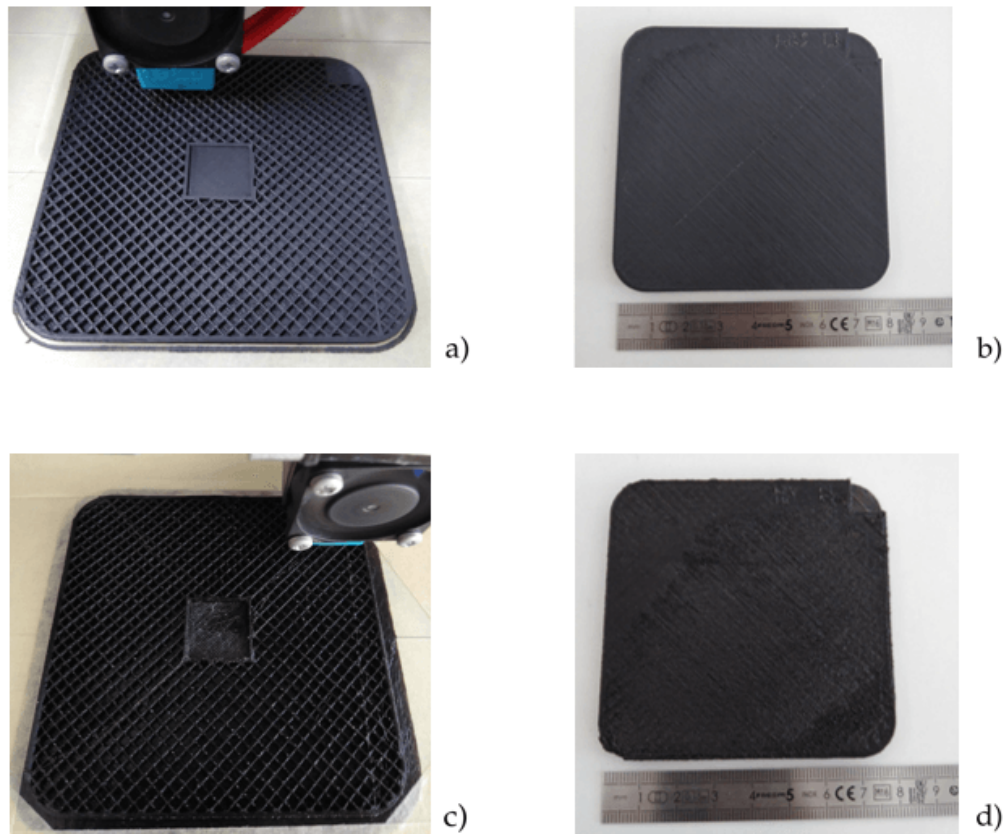


Figura 3.9: Provete 1 ABS e Nylon (80x80x5 mm)

a) imagem captada durante a impressão do ABS, b) resultado final do ABS, c) imagem captada durante a impressão do Nylon, d) resultado final do Nylon.

O provete 2 foi produzido em PLA com os mesmos parâmetros do provete 1. Na figura 3.10 a) pode observar-se a produção do provete 2 onde é visível a formação dos vazios no interior da peça com a forma das letras do logotipo do FIBR3D.

Com os mesmos parâmetros descritos na tabela 3.4 foi produzido o provete 3. Este é ilustrado na figura 3.11, onde em a) pode observar-se o provete durante o processo de impressão. É visível a formação de vazios, identificados com a mesma numeração descrita na tabela 3.2.

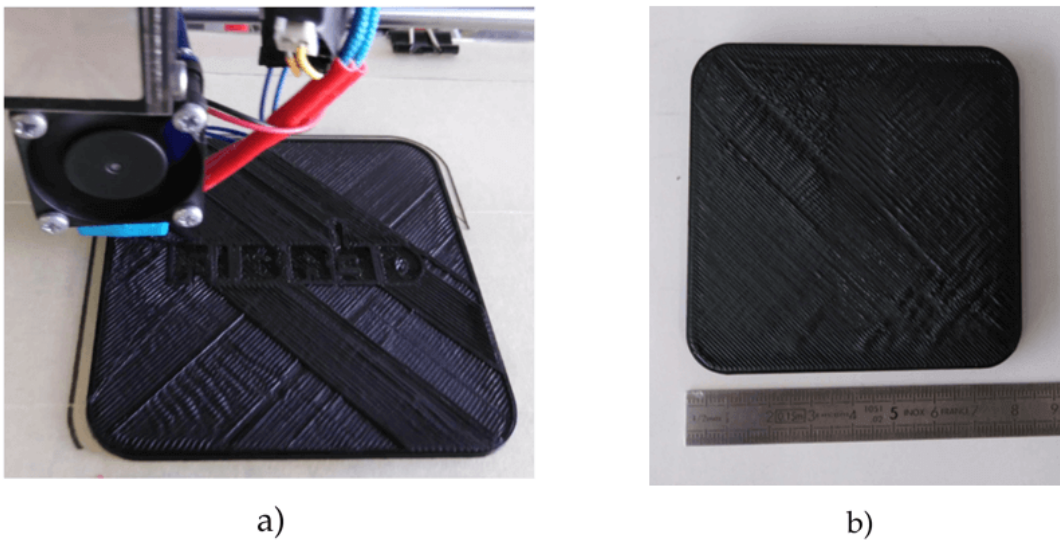


Figura 3.10: Provetes 2 (80x80x5 mm)
 a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.

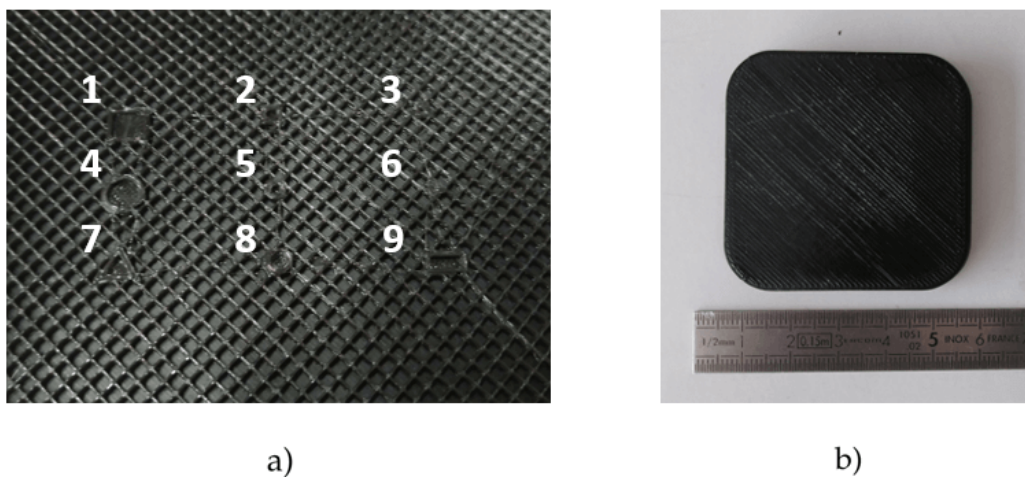


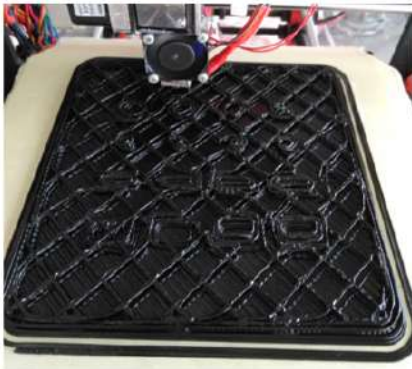
Figura 3.11: Provetes 3 (50x50x5 mm)
 a) imagem captada durante a impressão, b) resultado final.

Para produção dos provetes 4 e 5 foi usado o *nozzle* de diâmetro 1,4 mm. Como o diâmetro do filamento extrudido é superior ao do filamento usado na produção dos provetes anteriores, os parâmetros de impressão também têm de ser ajustados. Na tabela 3.5 estão descritos os parâmetros utilizados na impressão dos referidos provetes.

Na figura 3.12 observa-se a formação do contorno dos vazios durante a impressão do provete 4. Na figura 3.12 é ilustrado o provete 5 quando acabado o processo de impressão. Neste provete verificou-se um mau acabamento superficial e mesmo algumas falhas durante o processo de impressão, devido à dificuldade de ajustar parâmetros como a temperatura e a velocidade de impressão.

Tabela 3.5: Parâmetros de impressão provete 4 e 5

Parâmetro	Valor
Diâmetro do Filamento (mm)	1,75
Fluxo (%)	180
Diâmetro do Bocal (<i>Nozzle</i>) (mm)	1,4
Altura da Camada (mm)	1,0
Densidade de Enchimento (%)	30
Camadas Sólidas Superiores	2
Camadas Sólidas Inferiores	1
Velocidade de Impressão (mm/s)	40
Temperatura de Impressão (°C)	230
Temperatura da Cama (°C)	60



a)



b)

Figura 3.12: Provetes 4 e 5

a) imagem captada durante a impressão do provete 4, b) imagem do provete 5.

3.3.3 Produção de defeitos reais

Os parâmetros utilizados na produção do provete 6 foram os descritos anteriormente na tabela 3.5. Durante o processo de impressão foram introduzidos: (i) três fios de NiTi, (ii) dois fios de *Kevlar*®, (iii) um de cobre esmaltado, (iv) um de ferro (98 % de ferro) e (v) um de fibra de vidro.

O processo de colocação dos fios foi dependente do tempo de impressão, deste modo, foi necessária a colocação rápida dos fios durante a impressão. A adesão do primeiro arame de NiTi ao provete foi através da colocação de fita cola nas extremidades do arame. Na colocação dos restantes fios verificou-se que não era necessária a fita cola, pois a própria deposição do filamento por cima do fio foi suficiente para o prender na posição desejada.

Na figuras 3.13 são possíveis de observar os fios inseridos no provete 6, cada um numerado e associado a uma respetiva cor, de modo a facilitar a sua identificação. Na tabela 3.6 é descrita a relação entre o número, o material, as dimensões e a profundidade dos fios do provete 6. Este provete foi impresso com camadas de 1 em 1 mm, desta forma 1 mm de profundidade corresponde a uma camada de impressão.

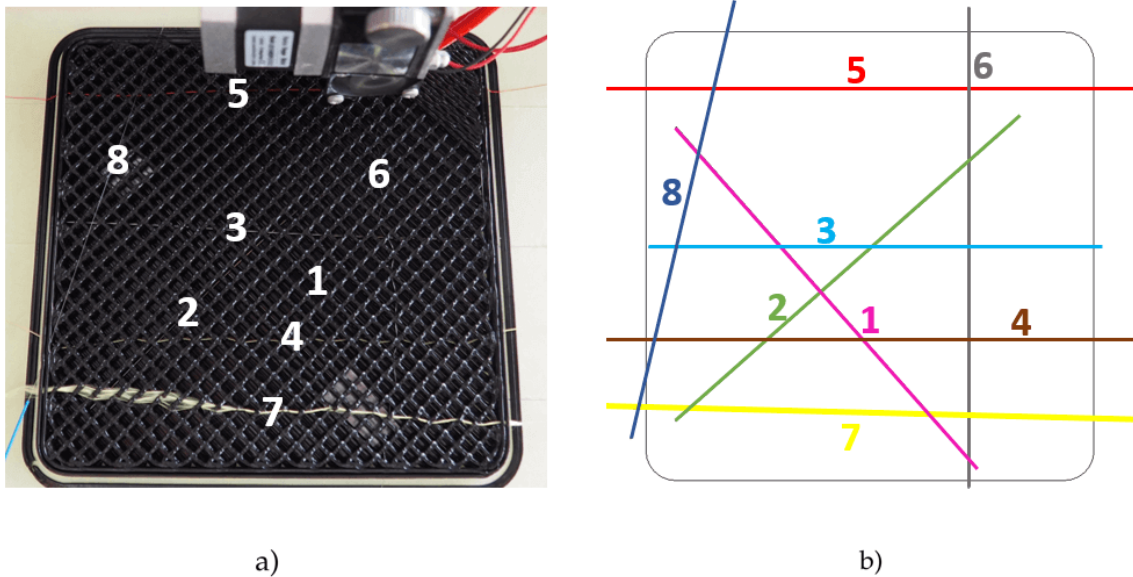


Figura 3.13: Provette 6 (150x150x8 mm)
 a) provete durante a impressão, b) esquema dos fios colocados no provete.

Tabela 3.6: Identificação e descrição dos fios numerados na figura 3.13.

Nº do fio	Material	Diâmetro(mm)	Profundidade
1	NiTi	0,2	entre 1 e 2 mm
2	NiTi	0,2	entre 2 e 3 mm
3	NiTi	0,2	entre 3 e 4 mm
4	<i>Kevlar</i> ®	0,3	entre 4 e 5 mm
5	Cobre esmaltado	0,22	entre 5 e 6 mm
6	Ferro (98 % de ferro)	0,2	entre 5 e 6 mm
7	<i>Kevlar</i> ®	diâmetro variável	entre 6 e 7 mm
8	Fibra de vidro	0,2	entre 6 e 7 mm

Com o mesmo objetivo do provete anterior foi produzido o provete 7, com as dimensões de 150x150x6 mm, onde foram inseridas 5 amostras de fibra de carbono em resina *epoxy*. As referidas amostras foram colocadas entre cada camada do provete. Tendo em conta que foram produzidas camadas de 1 mm de espessura, as amostras foram inseridas de 1 em 1 mm em profundidade.

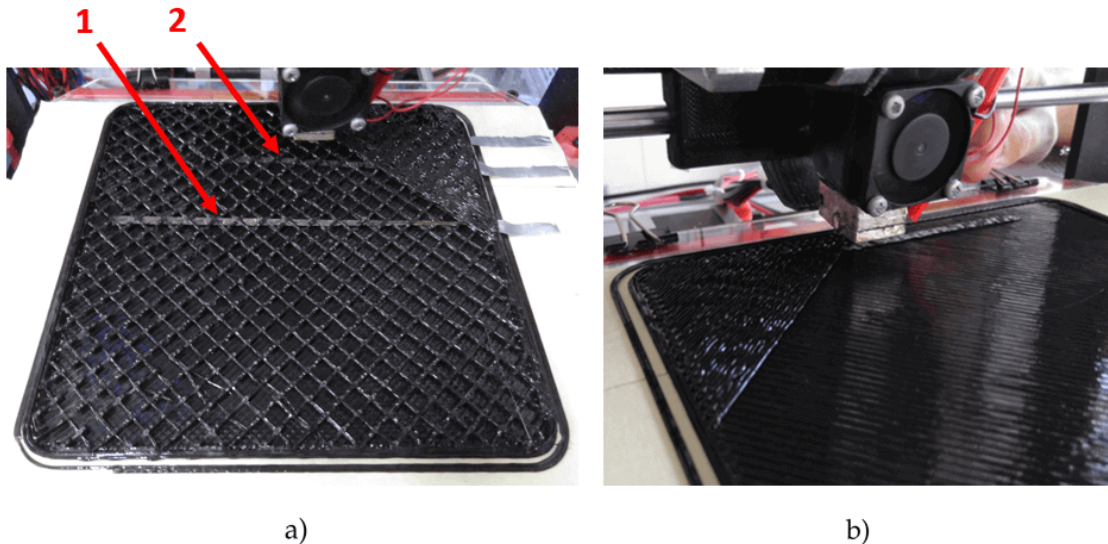


Figura 3.14: Provete 7 (150x150x6 mm)
a) imagem captada durante a impressão onde são visíveis duas amostras, b) colocação da primeira amostra.

Para simular o efeito da delaminação entre camadas do provete 8, foram colocadas folhas de teflon em forma de quadrado com uma espessura de 0,1 mm de três diferentes dimensões: 30 mm, 15 mm e 10 mm de lado do quadrado. Foi também colocada massa consistente, vaselina e WD-40 de modo a que não ocorresse a adesão entre camadas e assim simular a delaminação entre as mesmas.

Todos os materiais foram colocados diretamente pelo operador, incluindo o WD-40 a massa de lítio e a vaselina que foram colocados com o dedo do operador.

Na figura 3.15 estão indicadas as zonas onde foram colocados diferentes materiais. Entre a segunda e terceira camadas, ou seja, entre 2 e 3 mm de espessura, foram colocadas três folhas de teflon de diferentes dimensões, massa de lítio e vaselina.

Entre a quinta e sexta camadas foram colocados os mesmos materiais das camadas inferiores tal como está apresentado na figura 3.16.

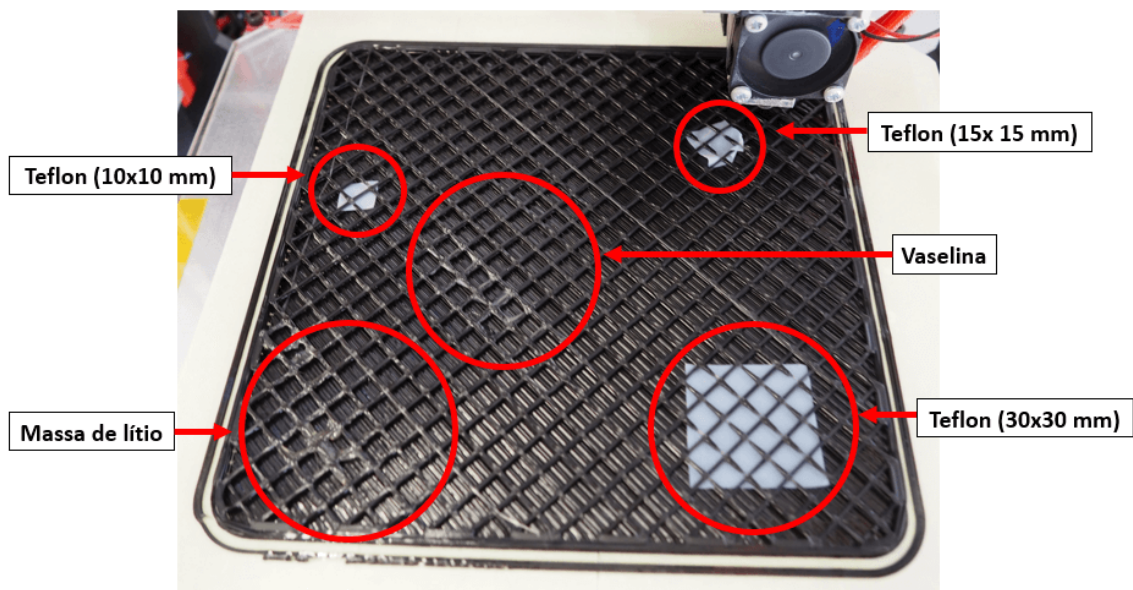


Figura 3.15: Provete com delaminações entre a 2ª e 3ª camadas .



Figura 3.16: Provete com delaminações entre a 5ª e 6ª camadas.

De modo a perceber se mais perto da superfície a deteção das delaminações entre camadas era mais fácil de ser visualizada, colocou-se ainda massa térmica e WD-40 entre a sétima e oitava camadas, sendo que estas camadas já não são com preenchimento de 30 %, mas sim com 100 %. Na figura 3.17 são ilustradas as zonas onde foram colocados os referidos materiais.

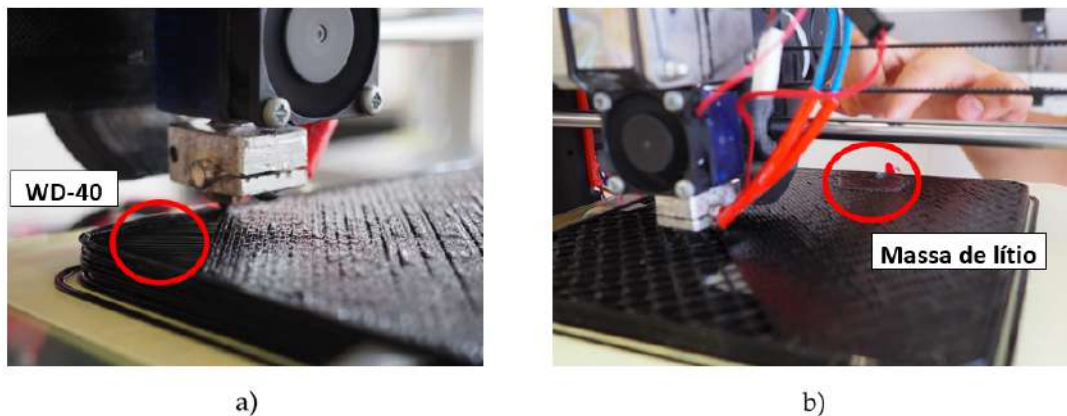


Figura 3.17: Inclusões entre a sétima e oitava camadas
a) WD-40, b) Massa de lítio.

3.3.3.1 Provetes para teste de ultra-sons

Os provetes produzidos a partir dos modelos 9 e 10 serão analisados através do método de ultra-sons para se medir a velocidade do som no material e o coeficiente de atenuação acústica. Deste modo para que perceber se o enchimento influencia os resultados, estes provetes foram impresos com enchimento de 100 %.

O provete 9 possui as dimensões de 83x31 mm em que a espessura varia de acordo com os 4 patamares de 7, 9, 11 e 13 mm, representados na figura 3.18 respetivamente por 1,2,3 e 4.

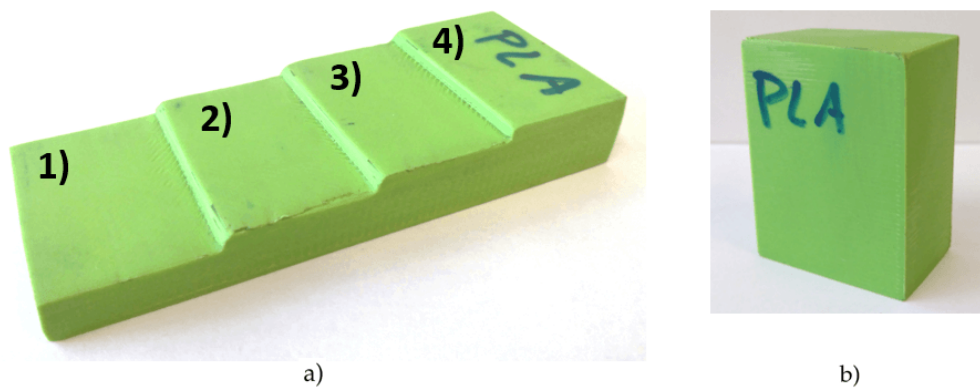


Figura 3.18: Provetes com enchimento de 100 %
a) provete 9, b) provete 10.

Para comparação entre o método de impressão e outros métodos, foi utilizada uma placa de Polyether ether ketone (PEEK) com 6,7 mm de espessura. Neste foram abertas quatro caixas de diferentes diâmetros. Para tal efeito, foram utilizadas duas fresas de 5 mm e 14 mm. Com cada uma das fresas foram abertas duas caixas com 2 mm e 4 mm de profundidade.

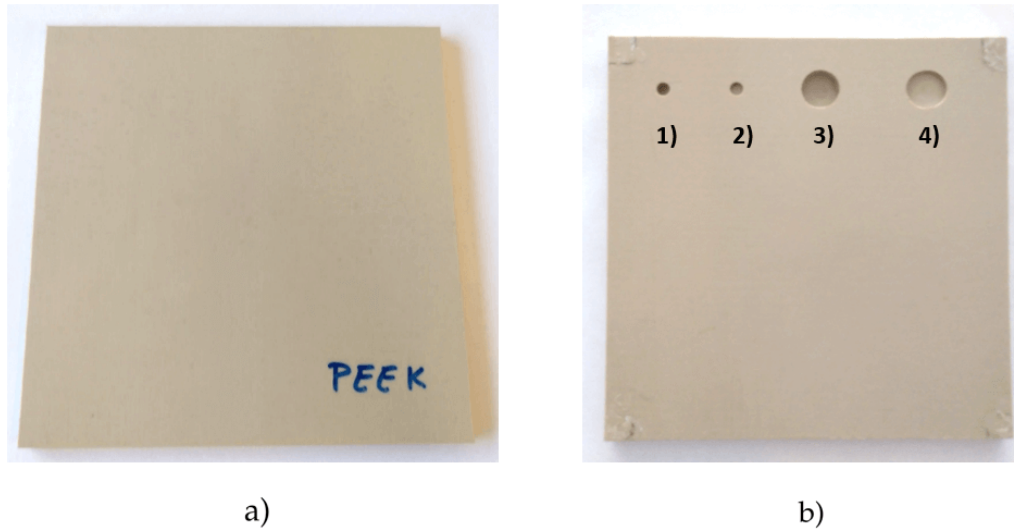


Figura 3.19: Provette de peek(150x150x6,7 mm)

a) face superior do provete, b) face inferior do provete, 1) e 2) são as caixas com 5 mm de diâmetro e 4 e 2 mm de profundidade respectivamente, 3) e 4) são caixas com 14 mm de diâmetro e 4 e 2 mm de profundidade respectivamente.

3.3.4 Defeitos de impressão e influência dos parâmetros

O processo de definição de parâmetros para impressão de uma peça nem sempre é algo imediato. Com a mudança de enchimento, do diâmetro do *nozzle*, do tipo de material e por vezes até das dimensões da peça, é necessário ajustar diversos parâmetros. Para além dos parâmetros programáveis, por vezes é também necessário ajustar parâmetros físicos da impressora, exemplo disso é a distância do *nozzle* à mesa.

Muitos dos provetes descritos anteriormente não foram impressos na primeira tentativa, foi necessários cometer alguns erros para perceber quais os parâmetros que tinham de ser ajustados.

Na figura 3.20 a) é apresentado espaço vazio entre a deposição dos filamentos, que se resolveu com a diminuição do valor da espessura do *nozzle* introduzido no programa *Simplify3D*, embora fisicamente este seja de 1.4 mm, nos parâmetros de impressão funcionou com o valor de 0.8 mm.

Outro caso, ilustrado na figura 3.20 em b), é a falta de adesão entre a primeira e segunda camadas. Isto devido à espessura da primeira camada ser ligeiramente inferior às restantes, pelo que o zero da impressora têm de ser devidamente ajustado para compensar esta diferença.

Em c) da mesma figura é ilustrada a má qualidade do filamento depositado que se percebeu ser devido aos parâmetros de velocidade e temperatura. Foi necessário diminuir a velocidade de 40 m/s para 24 m/s, e alterar a temperatura de impressão de 230 °C para 220 °C.

A impressão de PEEK revelou-se de extrema dificuldade, sendo deste modo impossível criar um provete deste material para posterior inspeção.

Este material necessita de uma temperatura de impressão entre 355 – 390°C, e uma temperatura da cama de 120°C. Devido a estas temperaturas foi necessário adquirir um extrusor preparado para essas temperaturas, tendo em vista extrudir o filamento de PEEK. A dificuldade mais relevante foi a adesão entre camadas do filamento depositado. Como a diferença de temperatura do material entre a saída do *nozzle* e o instante após ser depositado na cama é muito elevada, o material volta rapidamente ao estado inicial não existindo a adesão necessária para que o processo de impressão decorra até ao fim.

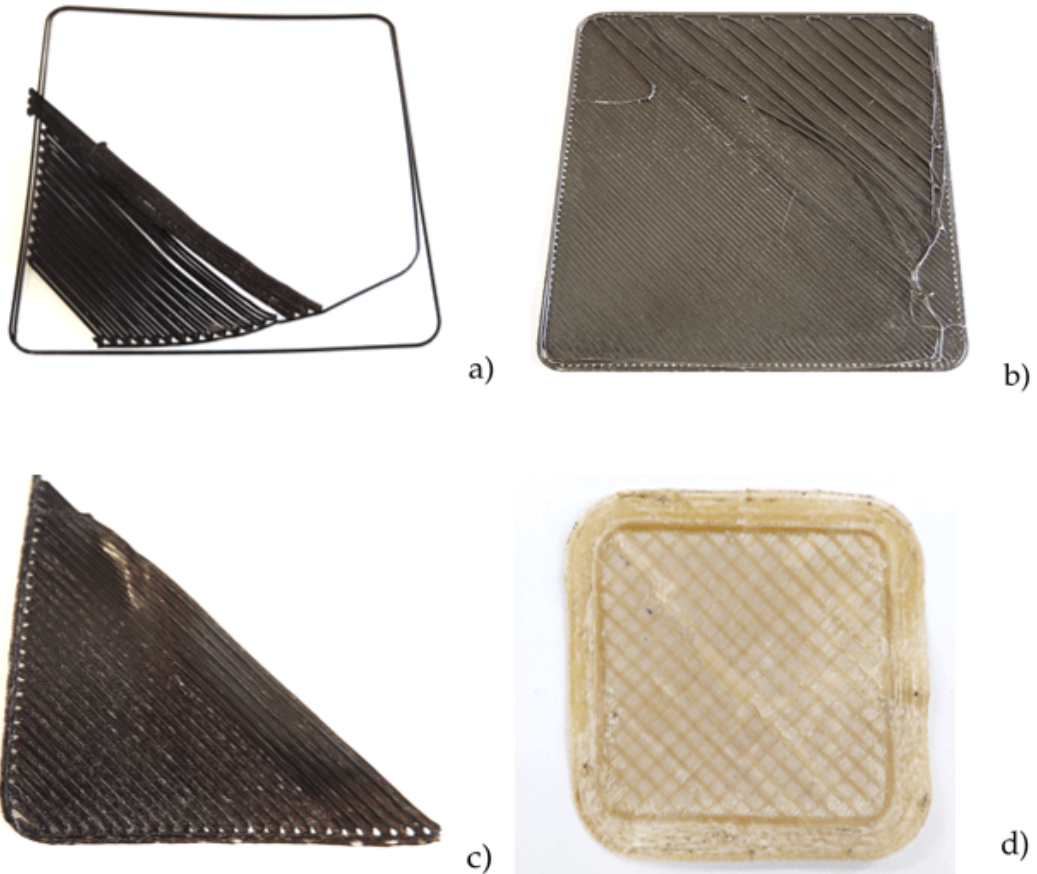


Figura 3.20: Amostras ilustrativas das dificuldades de impressão
a) espaço vazio entre a deposição dos filamentos, b) falta de adesão entre a primeira e segunda camadas, c) má qualidade de impressão devido à velocidade e temperatura de impressão e d) impressão de PEEK.

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO LABORATORIAL

4.1 Introdução

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento laboratorial para detetar os defeitos inseridos nos provetes apresentados no capítulo anterior.

Foram utilizadas quatro técnicas de Ensaios não Destrutivos (END): TAP, radiografia digital (RD), ultra-sons (US) por imersão e correntes induzidas (CI). No primeiro subcapítulo será apresentado o desenvolvimento das estruturas preliminares e final para inspeção através da técnica de TAP. Seguidamente é descrito o equipamento utilizado nos ensaios de radiografia digital. No âmbito do método de ultra-sons é apresentado o equipamento e as sondas utilizadas, bem como a produção de suporte das sondas para a técnica de ultra-sons por imersão. Por fim, no subcapítulo das correntes induzidas são apresentados os modelos das sondas produzidas e as suas características, bem como o equipamento de utilizado.

4.2 Equipamento para ensaios de Termografia

4.2.1 Equipamento disponível para a instalação laboratorial

Através da pesquisa bibliográfica verificou-se que a técnica de TAP poderia ser aplicada na deteção de porosidades/vazios e na deteção da localização do material de reforço.

Para a captação e visualização da radiação infravermelha foi utilizada uma câmara termográfica Fluke Ti400, comercializada pela empresa *Fluke*® [24]. Esta câmara possui uma gama de medição de temperatura de -20°C até 1200°C , com uma precisão de medição de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma banda espectral de infravermelhos de $7,5\mu\text{m}$ a

14 μ m. Possui também uma frequência de captura de imagens de 9 Hz, um campo de visão 24° × 17° e uma resolução espacial de 1,31 mRad.

Com esta câmara foi possível fazer a gravação dos vídeos desde o momento em que a fonte de calor era ligada até ser possível visualizar a radiação emitida pelo material. Para tratamento dos vídeos e produção de imagens foi utilizado o *software SmartView*. A interface gráfica deste programa e as principais funções utilizadas são ilustradas na figura 4.2.



Figura 4.1: Câmera termográfica (Fluke Ti 400).

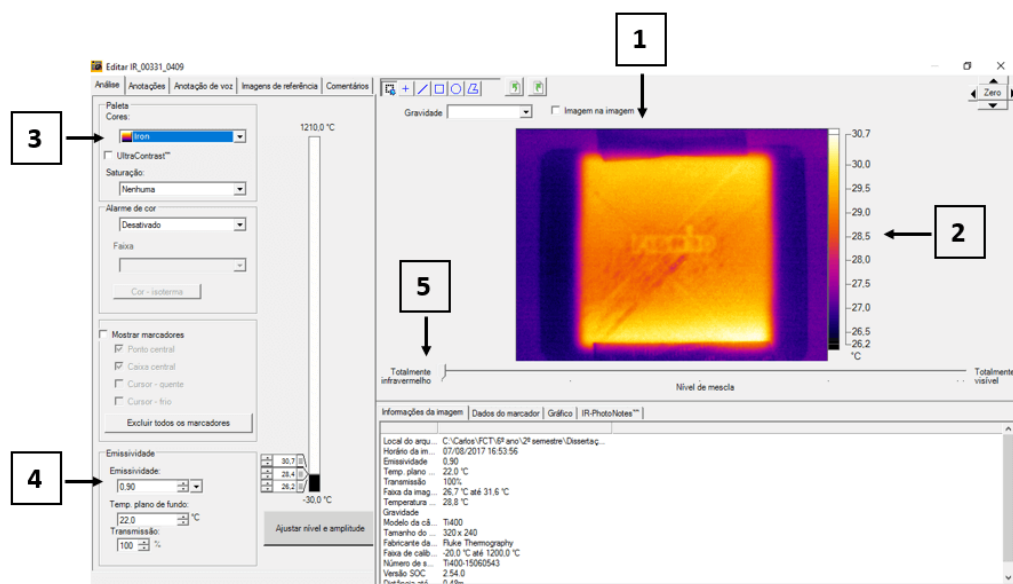


Figura 4.2: Interface gráfica do *SmartView*

- 1) Visualizador da imagem térmica, 2) escala de temperaturas, 3) escala de cores, 4) emissividade, 5) controlo da gama de radiação a observar.

4.2.2 Estação de ensaios preliminar

Numa primeira abordagem à técnica de TAP foi desenvolvida uma estação de ensaios preliminar, onde foi testado o método de TAP com a utilização do fenómeno de transmissão da radiação térmica. Foi necessário construir uma estrutura em que o principal objetivo fosse manter a câmara fixa e não simplesmente apoiada na mão do utilizador. Deste modo a imagem não estava sempre sujeita a oscilações, o que permitia a aquisição da imagem térmica com uma melhor qualidade.

Como se pode observar na figura 4.3 a estação de ensaios era composta por perfil *bosh*, através da ligação aparafusada do perfil a um suporte da câmara. Como tal era possível através do aperto e desaperto, controlar a distância da câmara ao provete. De modo a serem otimizados os resultados da visualização da radiação térmica do provete, este foi colocado sobre um suporte. Este consistia numa superfície de cartão, uma vez que, este material apresenta um valor de condutividade térmica inferior aos dos polímeros analisados. Como fonte de calor foi colocada, por baixo do suporte, uma lâmpada de halogéneo de 400 W de potência, de modo a realizar a técnica de TAP. Dois parâmetros que podem ser controlados neste tipo de ensaios são: a distância da câmara ao objeto e a distância da fonte ao objeto, representadas na figura 4.3 por A e B respetivamente.

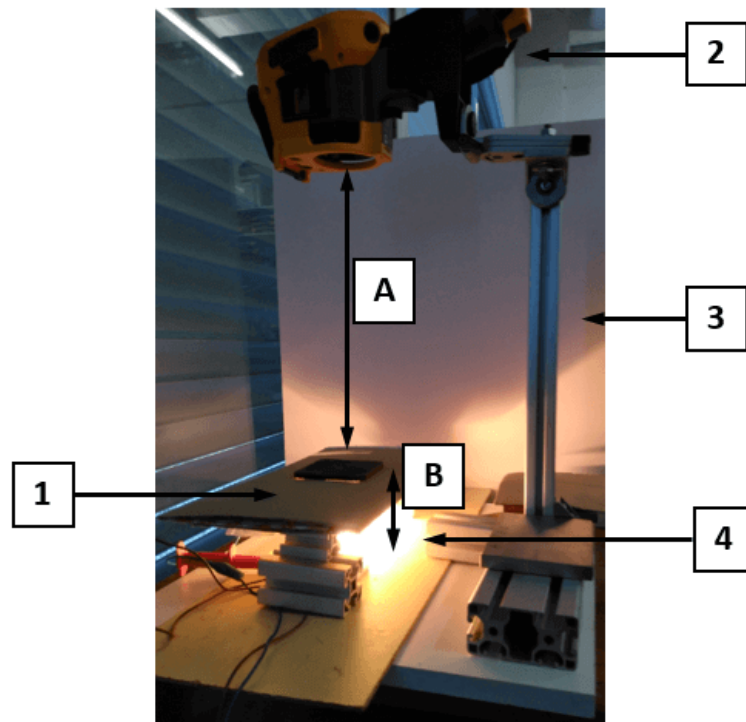


Figura 4.3: Estação termográfica preliminar

1) provete e respetivo suporte, 2) câmara termográfica, 3) suporte da câmara, 4) lâmpada de halogéneo de 400 W, A) distância da câmara ao provete, B) distância da fonte ao provete.

De notar que através das condições descritas verificou-se que a energia térmica que é libertada pela fonte (lâmpada) é irradiada para todas as direções, não sendo deste modo, aproveitada da forma mais eficiente. Com vista a otimizar o processo pensou-se numa forma de conseguir direcionar uma maior quantidade de calor para o provete.

Existem curvas que exibem propriedades de reflexão de acordo com a posição do seu foco. As equações da parábola e da elipse são dois grandes exemplos que apresentam as referidas propriedades. De seguida serão descritas cada uma das curvas e quais as vantagens que trouxeram ao estudo em questão.

4.2.3 Suporte parabólico e elíptico

• Parábola

A parábola é uma curva descrita por uma equação de segundo grau. Esta apresenta propriedades de reflexão, uma vez que, se traçarmos uma reta a partir do foco em direção à curva e posteriormente outra reta com o mesmo ângulo da anterior em relação à reta tangente ao ponto de interseção com a curva, teremos a garantia que esta será paralela ao eixo de simetria da parábola. Esta propriedade é apresentada na figura 4.4.

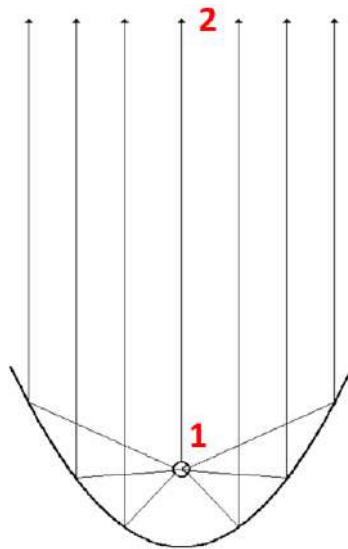


Figura 4.4: Esquema do percurso da radiação refletida pela parábola
1) fonte de calor, 2) provete.

Seguindo o raciocínio anterior, se o foco for uma lâmpada que emite calor, é possível descobrir a equação que descreve a forma da parábola que irá refletir paralelamente ao eixo da mesma, todas as ondas de calor, que entrem em contacto com uma superfície que respeita essa equação.

Partindo destes princípios, foi calculada a equação da parábola para um foco de 40 mm de distância entre este e o vértice da parabólica.

A equação da parábola é dada por:

$$y = ax^2 \quad (4.1)$$

O ângulo de 90° é satisfeito no ponto em que o declive toma o valor de 1, ou seja, $m = 1$, podemos então derivar a equação 4.1 e igualar a 1:

$$y' = 2ax \Leftrightarrow 1 = 2ax \Leftrightarrow x = \frac{1}{2a} \quad (4.2)$$

Substituindo x por $\frac{1}{2a}$ na equação 4.1 obtém-se:

$$y = a \left(\frac{1}{2a} \right)^2 \Leftrightarrow y = \frac{1}{4a} \quad (4.3)$$

E substituindo y por d , em que d é a distância no eixo y entre a parábola e o foco, em que neste caso queremos o valor de 40 mm, vem:

$$y = d = \frac{1}{4a} \Leftrightarrow 40 = \frac{1}{4a} \Leftrightarrow a = \frac{1}{4 \times 40} \Leftrightarrow a = \frac{1}{160} \quad (4.4)$$

Finalmente substituindo a por $\frac{1}{160}$ novamente na equação 4.1 obtém-se:

$$y = \frac{1}{160}x^2 \quad (4.5)$$

Para dimensionar uma peça com a forma da referida parábola é necessário calcular o comprimento da linha da parábola. Deste modo recorreu-se à fórmula do cálculo do comprimento de arcos de curvas ilustrado na figura 4.5.

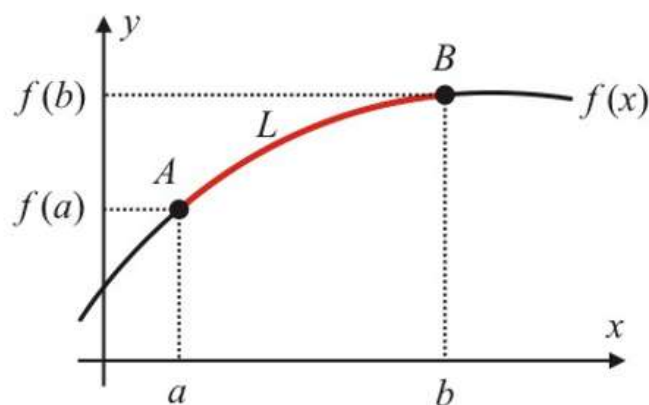


Figura 4.5: Comprimento do arco da curva.

A equação que permite o cálculo do comprimento de arcos de curvas é a seguinte:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (4.6)$$

Devido a questões estruturais decidiu-se que o valor de x , do vértice da parábola até à sua extremidade, seria de 95 mm. Como tal, fazendo a analogia com a figura 4.5 o valor de a será 0 e o de b será 95.

Assim, substituindo os valores na equação 4.7 ficamos com:

$$L = \int_0^{95} \sqrt{1 + \left[2 \cdot \frac{1}{160}x\right]^2} dx \Leftrightarrow L = 114 \text{ mm} \quad (4.7)$$

O comprimento total da linha da parábola será então:

$$L_{total} = 2 \times L \Leftrightarrow L_{total} = 228 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Depois de dimensionada a curva, foi criado um modelo em *SolidWorks*®, onde em primeiro lugar se desenhou a curva da parábola. Este desenho é ilustrado na figura 4.6 onde é possível verificar os parâmetros da curva(1), equação e limites de x , bem como o comprimento total da curva medido pelo programa(2), que é de 228 mm tal como era espectável de acordo com o mesmo valor obtido na equação 4.8.

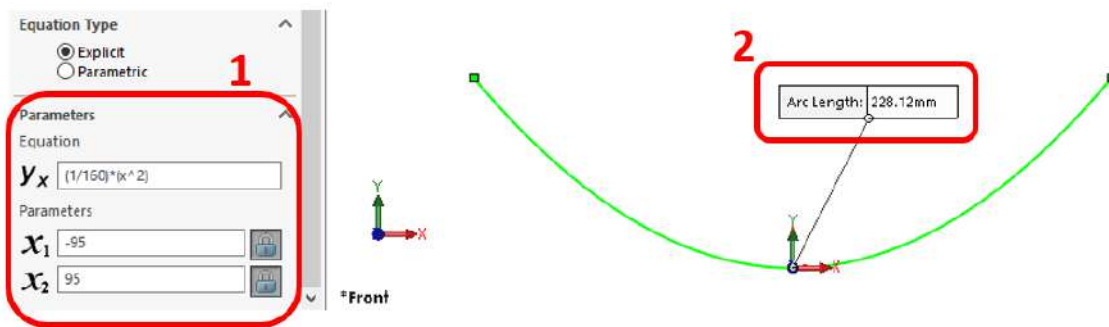


Figura 4.6: Desenho da parábola parametrizada
1)parâmetros da curva, 2)comprimento da curva.

De seguida, a partir do desenho da parábola da figura 4.6, foi desenhado o modelo do suporte parabólico. Na figura 4.7 a) é possível observar as cotas de atravancamento, e em b) a numeração dos pormenores do modelo: (1) orifício que permite fazer a ligação do material refletor ao suporte parabólico, (2) referência dos parâmetros do suporte parabólico e (3) saliência que permite a ligação ao perfil *bosh*.

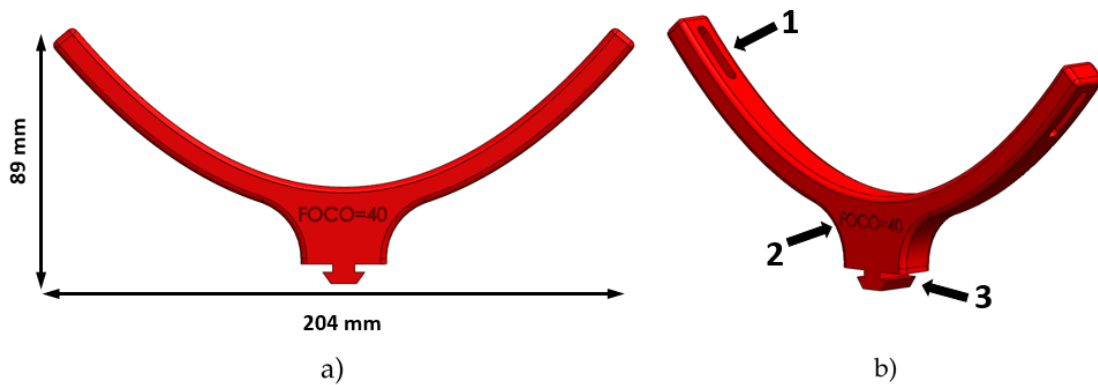


Figura 4.7: Modelo do suporte parabólico
a) contas de atravancamento, b) pormenores do modelo.

• Elipse

No caso da elipse, a curva possui dois focos, onde para qualquer reta que parta de um dos focos em direção à curva, existirá outra reta com o mesmo ângulo da primeira, que irá sempre passar pelo outro foco. Esta propriedade é ilustrada na figura 4.8

À semelhança do que foi dito para a parábola é possível adaptar esta propriedade ao caso em estudo. A fonte de calor é colocada na posição de um foco da elipse, e o provete para onde se tenciona direcionar o calor é colocado na posição do outro foco.

Foi calculada a localização da posição dos focos relativamente à superfície inferior da elipse. Na figura 4.8 b) estão designadas as posições dos pontos que precisam de ser definidos/calculados.

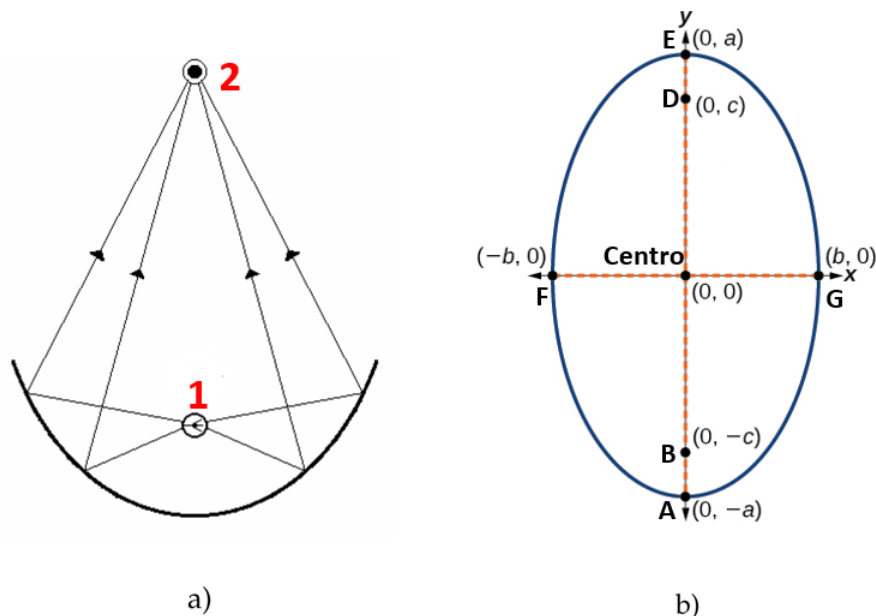


Figura 4.8: Esquema da elipse
a) percurso da radiação refletida pela elipse (1) fonte de calor 2) provete), b) identificação dos pontos da elipse a definir.

Devido a questões estruturais decidiu-se que o valor de b e c seriam ambos de valor igual a 100 mm, deste modo é possível calcular o valor de a através da equação 4.9.

$$a = \sqrt{b^2 + c^2} \quad (4.9)$$

Substituindo os termos b e c pelos valores já referidos ficamos com:

$$a = \sqrt{100^2 + 100^2} \Leftrightarrow a = 100\sqrt{2} \Leftrightarrow a \simeq 142 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Com os valores de a , b e c são calculadas as distâncias: do foco onde ficará a fonte de calor (F_1) e do foco onde será colocado o provete a inspecionar (F_2).

$$F_1 = \overline{AB} \Leftrightarrow F_1 = 42 \text{ mm} \quad (4.11)$$

$$F_2 = \overline{AD} \Leftrightarrow F_2 = 242 \text{ mm} \quad (4.12)$$

Analogamente ao caso da parábola, foi também desenhado o modelo da elipse em *SolidWorks*®, e produzido através do método de impressão 3D.

Na figura 4.9 é ilustrado o modelo da elipse, onde é possível ver as cotas de atravancamento, e a numeração dos seus pormenores.

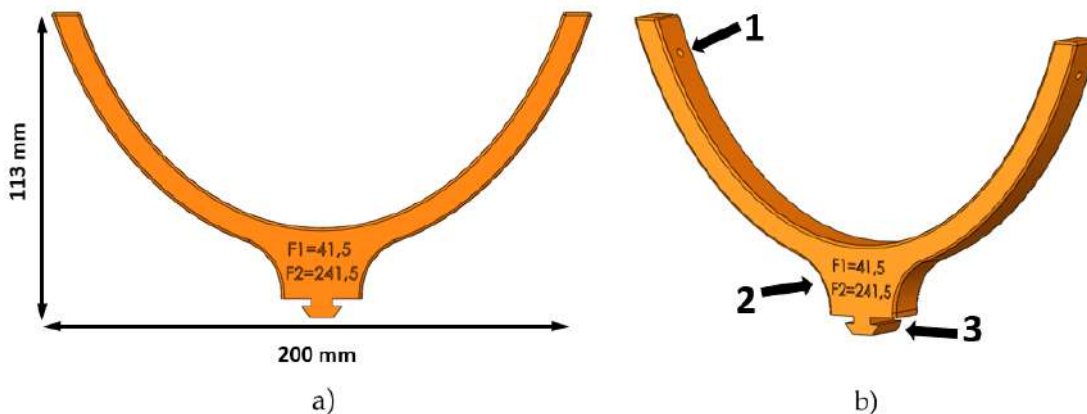


Figura 4.9: Modelo do suporte elíptico

a) cotas de atravancamento, b) pormenores do modelo: (1) furo que permite fazer a ligação do material refletor ao suporte elíptico, (2) referência do suporte elíptico e (3) saliência que permite a ligação ao perfil *bosh*

4.2.4 Estação de Ensaio vertical

Terminada a conceção das estruturas refletoras foi necessário criar numa nova estação de Ensaio.

O material colocado por cima das estruturas refletoras foi uma folha de mica, pois este é um material resistente a ciclos de elevadas temperaturas. A sua espessura é de 0,25 mm, pelo que, tendo em conta a ordem de grandeza, essa dimensão foi desprezável para a distância entre os focos e a superfície das estruturas refletoras.

Esta "folha" foi coberta com fita adesiva com verso em alumínio, com um adesivo acrílico sintético transparente. Este é um ótimo refletor de radiação térmica ideal para o objetivo definido.

Uma nova lâmpada de halogéneo de 1000 W de potência foi também usada, pois verificou-se que a anteriormente utilizada na estação de ensaios preliminar apresentava uma potência insuficiente para uma boa visualização dos defeitos.

Esta nova estação apresenta uma base de madeira de dimensões 39,5x46x1 cm onde foram abertos 4 furos de modo a realizar a ligação aparafusada da base de madeira com o perfil *bosh*. Para colocar a estrutura com a fonte e o provete, foram utilizados três varões de perfil *bosh* com 30x30 mm de secção transversal e 500 mm de comprimento. Um onde foram colocadas as estruturas refletoras, e dois com a função de suporte da lâmpada e da base dos provetes. O provete foi colocado sobre uma superfície de cartão semelhante ao que já tinha sido realizado na estação de ensaios preliminar. A estação de ensaios vertical é ilustrada na figura 4.10.

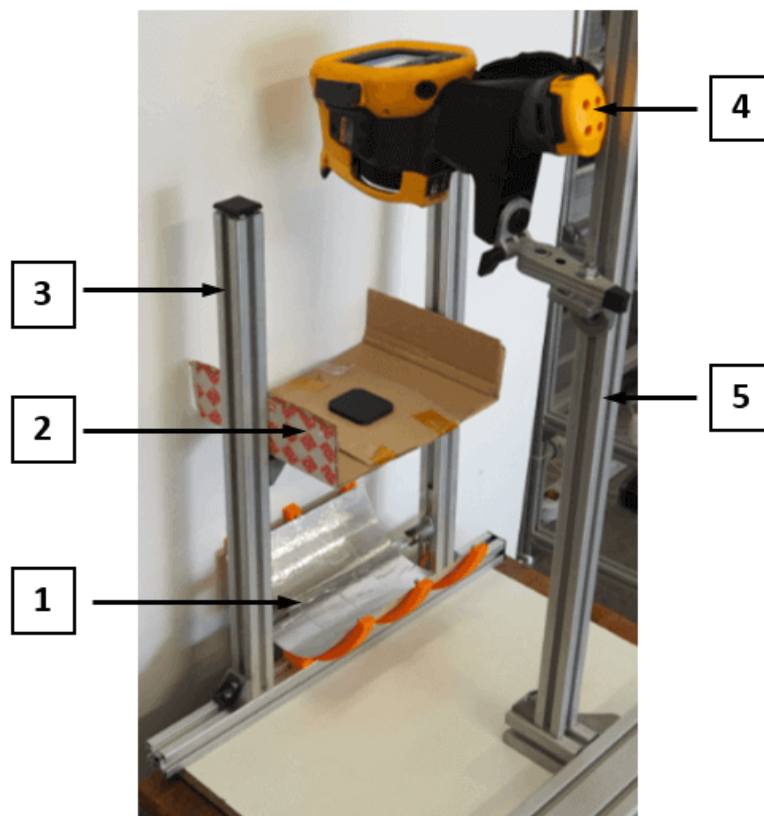


Figura 4.10: Estação de ensaios vertical

1) estrutura elíptica, 2) suporte e provete, 3) suporte para a fonte e os provetes, 4) câmara termográfica e 5) suporte para a câmara.

Através da utilização da referida estação de ensaios verificou-se que algumas condições dificultavam os ensaios e podiam ser melhoradas:

- o suporte para os provetes era muito instável;

- dificuldade na troca das estruturas parabólica e elíptica;
- dificuldade na alteração da distância da fonte ao provete;
- dificuldade de adaptar a esta estação o modo de reflexão.

4.2.5 Remodelação das estruturas refletoras

Tendo em conta as dificuldades referidas, foram produzidas novas estruturas refletoras que funcionam como unidades individuais e que podem ser facilmente trocadas. Verificou-se que a ligação entre os suportes refletores e o perfil *bosh* necessitava de ser reforçada, dado que, principalmente no caso da reflexão a posição destas teria de ser muitas vezes alterada e a referida ligação revelou-se frágil.

Na figura 4.11 a) é apresentada a numeração dos pormenores das novas estruturas refletores. Na mesma figura em b) é possível visualizar o suporte depois de impresso, onde estão destacados os pormenores referidos, com os números correspondentes ao modelo. As alterações no novo modelo do suporte elíptico são idênticos aos da parábola.

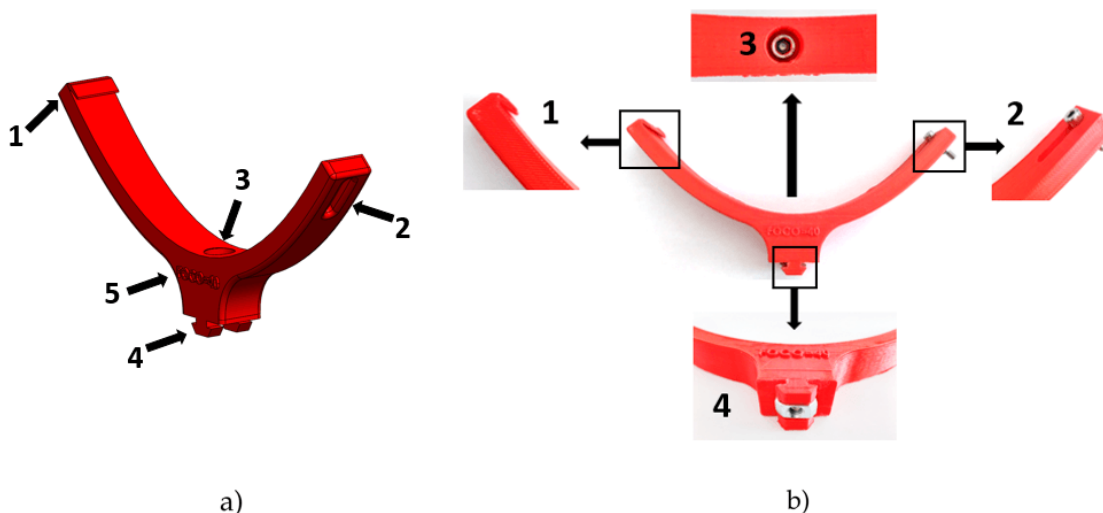


Figura 4.11: Novo suporte parabólico

a) pormenores do modelo ((1) saliência de modo a que a mica fique presa, (2) ajuste regulável para a outra extremidade da mica, (3) furo onde será colocado um parafuso M6, (4) saliência que serve de guia para o encaixe no perfil *bosh* com espaçamento para que o aperto seja possível), b) destaque dos pormenores do suporte parabólico.

4.2.6 Estruturas refletoras

Antes de serem construídas as novas estruturas refletoras foi criado um modelo de modo a facilitar a perceção das dimensões e das ligações que seriam necessárias efetuar. A dimensão da estrutura é limitada pelo comprimento, de 255 mm, da lâmpada de infravermelhos.

Este conjunto foi pensado para o caso de ser necessário mudar a lâmpada, e esta possua um comprimento diferente, pois toda a estrutura é facilmente adaptável devido à

ligação aparafusada de quase todos os componentes. Deste modo foi criada uma estrutura portátil e facilmente adaptável a qualquer posição. Na figura 4.12 é ilustrado o referido modelo com a numeração dos principais componentes, e na figura 4.13 são apresentados os produtos finais das estruturas refletoras.

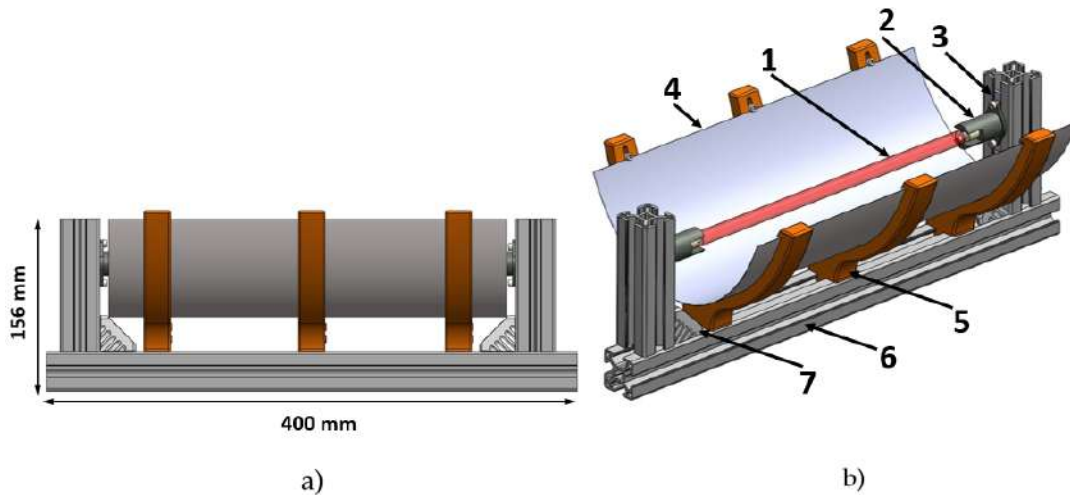


Figura 4.12: Modelo da estrutura elíptica

1) lâmpada de infravermelhos (1300 W), 2) casquilho da lâmpada, 3) chapa da ligação do casquilho ao perfil *bosh*, 4) "folha" refletora coberta por fita adesiva de alumínio, 5) suporte elíptico, 6) perfil *bosh* 30 × 30 mm, 7) esquadro para acoplamento entre os perfis *bosh*.

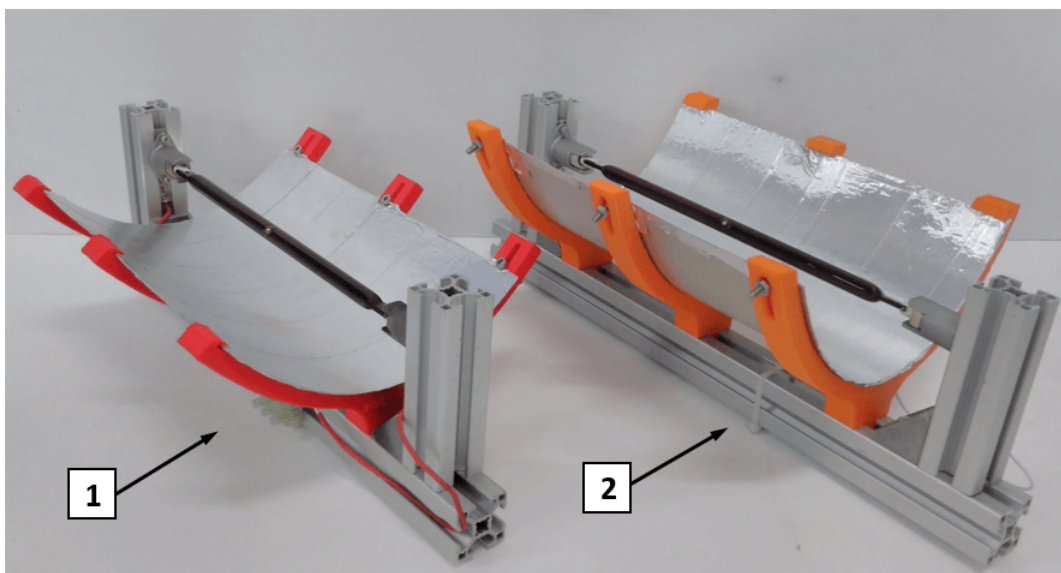


Figura 4.13: Estruturas refletoras

1) estrutura parabólica, 2) estrutura elíptica.

4.2.7 Estação de Ensaios Horizontal

Com o objetivo de conseguir ter: (i) um suporte mais estável e preciso para os provetes, (ii) uma maior facilidade na adaptação de qualquer uma das estruturas refletoras (iii) e diminuir a dificuldade em alterar a distância da fonte ao provete, foi construída uma nova estação de ensaios.

Esta estação apresenta uma disposição dos componentes de inspeção no plano horizontal, ao contrário das estações de ensaios anteriores, o que permite uma maior facilidade no ajuste da disposição dos componentes e maior segurança dos mesmos.

Na figura 4.14 é possível observar a montagem experimental utilizada durante os ensaios da termografia com a estação de ensaios horizontal.

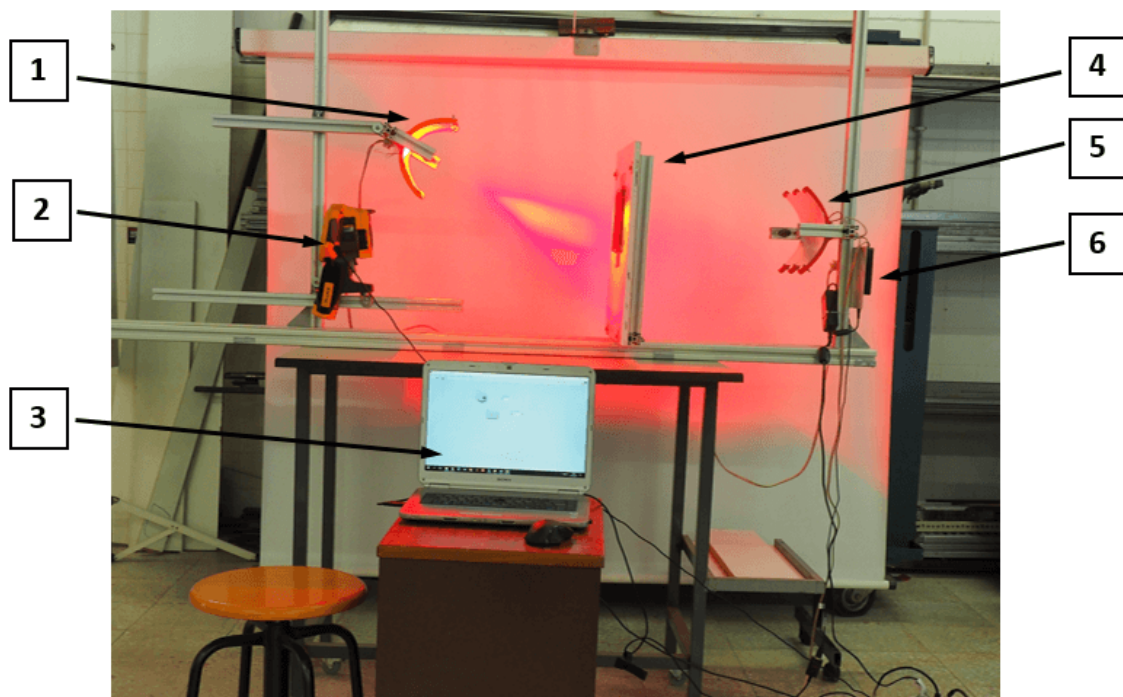


Figura 4.14: Montagem experimental da estação horizontal

1) estrutura elíptica, 2) câmara termográfica, 3) computador para controlo do *LabVIEW*, 4) suporte dos provetes, 5) estrutura parabólica, 6) componentes eletrônicos.

À nova estação de ensaios foi também incorporada uma componente eletrônica. O controlo do tempo em que a lâmpada estava ligada era efetuado manualmente através do ligar/desligar da ficha da tomada. Como este tempo é um parâmetro importante na análise dos ensaios, foi utilizado um temporizador através de um relé e uma placa da *National Instruments*.

Para o controlo computadorizado foi utilizado o *software LabVIEW 2015* da *National Instruments*. Neste programa são criadas duas janelas com os nomes de *Front Painel* e um *Block Diagram*. No *Front Painel* são criados os botões que são utilizados para realizar a tarefa. Por outro lado, no *Block Diagram* é criado todo o esquema de blocos programáveis para que os botões da primeira janela executem as funções desejadas pelo operador.

Na figura 4.16 a) é ilustrada a página de *Front Painel*. O número 1 faz referência ao botão *Start*, que é acionado para acender a lâmpada, depois de ser digitado o número de segundos em 2. O número 3 é o botão *Stop* que é acionado em caso de emergência, desligando instantaneamente a lâmpada.

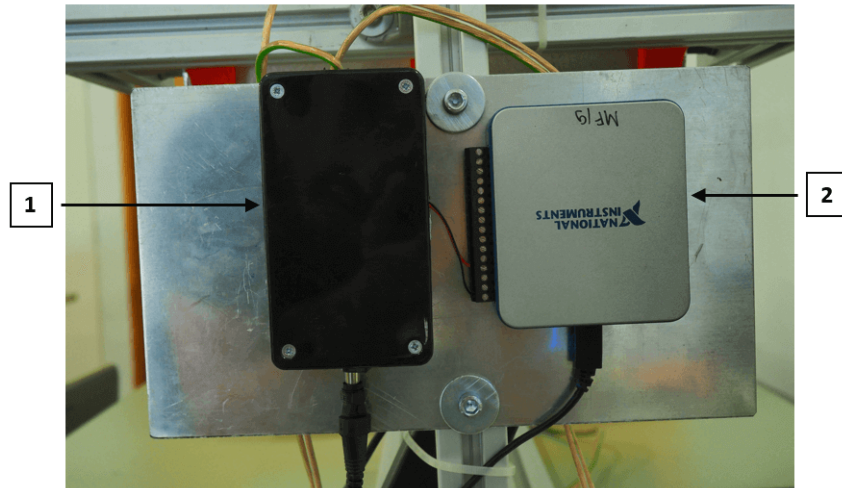


Figura 4.15: Componente eletrônico
1) compartimento que contém o relé, 2) placa da *National Instruments*.

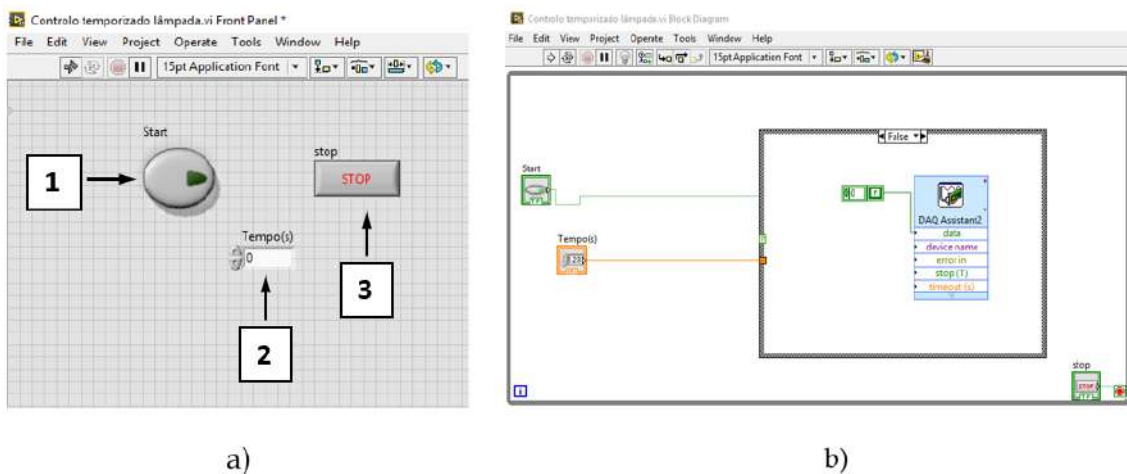


Figura 4.16: Programa desenvolvido no *LabVIEW*
a) página de *Front Painel*: 1) botão *Start*, 2) janela de escolha do tempo, 3) botão *Stop*, b) página de *Block Diagram*.

4.3 Equipamento para ensaios de Radiologia Digital

Para a inspeção dos provetes com vazios e com inclusão de material de reforço, foi utilizado um equipamento disponível no laboratório de caracterização de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT NOVA). Este equipamento é composto por uma unidade KODAK 2100 RX e um sistema de radiografia digital KODAK RVG 5100. A primeira unidade é um gerador de raio-x com uma tensão de tubo de 60 kV trabalhando a 7 mA com um colimador de 23×35 mm. A resolução espacial é de $18,5 \mu\text{m}$, a área do sensor ativa é de 22×30 mm e o tempo máximo de integração é de de 620 ms.

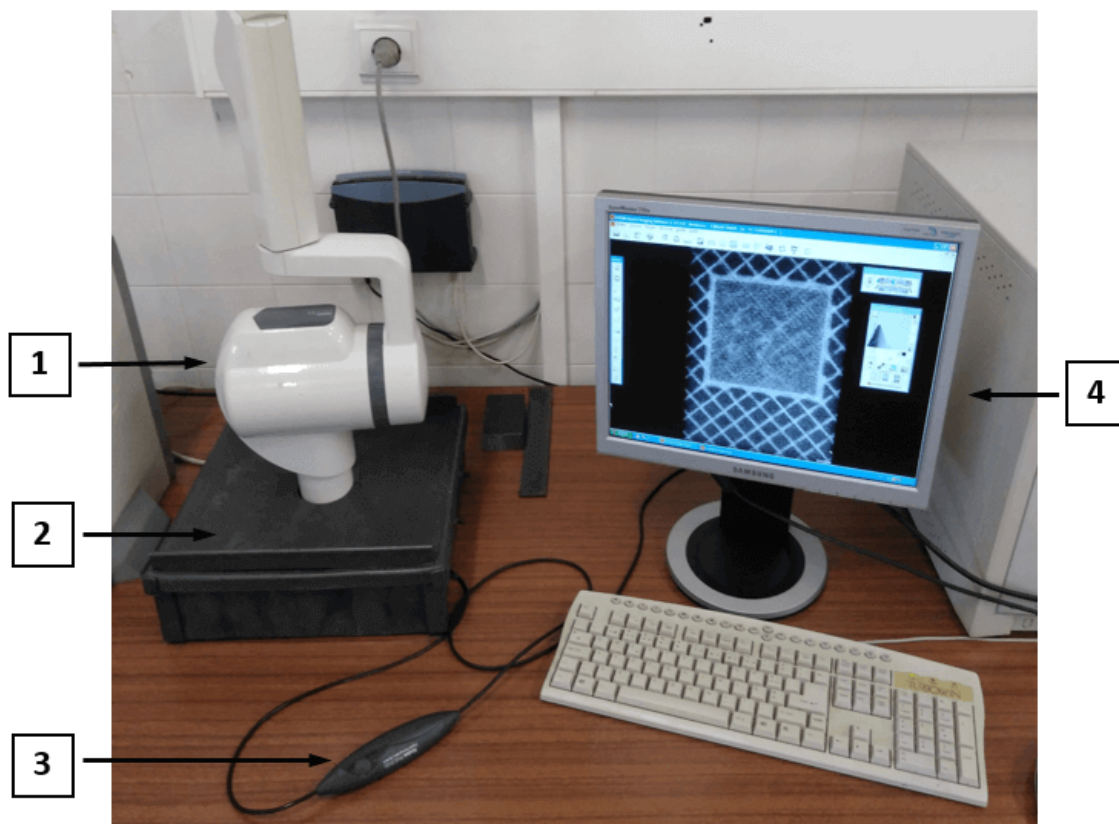


Figura 4.17: Equipamento de raio-x

1) KODAK 2100 RX, 2) caixa de chumbo, 3) KODAK RVG 5100, 4) computador para observação e tratamento das imagens radiográficas.

4.4 Equipamento para ensaios de Ultra-Sons

O equipamento de medição usado no método de inspeção por ultra-sons foi o *Krautkramer USM 36* comercializado pela *General Electric*® [25]. Este permite ler o tempo [s] ou o espaço percorrido [mm] das ondas sonoras em função do ganho [dB] ajustado pelo utilizador.

Como acoplante no caso da inspeção por contacto foi utilizada vaselina sólida, enquanto que na inspeção por imersão o acoplante é a água. Na figura 4.18 é ilustrada a montagem experimental na inspeção dos provetes com as sondas de contacto. Esta técnica foi utilizada para determinar a velocidade do som e coeficiente de atenuação acústico em diferentes provetes.

Para inspeção dos provetes foram utilizadas três sondas comerciais (*Olympus*®) de diferentes frequências. Duas sondas de contacto com 2 e 4 MHz e uma sonda de imersão com 10 MHz. (figura 4.19).

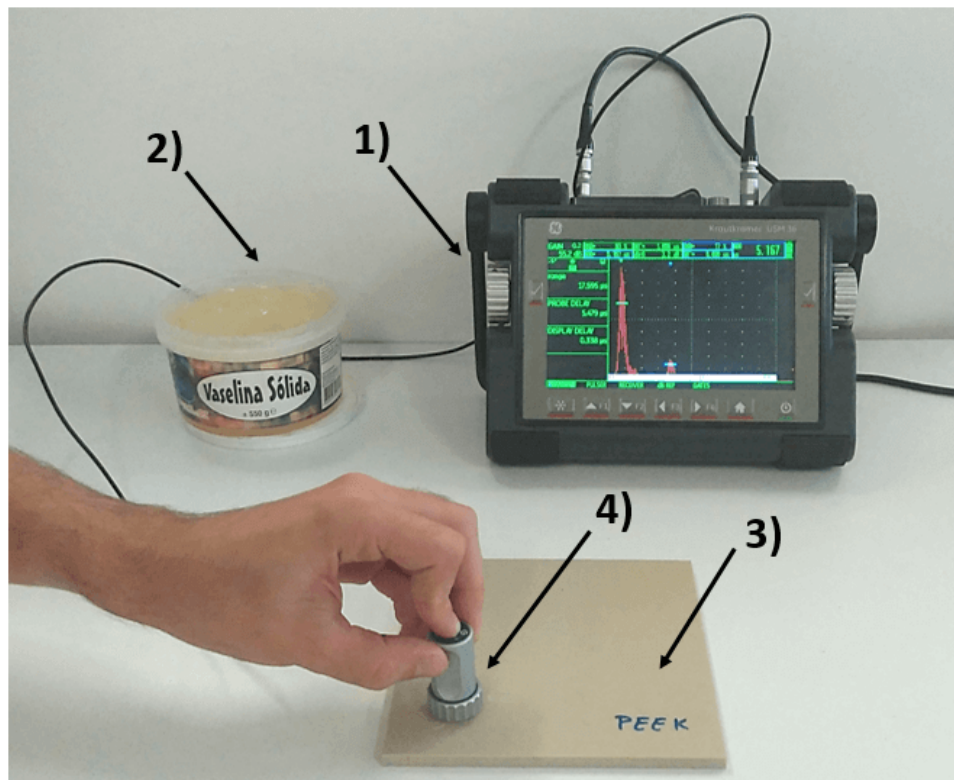


Figura 4.18: Conjunto do equipamento para medição de espessuras e coeficiente de atenuação acústica
1) equipamento de ultra-sons (*Krautkramer USM 36*), 2) acoplante(vaselina sólida), 3) provete de PEEK, 4) Sonda de 4 MHz.

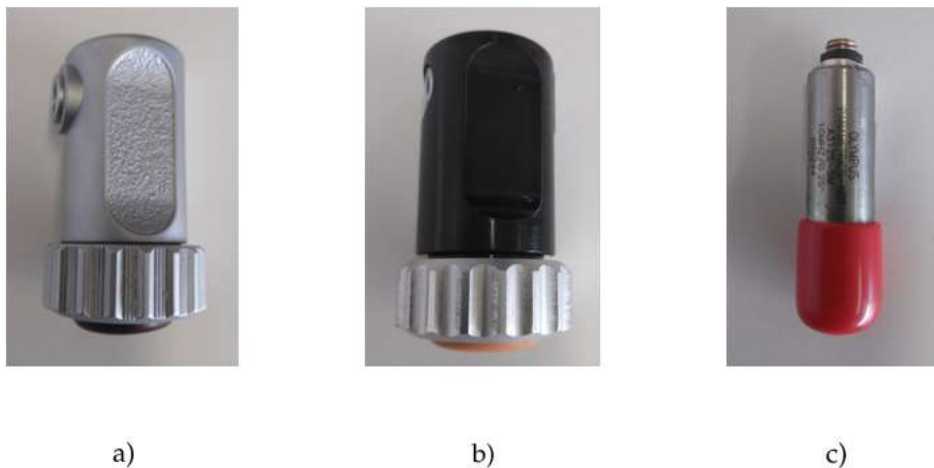


Figura 4.19: Sonda utilizadas no método de ultra-sons

a) sonda de contacto 4 MHz, b) sonda de contacto 2 MHz c) sonda de imersão 10 MHz.

Para a técnica de ultra-sons por imersão foi utilizada uma mesa xy desenvolvida pelo NOVA NDT Lab., que permite efetuar um varrimento ao longo da área do provete a inspecionar. Esta mesa possui um curso útil de 100×100 mm e uma resolução espacial máxima de $0,43 \mu\text{m}$.

Foi necessário criar um suporte para fixar as sondas à mesa, de modo a garantir que esta esteja sempre na mesma posição ao longo do ensaio. Este suporte foi produzido através de impressão 3D a partir do modelo de *SolidWorks*® ilustrado na figura 4.20. Na figura 4.21 é apresentada a montagem experimental durante os ensaios de ultra sons por imersão.

O movimento da mesa e a aquisição de dados xy é realizada através de um programa criado no *software LabVIEW*. Os dados são adquiridos com recurso ao referido equipamento de ultra-sons, onde a amplitude foi designada como valor de *output* e lida através da ligação a uma placa DAQ-6008 da *National Instruments*® [26]. Após aquisição dos dados estes são processados pelo *software LabVIEW*, que os analisa, apresenta e armazena.

Este *software* permite a automação do equipamento, proporcionando a criação de uma interface onde estão localizados os controlos para iteração com o equipamento e a definição dos parâmetros para cada ensaio (figura 4.22). Deste modo, é possível controlar a área a inspecionar e a resolução do deslocamento e posição da sonda.

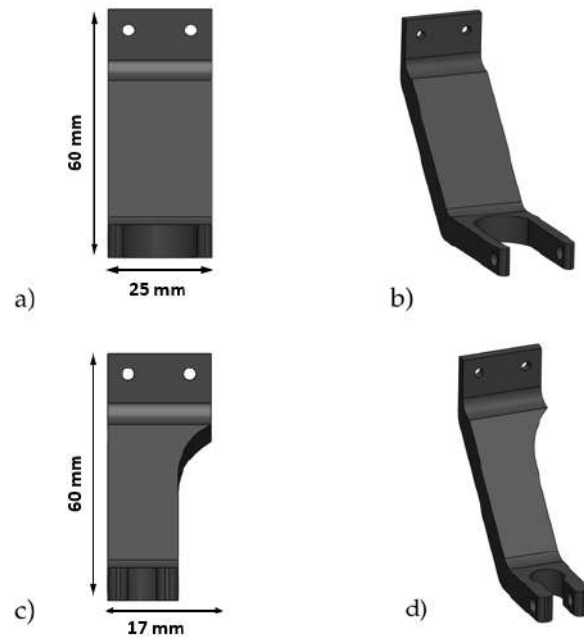


Figura 4.20: Suportes para sonda de ultra-sons
 a) cotas de atravancamento do suporte para as sondas de 2 e 4 MHz, b) suporte para as sondas de 2 e 4 MHz, c) cotas de atravancamento do suporte para a sonda de 10 MHz, d) suporte para a sonda de 10 MHz).

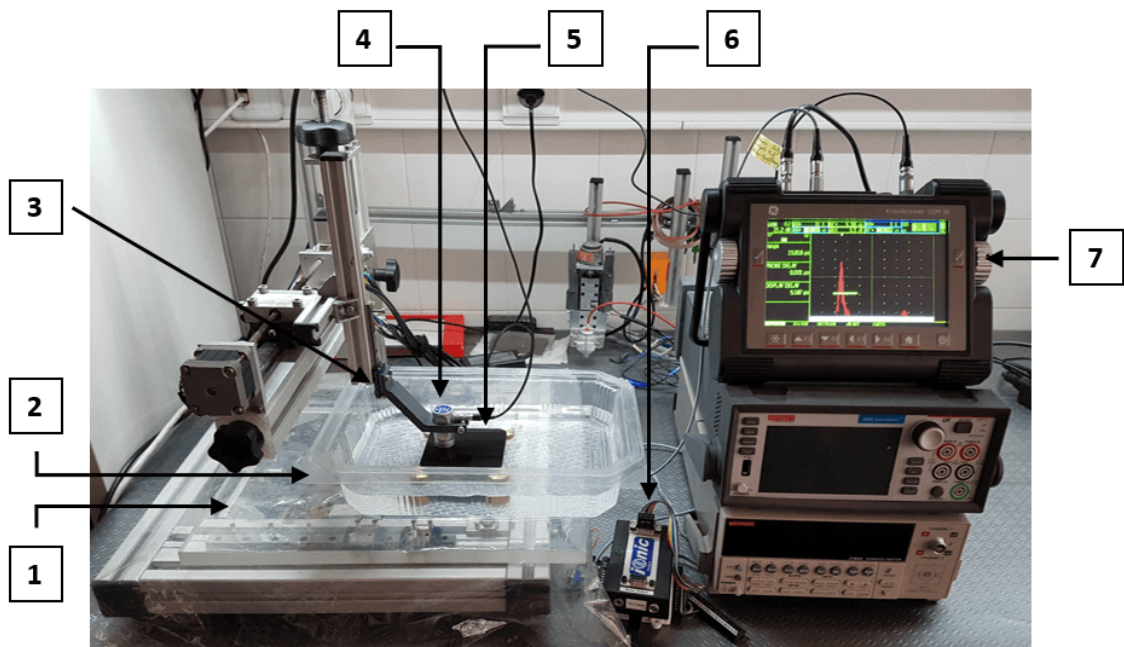


Figura 4.21: Montagem experimental dos ensaios de ultra-sons
 1) mesa xy, 2) recipiente com água para colocação do provete e sonda, 3) suporte para a sonda, 4) sonda de 4 MHz, 5) provete, 6) placa DAQ-6008 da *National Instruments* e 7) equipamento ultra-sons (*Krautkramer USM 36*).

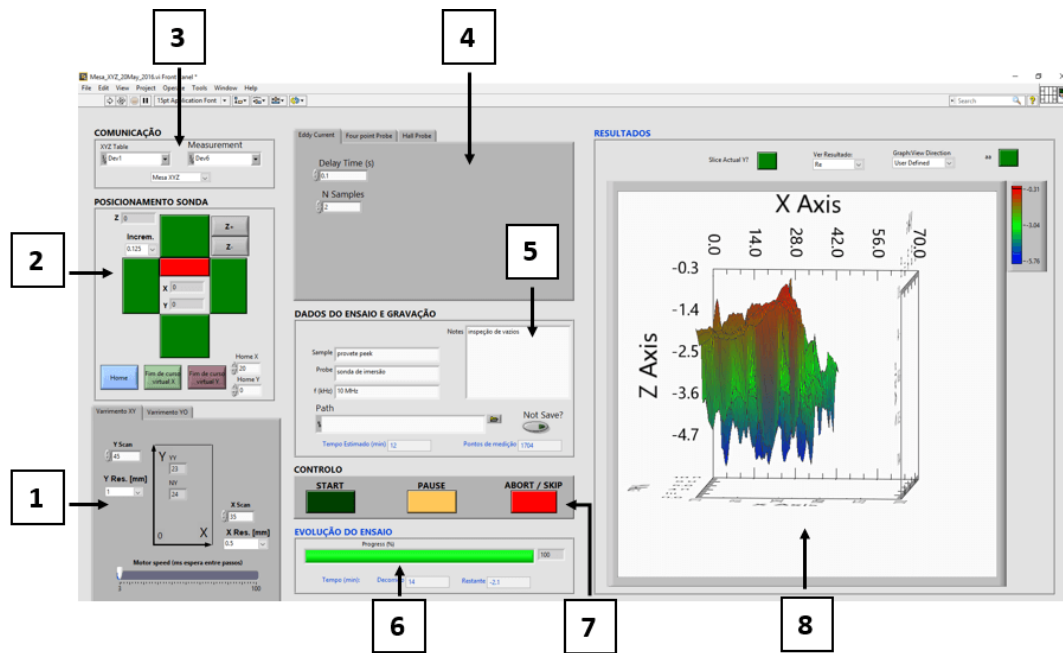


Figura 4.22: Interface gráfica em *LabVIEW* para movimento da mesa xy e da visualização de resultados

1) *scanner*, 2) posicionamento da sonda, 3) área de inspeção e resolução, 4) equipamento de medição a utilizar, 5) dados do ensaio e de gravação, 6) controlo do ensaio, 7) evolução do ensaio e 8) resultados do ensaio.

4.5 Equipamento para ensaios de Correntes Induzidas e Simulação

4.5.1 Modelos das sondas

Com o objetivo de detetar os materiais inseridos nos provetes 6 e 7 foram desenvolvidas diversas sondas.

Pretendeu-se testar duas sondas em *Bridge* de dupla função. O modo de dupla função caracteriza-se pela existência de uma bobina que simultaneamente introduz as correntes induzidas no material e deteta as alterações na circulação das correntes induzidas.

Foram produzidos os modelos de dois suportes de sondas, uma onde serão introduzidas duas bobinas de 550 espiras e a outra duas bobinas de 20 espiras. Os dois valores do número de espiras são valores extremos para se perceber qual a influência deste parâmetro. Ambas as bobinas possuem núcleo de ferrite de 8 mm de diâmetro, sendo o comprimento de fio enrolado (0,2 mm de diâmetro) de 28 mm e 9 mm nas sondas com 550 espiras e 20 espiras respetivamente.

Na figura 4.23 estão ilustrados os dois modelos onde são identificadas quatro zonas. O número 1 é o apoio para o conector do cabo lemo que irá ligar ao equipamento de correntes induzidas. O número 4 é a superfície que permite a ligação aparafusada à mesa xy. Por sua vez o número 2 e 3 são os suportes das bobinas de indução no provete e de comparação respetivamente.

Com o objetivo de se conseguir obter um campo de magnético mais "afunilado", de modo que a zona afetada seja mais próxima da espessura do fio, foi produzido outro modelo de sonda. Esta sonda apresenta três bobinas, uma sensível e duas de excitação. Este tipo de sondas de emissão-receção caracteriza-se pela existência de uma bobina para introduzir as correntes induzidas no material e outra para detetar alterações na circulação das correntes induzidas.

Na figura 4.24 está ilustrado o modelo criado em *SolidWorks®*. A numeração em b) da referida figura indica a zona onde será enrolado o fio de cobre (0.2 mm de diâmetro). A zona 1 e 3 serão bobinas de excitação e a zona 2 será uma bobina sensível. Todas as bobinas apresentam 80 espiras.

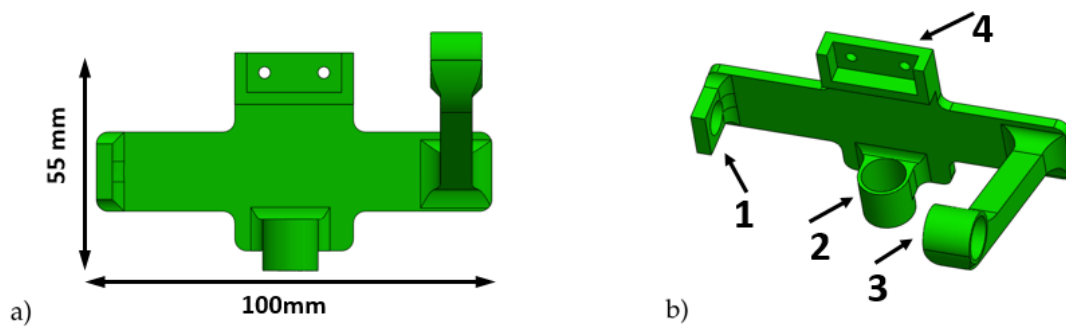


Figura 4.23: Modelo das sondas em *Bridge*
 1) apoio do conector do cabo lemo, 2) suporte da bobina de indução, 3) suporte da bobina de comparação, 4) superfície para ligação à mesa xy.

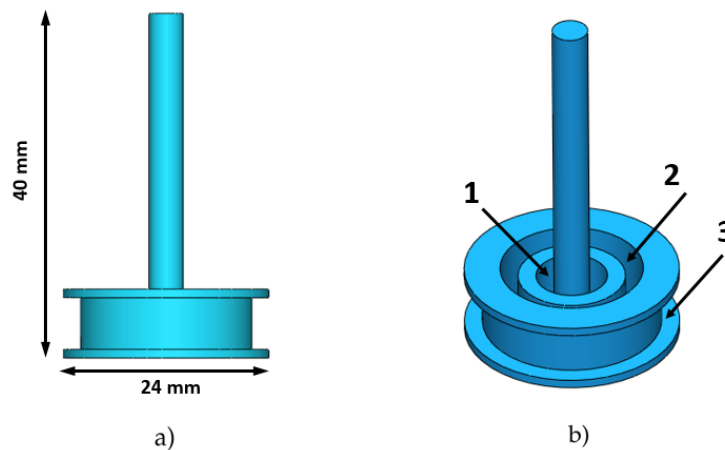


Figura 4.24: Modelo da sonda emissão-recepção
 a) cotas de atravancamento, b) localização das sondas.

4.5.2 Simulação

De forma a perceber se a sonda de emissão-recepção conseguia produzir um campo magnético que abrangesse o fio de NiTi com um valor considerável, foi realizado um trabalho preliminar na área da simulação. Para tal efeito foi usado o programa *Ansys* [27].

O primeiro passo foi o de criar um modelo (figura 4.25 a)) que representasse 3 bobinas, onde a bobina do meio funcionasse como sensível e as outras duas como de excitação. Na figura 4.25 b) é ilustrada a malha de elementos nas bobinas e no fio. Esta malha é formada por 350000 elementos em forma de tetraedros.

Foram simuladas duas frequências, (100 KHz e 1 MHz), de modo a perceber qual a influência deste parâmetro no alcance e intensidade do campo magnético. Verificou-se que a diferença na intensidade do campo magnético é insignificante, pelo que se conclui que para uma distância entre a sonda e o fio superior a 2 mm não seria possível detetar o NiTi com nenhuma destas frequências.

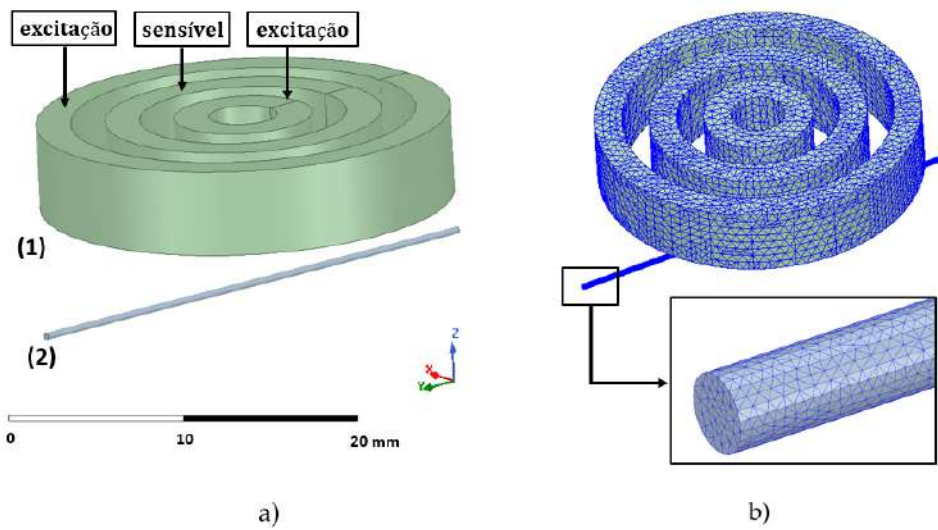


Figura 4.25: Modelo e respetiva malha para simulação
 a) modelo de simulação da sonda(1) e fio(2), b) representação da malha de elementos.

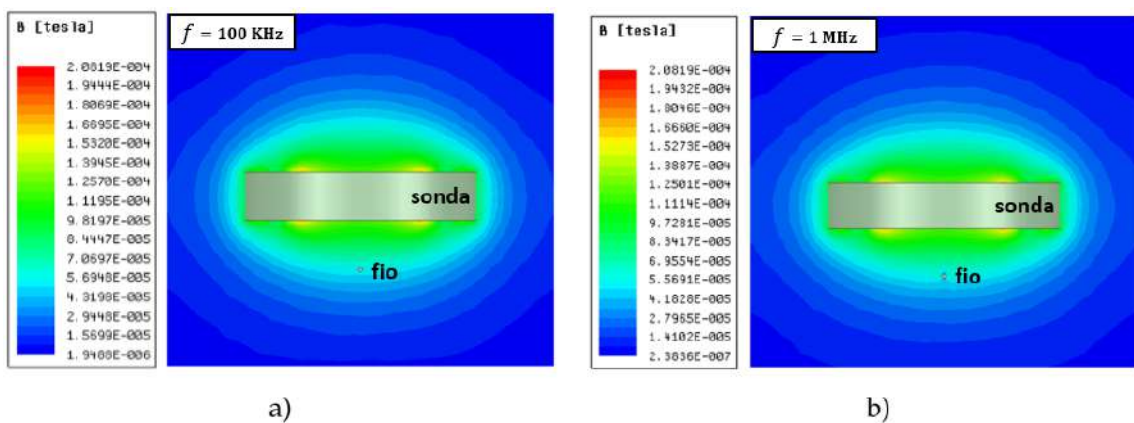


Figura 4.26: Resultados do campo magnético
 a) resultados com frequência de 100 KHz, b) resultados com frequência de 1 MHz.

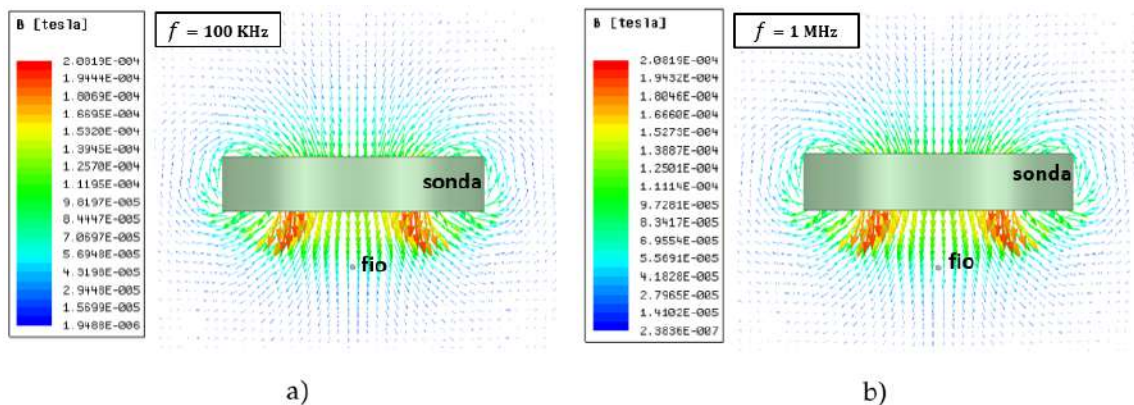


Figura 4.27: Resultados do campo magnético vectorial
 a) resultados com frequência de 100 KHz, b) resultados com frequência de 1 MHz.

4.5.3 Produção das sondas e desenvolvimento laboratorial

Para enrolar o fio de cobre ao longo das ferrites (sondas em *Bridge*) e no suporte da sonda com núcleo de ar (sonda emissão-receção) foi utilizado um equipamento desenvolvido no NOVA NDT Lab. Este equipamento permite a produção de sondas de uma forma rápida, autónoma e com elevada eficiência.

O enrolador de bobinas é constituído por uma estrutura de perfil *Bosh* onde está fixado um motor passo a passo que permite a rotação do suporte das bobinas. A velocidade e direção de rotação do suporte são controlados através de um sistema de pedais. O enrolamento é então possível através da rotação angular do suporte que está acoplado ao motor, e do movimento axial que permite a tração do fio, controlado manualmente pelo utilizador.

Para controlo do enrolador de bobinas foi novamente utilizado o *software LabVIEW* utilizando uma DAC-6008 da *National Instruments*. O programa utilizado permite controlar a velocidade do motor e a sua direção de rotação.

Na figura 4.29 é apresentada a imagem da interface gráfica do programa bem como as diferentes janelas. Na janela número 1 é indicado o número total de enrolamentos e o número de enrolamentos efetuados. Em 2 é demonstrada a percentagem da velocidade que o utilizador está a utilizar. Essa velocidade é controlada pelos pedais 1 e 2 dependendo do sentido de rotação desejado, indicado em 3. Na janela 4 é selecionado o driver e a 5 serve de botão de emergência para parar o enrolamento. Por fim, o progresso do ensaio é apresentado na janela 6.

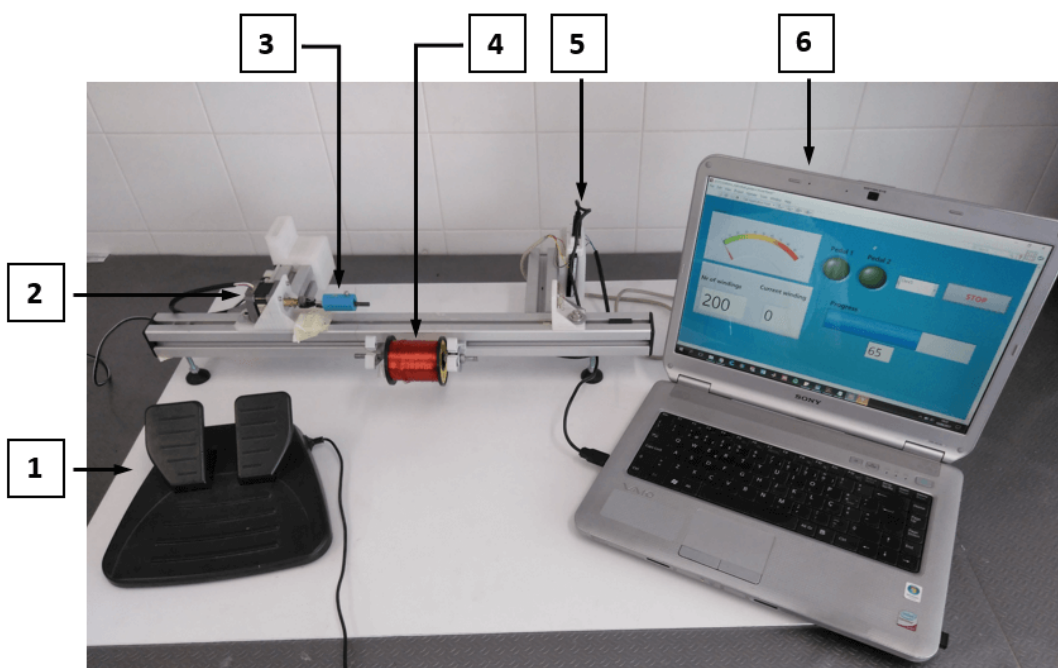


Figura 4.28: Montagem experimental para enrolamento das bobinas.

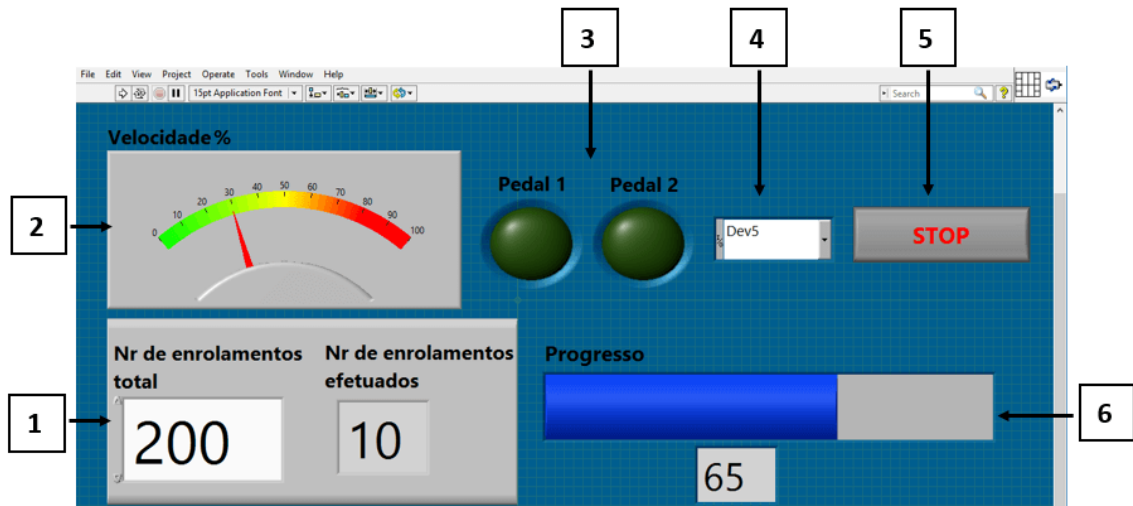


Figura 4.29: Interface do programa LabVIEW.

Após o enrolamento das bobinas foram realizadas as ligações soldadas dos fios de cobre aos conectores dos cabos LEMO. Na figura 4.30 são apresentadas as três sondas produzidas.

Os ensaios de correntes induzidas foram realizados na mesa xy referida no subcapítulo 4.4, recorrendo ao uso do equipamento *Nortec 500C* da *Olympus* [28]. Este equipamento permite a leitura da impedância das sondas capaz de funcionar numa gama de frequências entre os 50 Hz e os 12 MHz. O ganho é ajustável até aos 90 dB com incrementos de 0,1 dB e ângulo variável de 1° em 1° .

A recolha dos dados, análise e armazenamento é obtida através do uso do mesmo programa em *LabVIEW* ilustrado na figura 4.22.

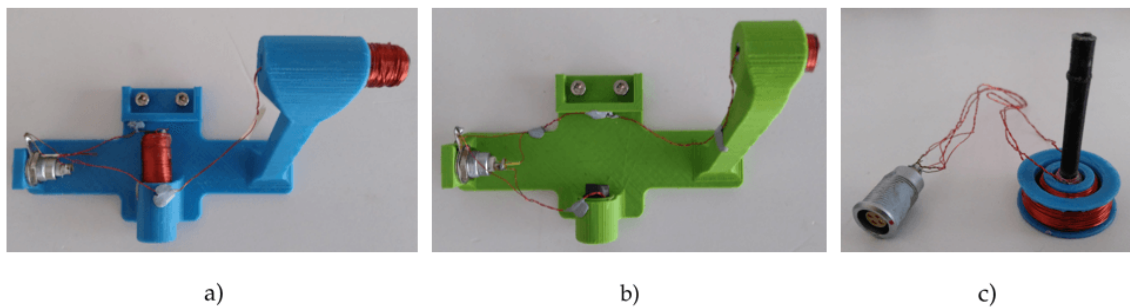


Figura 4.30: Sondas de correntes induzidas
a) sonda 550 espiras, b) sonda 20 espiras, c) sonda de emissão-recepção.

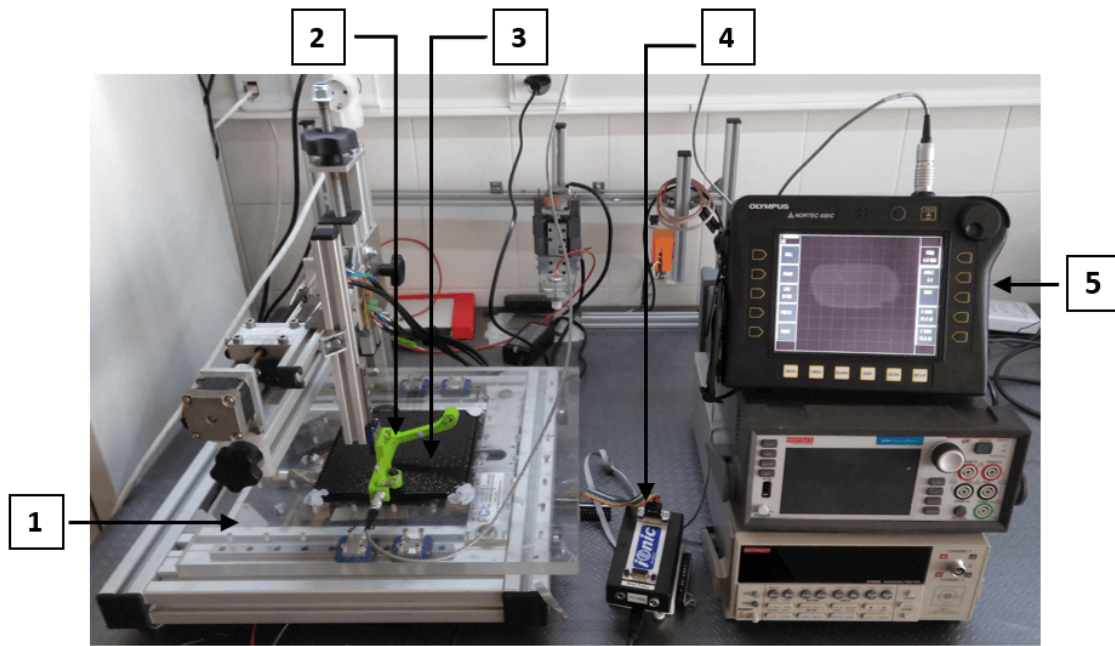


Figura 4.31: Montagem experimental dos ensaios de correntes induzidas
1) mesa xy, 2) sonda de 20 espiras, 3) provete a inspecionar, 4) placa DAQ-6008 da *National Instruments*, 5) Nortec 500C da *Olympus* .

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente através das diferentes técnicas descritas anteriormente. Serão também apresentados todos os parâmetros utilizados durante os ensaios.

Na termografia serão apresentadas as imagens obtidas com a estação de ensaios preliminar e com a estação de ensaios horizontal, onde nesta última será realizada uma descrição exhaustiva dos parâmetros utilizados e dos fenómenos resultantes deste método.

No raio-x foram realizados ensaios para o provete 6 e 7, nos quais foram inseridos diversos fios e amostras de fibra de carbono respetivamente. Foram também inspecionados os provetes de diferentes polímeros (PLA, ABS e Nylon) e o provete 3 que contém defeitos com várias formas e dimensões.

Com o método de US, foram utilizadas sondas de contacto para testar o rigor do equipamento na medição da velocidade e coeficiente de atenuação de diferentes materiais (PEEK, aço 316-L, alumínio e cobre). Posteriormente foi desenvolvida a técnica de US por imersão de modo a perceber se era possível a deteção dos vazios nos provetes impressos. Foram inspecionados os provetes dos vários polímeros e a placa de PEEK.

Na inspeção por correntes induzidas, foram testadas as três sondas produzidas para deteção dos arames de Ferro, NiTi e Cobre. Foi também realizada uma inspeção ao longo das amostras de carbono inseridas no provete 7.

5.2 Resultados da Termografia

5.2.1 Ensaios com a estação preliminar

Numa fase inicial, tal como já foi referido no capítulo anterior, foi utilizada uma estação preliminar onde foram realizados ensaios aos provetes com vazios. A emissividade utilizada na câmara termográfica foi de 0.9, uma vez que este é o valor da maioria dos polímeros. Como fonte de calor foi utilizada uma lâmpada de halogéneo de 400 W.

Durante os ensaios termográficos foram testados quatro parâmetros que influenciam os resultados. São eles:

- A distância entre a câmara termográfica e o provete (d_{CP});
- A distância entre a fonte de calor e o provete (d_{FP});
- O tempo de excitação do provete (t_E);
- O tempo de aquisição da melhor imagem térmica (t_A).

Na figura 5.1 é apresentado um esquema onde são identificadas os referidos parâmetros.

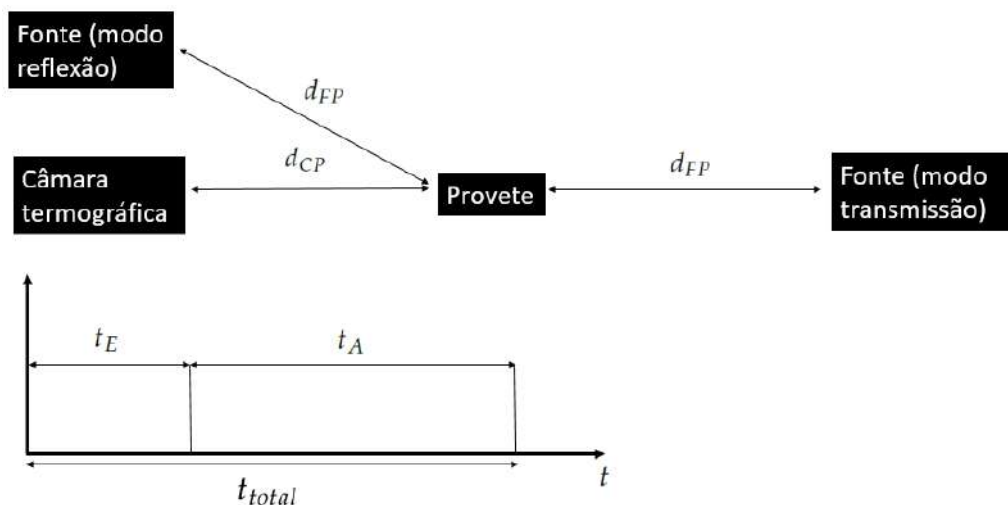


Figura 5.1: Esquema dos parâmetros dos ensaios termográficos.

No caso da estação preliminar a distância da câmara ao provete foi de 34 cm e a distância da fonte de calor ao provete foi de 7 cm.

Para edição das imagens foi utilizado o programa da *Fluke, SmartView 4.1*. Neste programa é possível fazer uma alteração das cores e da saturação da imagem o que por vezes permite aumentar a qualidade da visualização dos defeitos de forma muito considerável. Seguidamente nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, são apresentados os resultados obtidos na inspeção dos provetes 1, 2 e 3, em que para cada provete são apresentadas as duas melhores imagens editadas no programa.

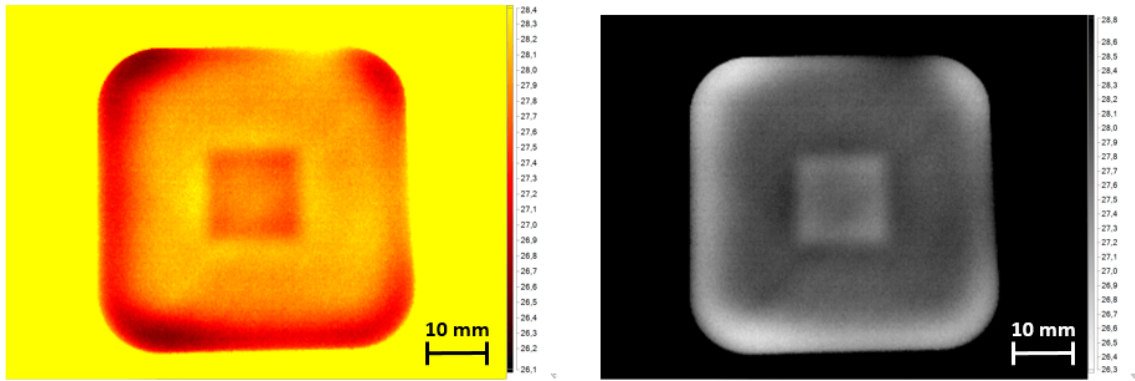


Figura 5.2: Resultados dos ensaios no provete 1 - $d_{CP} = 34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg.

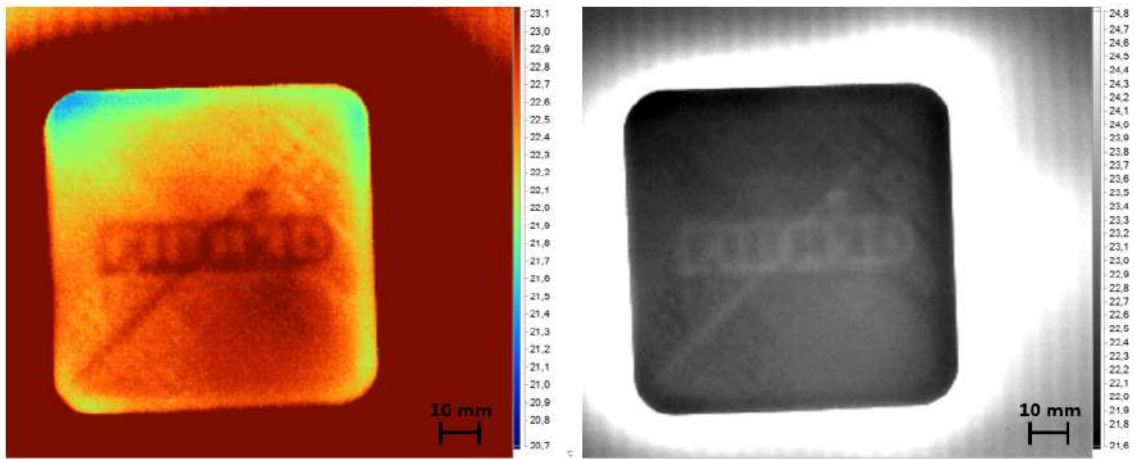


Figura 5.3: Resultados dos ensaios no provete 2 - $d_{CP}=34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg.

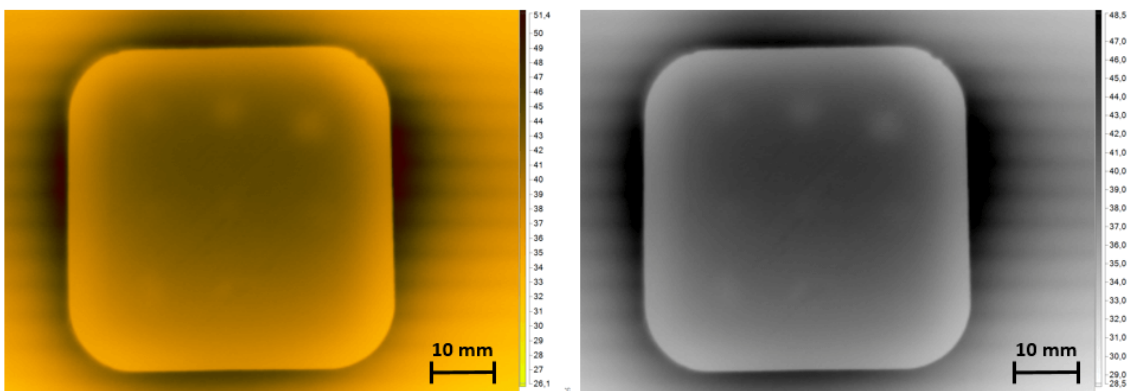


Figura 5.4: Resultados dos ensaios no provete 3 - $d_{CP}=34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=15$ seg, $t_A=20$ seg.

Como é possível verificar os resultados da visualização dos vazios são muito positivos nos provetes 1 e 2, já no provete 3 alguns vazios não são visíveis e a forma de alguns também não aparece completamente definida, onde todos parecem ter uma forma circular.

Outra vertente da termografia pode ser a reflexão em vez da transmissão, em que a aplicação da fonte de calor e a visualização do mesmo são ambos realizados na mesma face do provete. Foi então necessário comparar os dois métodos, para tal utilizou-se o secador térmico apresentado na figura 5.5.

Seguidamente nas figuras 5.6, 5.6 e 5.8, são apresentados os resultados da inspeção com o secador térmico, para os mesmos provetes inspecionados anteriormente pela variante de transmissão.



Figura 5.5: Secador térmico utilizado no método da termografia por reflexão.

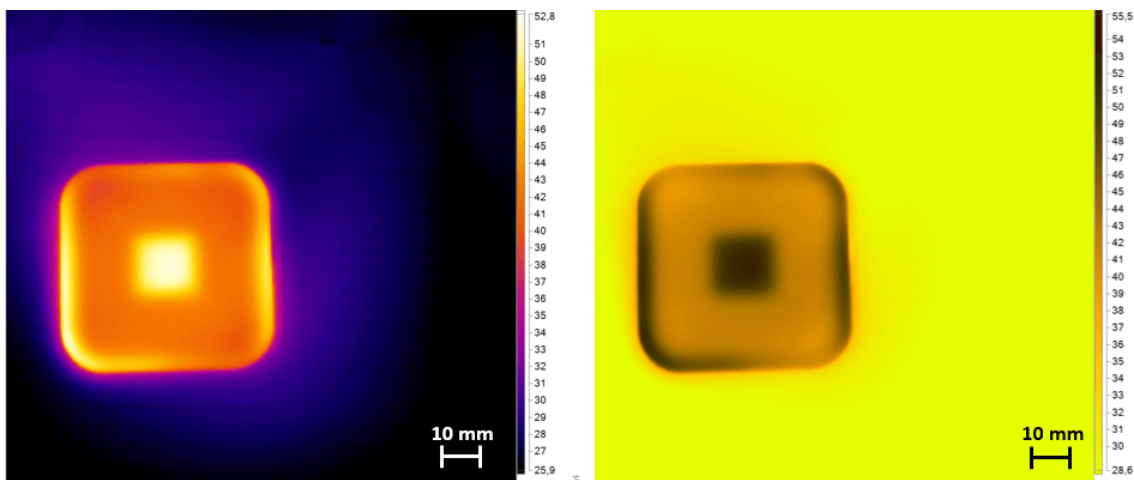


Figura 5.6: Resultados do ensaio do provete 1 com secador - $d_{CP}=34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg.

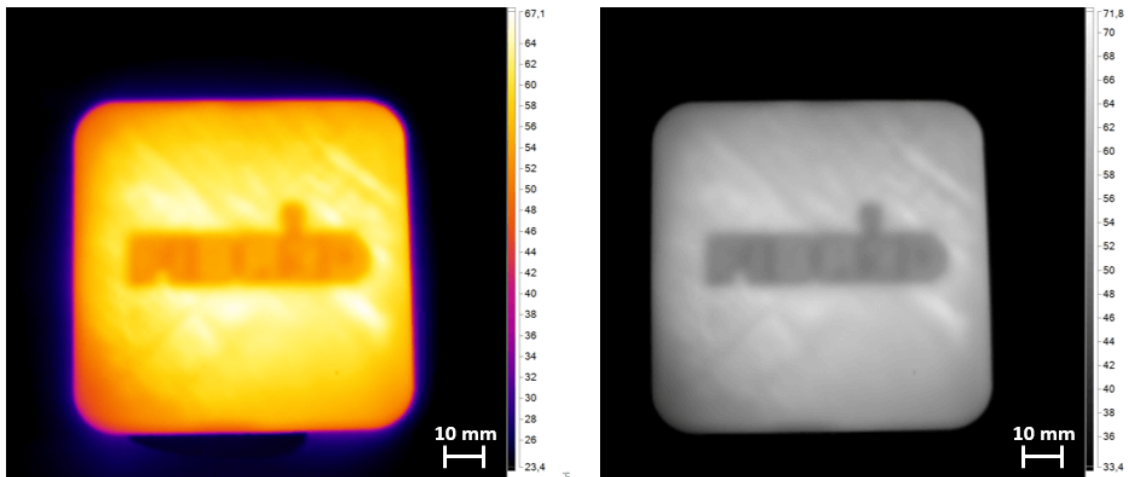


Figura 5.7: Resultados do ensaio do provete 2 com secador - $d_{CP}=34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg.

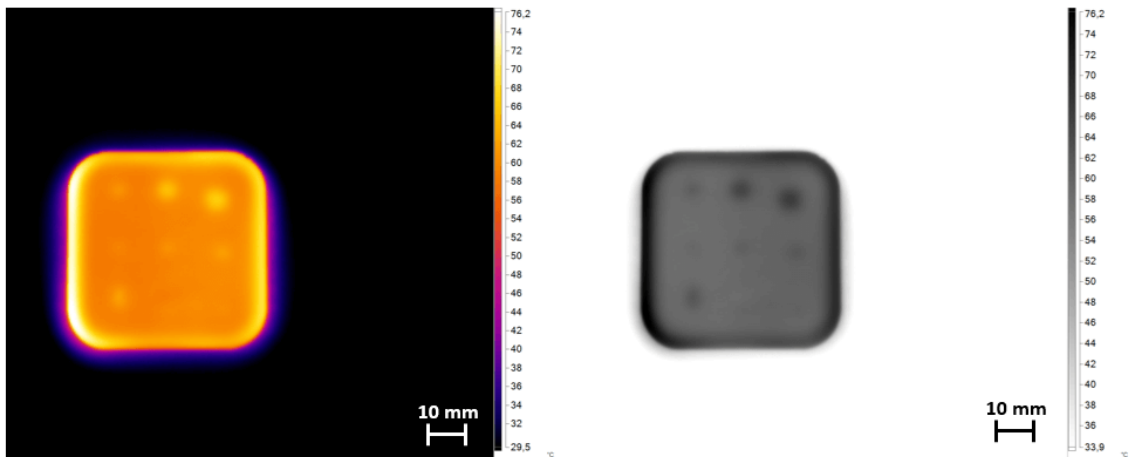


Figura 5.8: Resultados do ensaio do provete 3 com secador - $d_{CP}=34$ cm, $d_{FP}=7$ cm, $t_E=10$ seg, $t_A = 15$ seg.

5.2.2 Ensaios na estação horizontal

Como foi referido no capítulo anterior, foi projetada e montada uma nova estação de ensaios onde foram realizados diferentes ensaios onde se estudou a influência de diferentes parâmetros tais como:

- Influência do tempo de excitação térmica;
- Comparação entre a estrutura parabólica e elíptica;
- Comparação entre o método de transmissão e reflexão;
- Análise do limiar da detetabilidade através da termografia;
- Comparação entre os diferentes materiais;

- Análise da influência da curvatura por comparação entre os provetes 4 e 5;
- Análise dos arames inseridos no provete 6;
- Análise das amostras de fibra de carbono do provete 7;
- Análise das delaminações do provete 8.

Depois da inspeção preliminar com a estação de ensaios preliminar, foram impressos 3 novos provetes com os mesmos defeitos que o provete 1, 2 e 3, somente com a diferença de que o comprimento e largura foram alterados para o valor de 150x150 mm. Com esta alteração pretendeu-se que a dispersão de calor fosse mais uniforme ao longo do provete.

As imagens termográficas apresentadas nas figuras referentes à estação de ensaios horizontal, foram obtidas através da edição de vídeos. Deste modo, todos os ensaios foram gravados para que assim fosse possível escolher o melhor *frame* a analisar.

Com a estação de ensaios utilizada a temperatura do provete depende do tempo de excitação térmica e da distância da fonte ao provete. Foi necessário ter em conta que de acordo com os fornecedores do filamento de PLA, este entra no estado viscoso a partir dos 60 °C. Experimentalmente e de forma iterativa, verificou-se que as temperaturas ótimas de inspeção no caso da transmissão variam entre os 26 – 30 °C, já no caso da reflexão variam entre os 28 – 53 °C.

• **Influência do tempo de excitação térmica:**

Foram realizados dois ensaios, para o provete 1, de modo perceber qual a influência que o tempo de excitação tem no tempo da visualização ótima dos provetes. Ambos os ensaios foram realizados por transmissão com a estrutura elíptica.

No primeiro ensaio o tempo de excitação térmica foi de 10 segundos, enquanto que no segundo foi de 20 segundos. Verificou-se que o tempo ótimo para visualizar o defeito foi logo após o final da excitação térmica. Deste modo, a imagem a) da figura 5.9 foi gravada passados 10 segundos do 1º ensaio e em b) foram passados 20 segundos do 2º ensaio. De realçar que estas imagens permanecem quase iguais por aproximadamente mais 10 segundos, posteriormente o contraste térmico não é tão evidente, ou seja, o vazio começa a ficar cada vez menos definido até deixar de ser visível.

Verificou-se que em média todos os vazios observáveis apareceram até 10 segundos depois de finalizada a excitação térmica.

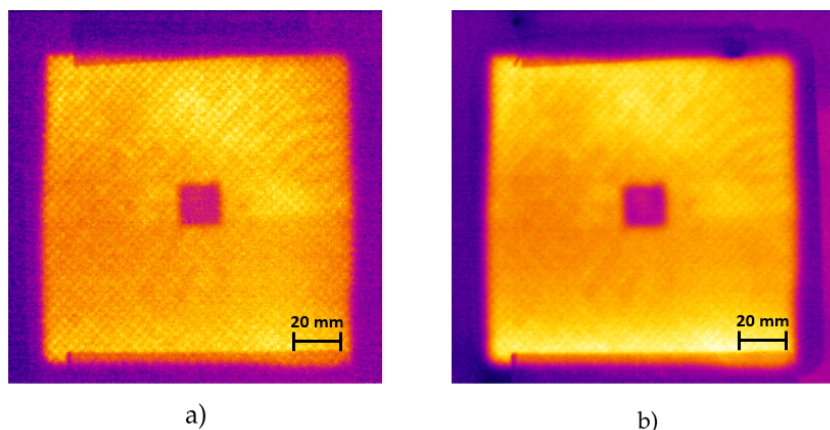


Figura 5.9: Imagens dos ensaios do provete 1
 a) com 10 segundos - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) com 20 segundos - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=20$ seg.

• **Comparação entre a estrutura parabólica e elíptica:**

Outro teste importante foi o de verificar as diferenças no caso da fonte de calor ser com a estrutura elíptica ou parabólica. Foi realizado um ensaio novamente ao provete 1, onde se verificou que com a utilização da parábola está sempre associado um fenómeno de redução da intensidade luminosa na direção da lâmpada, pois a radiação refletida pela parábola atrás da lâmpada acaba por embater nesta e assim provocar um efeito de sombra como o que vemos representado em b) identificado pelo número 1 da figura 5.10.

Com a utilização da elipse verificou-se também este fenómeno, mas como a área de incidência da radiação neste caso depende da distância da fonte ao provete, esta foi ajustada até se uniformizar ao máximo este efeito. Com 480 mm obteve-se uma imagem mais uniforme, onde o efeito de sombra era invisível, tal como é apresentado na figura 5.10 a). Na figura 5.11, é possível verificar a zona de foco mais intenso da radiação com a utilização da estrutura elíptica.

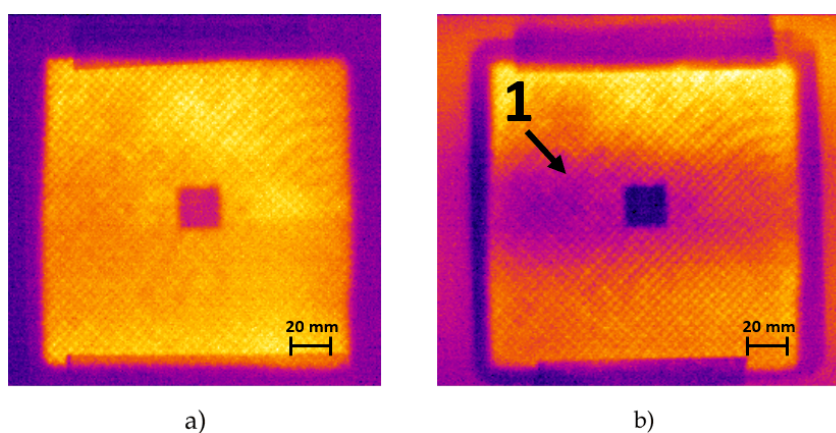


Figura 5.10: Comparação do efeito sombra.
 a) com a elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) com a parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg.

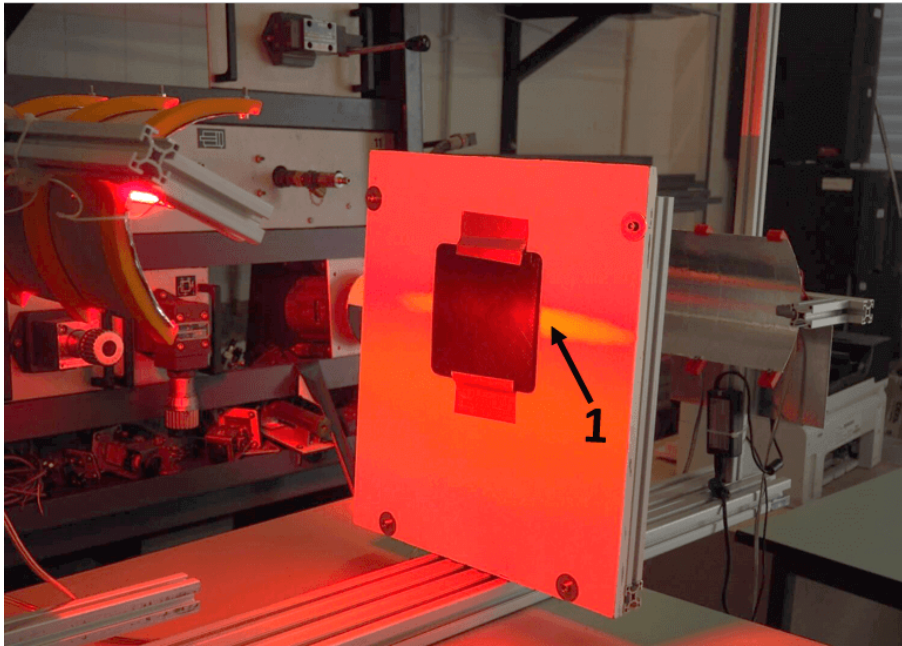


Figura 5.11: Foco de luz com a estrutura elíptica.

• **Comparação entre o método de transmissão e reflexão:**

Novamente com o provete 1 foram realizados dois ensaios, um de transmissão (figura 5.12 a)) e outro de reflexão (figura 5.12 b)), ambos os ensaios foram realizados com um tempo de excitação térmica de 10 segundos. Verificou-se que com a transmissão a visualização do defeito é mais evidente.

O caso do provete 2 (figura 5.13) é diferente, uma vez que este apresenta alguns erros de impressão na superfície frontal. Os ensaios de transmissão, a) e b), mostraram-se satisfatórios, no entanto como no método de reflexão a heterogeneidade da superfície têm muita influência na observação térmica, verificou-se que o ensaio da face frontal c) é inconclusivo. Deste modo, foi realizado um ensaio na face traseira d), onde não se encontram erros de impressão e como era de esperar o defeito é visível.

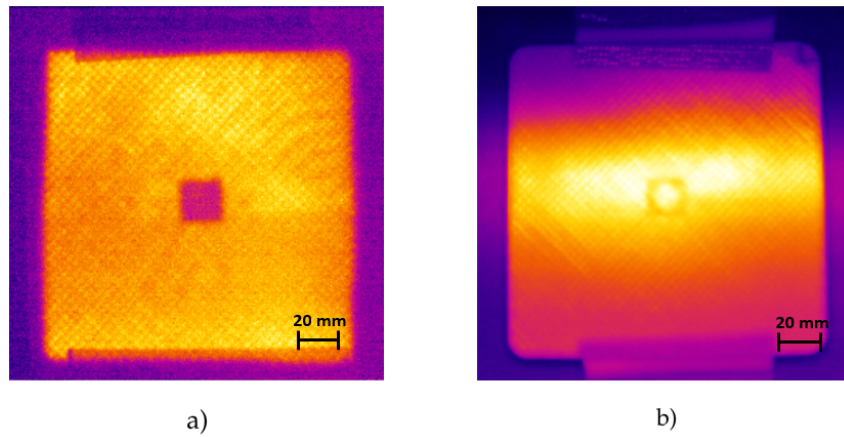


Figura 5.12: Comparação entre transmissão e reflexão
 a) transmissão - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) reflexão - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=18$ seg.

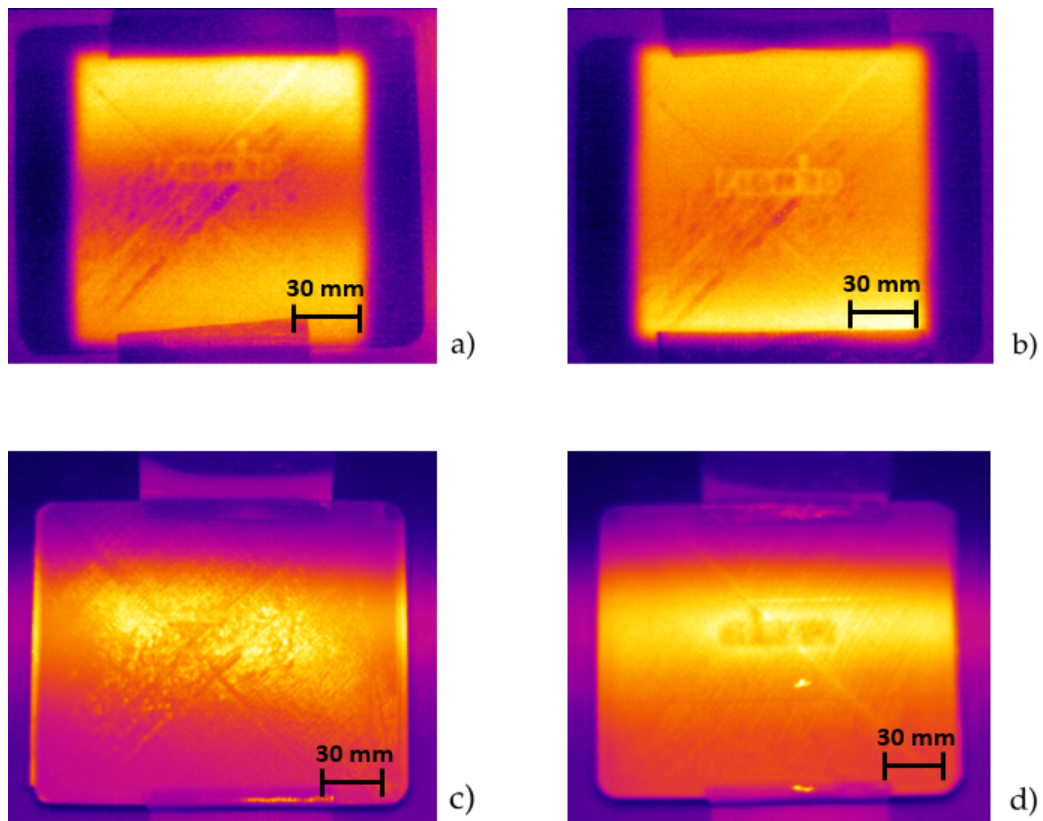


Figura 5.13: Diferentes resultados do provete 2
 a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=30$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=38$ seg, c) reflexão face frontal - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=10$ seg, d) reflexão face traseira - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=15$ seg.

- **Análise do limiar da detetabilidade através da termografia:**

Através do provete 3 foi possível verificar as excelentes capacidades de detetabilidade conseguidas através desta técnica de termografia. Para além de todos os vazios terem sido detetados, onde o vazio de menor dimensão apresentava 1 mm de diâmetro, também foi muito interessante verificar que as formas dos vazios são visivelmente bem definidas.

Verificou-se que através do método de transmissão todos os vazios são visíveis com ambas as estruturas refletoras. Com a variante de reflexão o defeito de menor dimensão representado por 1 (figura 5.14 c) não é detetável. Foi então realizado um ensaio semelhante, mas onde se aplicaram 10 segundos de ar comprimido de modo a provocar um rápido contraste térmico. Como é possível observar na figura 5.14 d), o vazio de 1 mm representado por 2 é deste modo detetável.

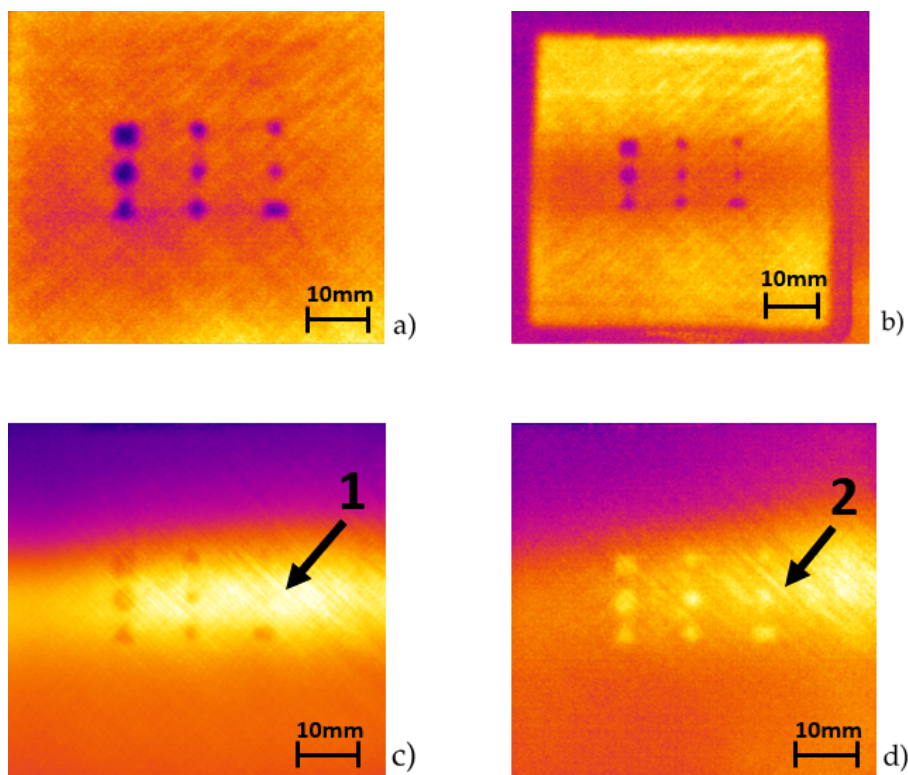


Figura 5.14: Diferentes resultados do provete 2

a) transmissão com elipse - $d_{CP}=330$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com parábola - $d_{CP}=460$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg, c) reflexão normal - $d_{CP}=360$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=20$ seg, d) reflexão com ar comprimido - $d_{CP}=360$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, t_A quando aplicado ar comprimido.

- **Comparação entre os diferentes materiais:**

Como foi referido anteriormente, as peças produzidas no âmbito do projeto FIBR3D podem ter como matriz diferentes polímeros. Deste modo, foram testados provetes geometricamente iguais mas com materiais diferentes.

Verificou-se que os tempos para observar o defeito bem definidos são diferentes consoante o polímero analisado.

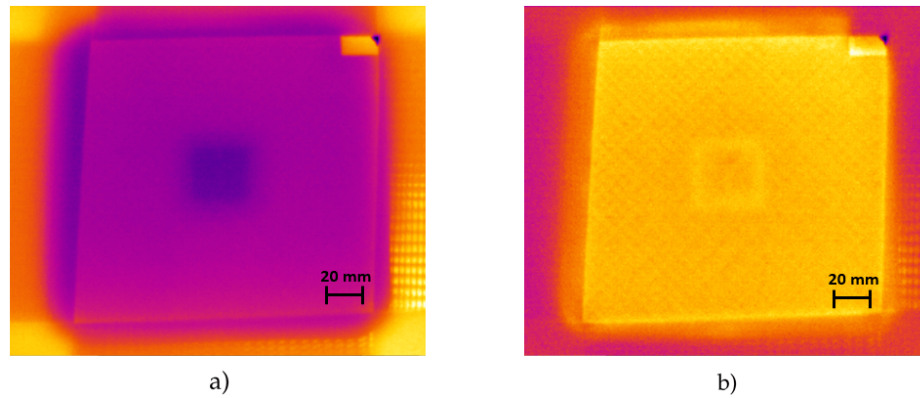


Figura 5.15: Inspeção do provete PLA
a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=38$ seg).

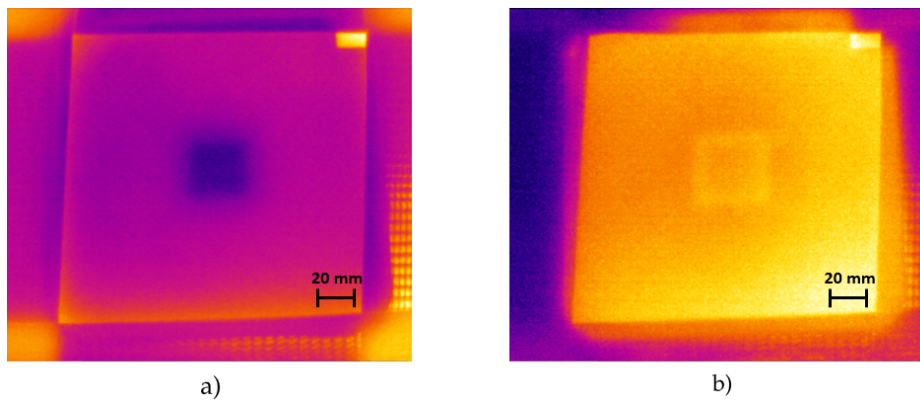


Figura 5.16: Inspeção do provete ABS
a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=50$ seg).

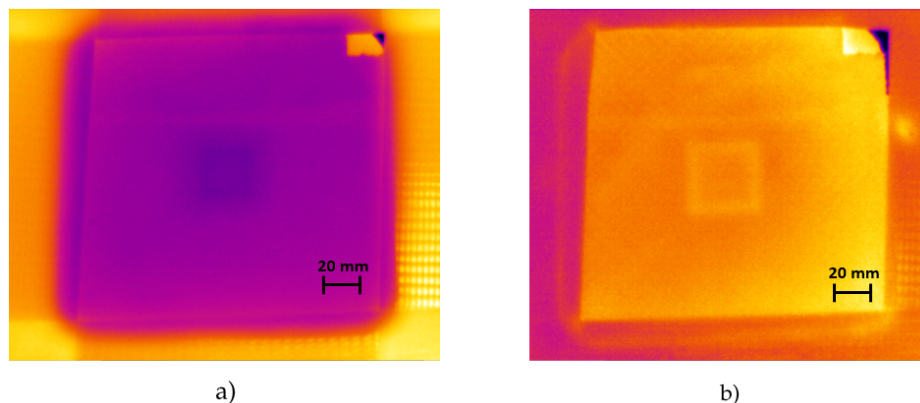


Figura 5.17: Inspeção do provete Nylon
a) sem a utilização de ar comprimido, b) com a utilização de ar comprimido ($d_{CP}=240$ mm, $d_{FP}=460$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=30$ seg).

• **Análise da influência da curvatura por comparação entre os provetes 4 e 5:**

Devido ao aumento da espessura do provete 4, verificou-se que o método de transmissão apresenta melhores resultados comparativamente ao método de reflexão. De modo a perceber a influência da curvatura foi inspecionado o provete 5, onde se percebeu claramente que a propagação térmica é diferente e, como tal, torna-se mais complicado a percepção dos vazios.

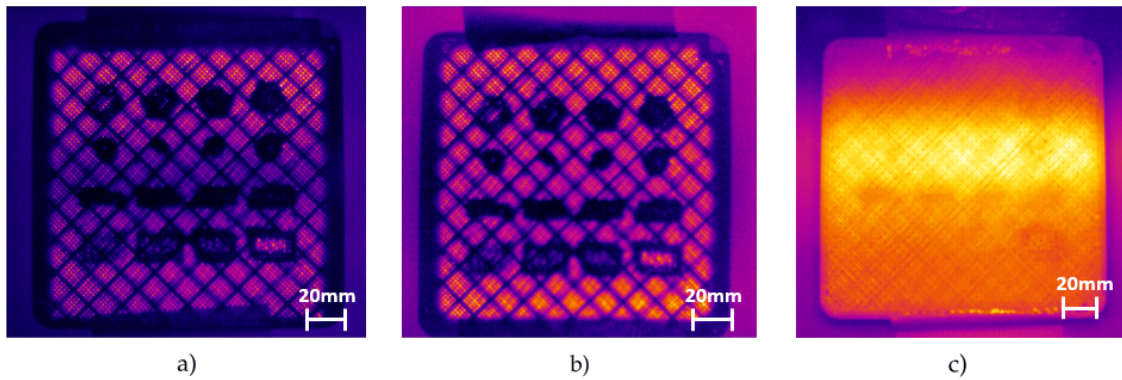


Figura 5.18: Imagens térmicas do provete 4

a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, c) reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=15$ seg.

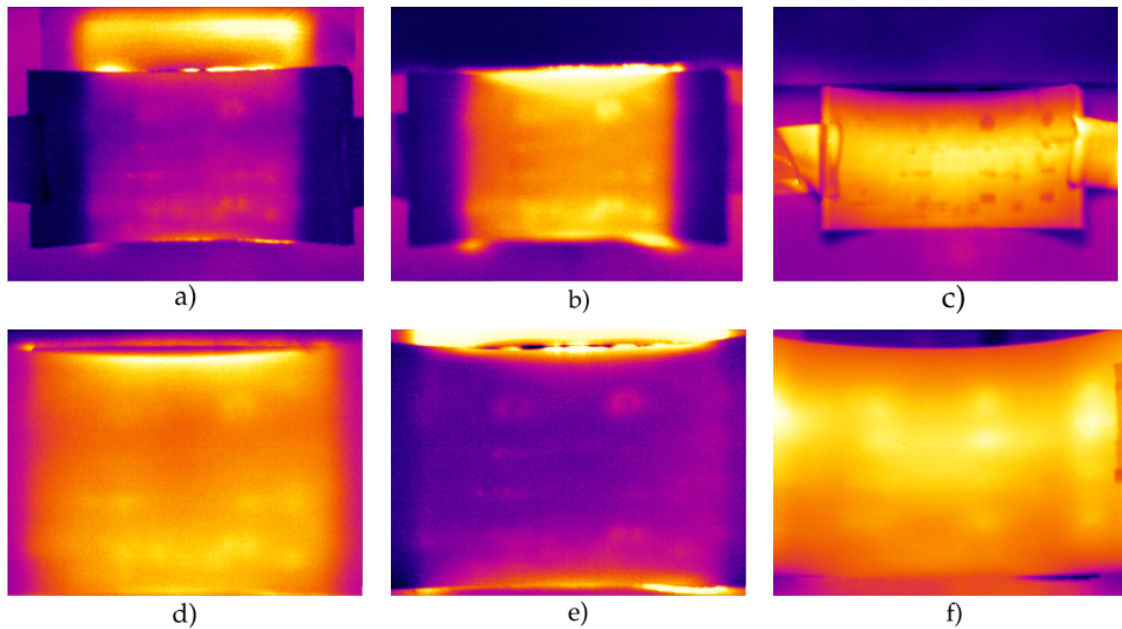


Figura 5.19: Imagens térmicas do provete 5

a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=50$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=20$ seg, $t_A=60$ seg, c) reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=20$ seg, d) transmissão com parábola ampliado, e) transmissão com elipse ampliado, f) reflexão com elipse ampliado.

• **Análise dos arames inseridos no provete 6:**

Através da inspeção do provete 6 foi possível detetar o fio de *Kevlar*® com um diâmetro superior ao dos restantes fios. Embora a espessura dos fios seja muito reduzida, alguns são visíveis no exterior do provete, mas dentro deste não é possível perceber a localização dos mesmos.

Na figura 5.20 são apresentadas diversas imagens com os diferentes tipos de transmissão e reflexão, e duas imagens com a câmara mais próxima do provete, na tentativa de conseguir observar os fios de menor diâmetro. Os resultados mantiveram-se, o fio de *Kevlar*® de maior diâmetro é visível enquanto que os restantes não.

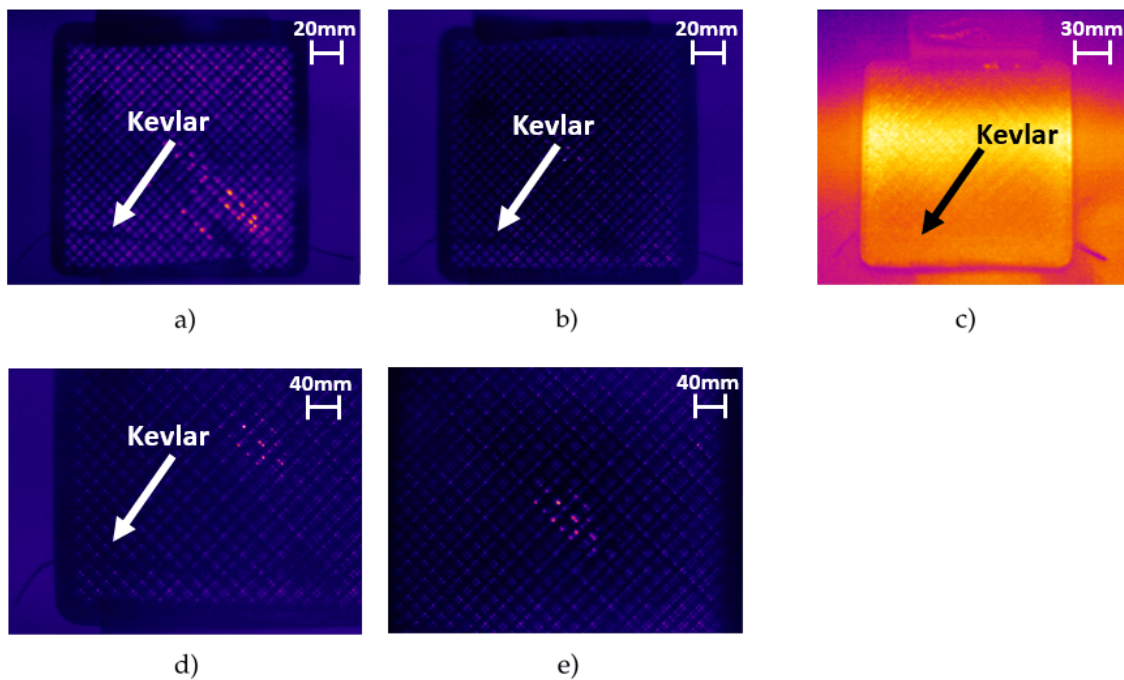


Figura 5.20: Imagens térmicas do provete 6

a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, c) reflexão com elipse - $d_{CP}=600$ mm, $d_{FP}=340$ mm, $t_E=5$ seg, $t_A=10$ seg, d) zona dos fios de *Kevlar*®, e) zona dos arames de NiTi.

• **Análise das amostras de fibra de carbono do provete 7:**

Na inspeção do provete 7 foi possível visualizar as amostras de fibra de carbono, exceto a amostra que estava a 5 mm de profundidade. O método de transmissão (figura 5.21) mostrou-se mais eficaz do que a reflexão (figura 5.22).

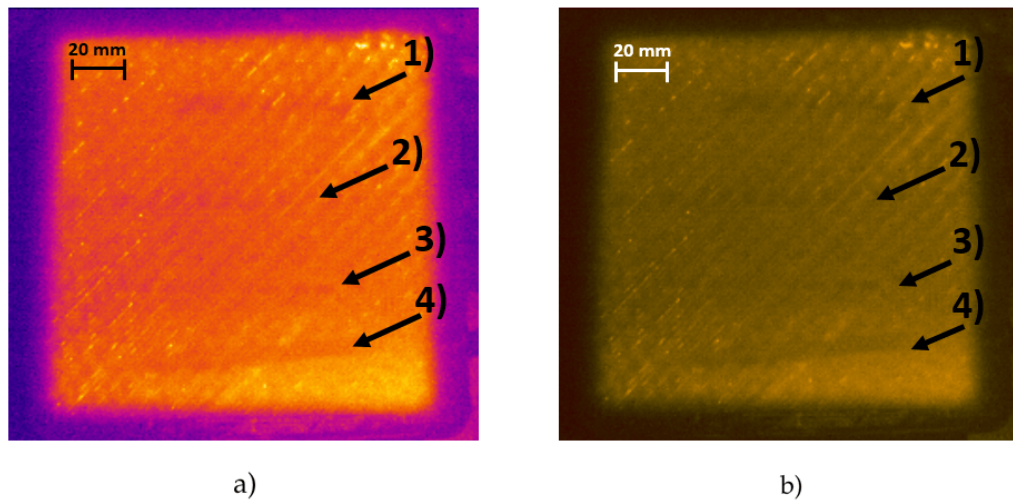


Figura 5.21: Imagens térmicas do provete 7 (transmissão) - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=40$ seg; 1) amostra 2, 2) amostra 3, 3) amostra 4, 4) amostra 5 - a) imagem original, b) imagem tratada.

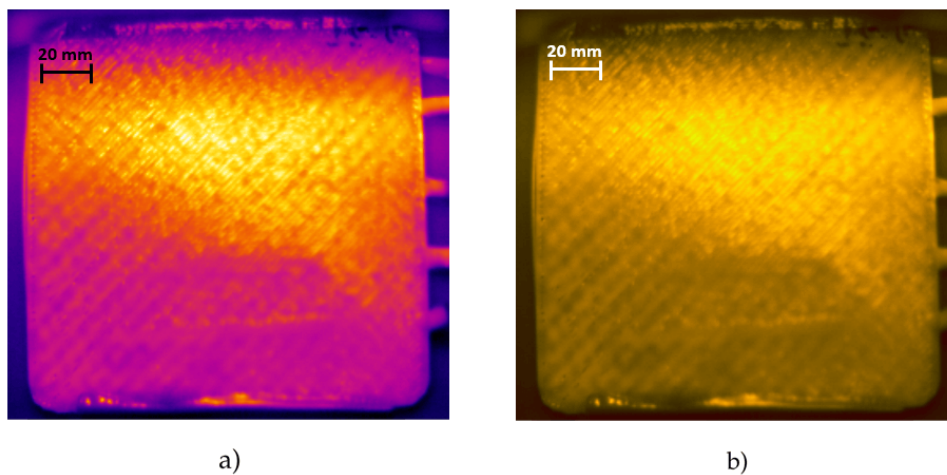


Figura 5.22: Imagens térmicas do provete 7 (reflexão) - $d_{CP}=420$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=24$ seg - a) imagem original, b) imagem tratada.

• **Análise das delaminações do provete 8:**

Na análise do provete 8 pretendia-se detetar as delaminações artificiais. Através do método de transmissão com a estrutura parabólica foi detetada uma diferença térmica na zona da massa de lítio (figura 5.23 b) e c). Tentou observar-se a zona do Teflon com a câmara termográfica mais próxima do provete, mas ainda assim não era visível.

As restantes delaminações mostraram-se invisíveis através desta técnica.

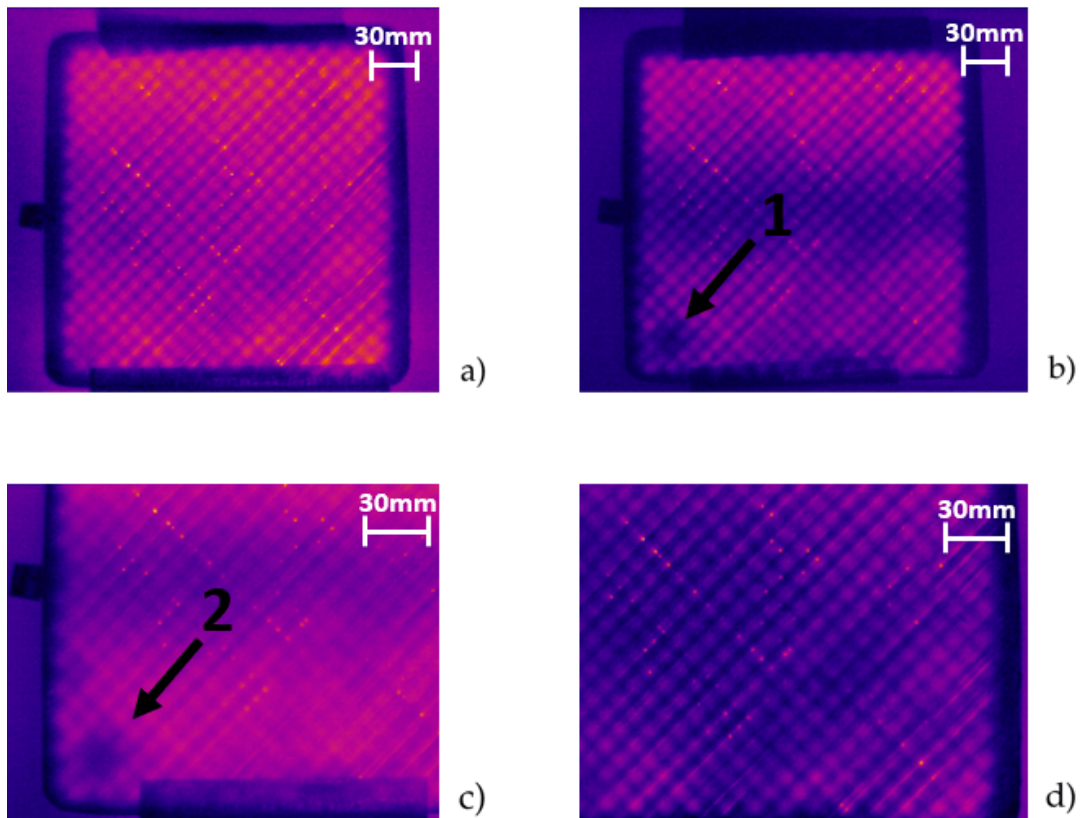


Figura 5.23: Pormenores das imagens térmicas do provete 8

a) transmissão com parábola - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, b) transmissão com elipse - $d_{CP}=480$ mm, $d_{FP}=480$ mm, $t_E=10$ seg, $t_A=10$ seg, c) zona da massa de lítio, d) zona do teflon.

5.3 Resultados do Raio-X

• Inspeção de vazios:

Nos ensaios de raio-x o parâmetro que se controlou foi o tempo da exposição dos provetes à radiação dado em [ms].

Os provetes 1 de diferentes materiais foram inspecionados onde se verificou que o vazio em forma de quadrado é bem visível (figura 5.24). Foi possível observar que o PLA apresenta um maior contraste entre o material e a ausência deste comparativamente ao ABS e ao Nylon. Sendo este último o que apresenta menor contraste.

Relativamente ao provete 3, todos os vazios foram claramente identificados como é possível observar na figura 5.25

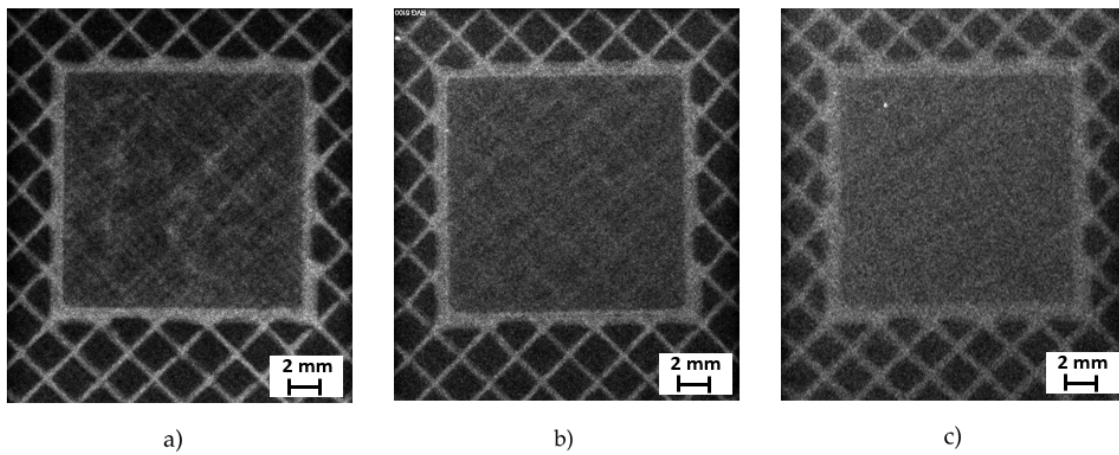


Figura 5.24: Resultados da inspeção ao provete 1
a) provete PLA (13 ms), b) provete ABS (13 ms), c) provete Nylon (10 ms).

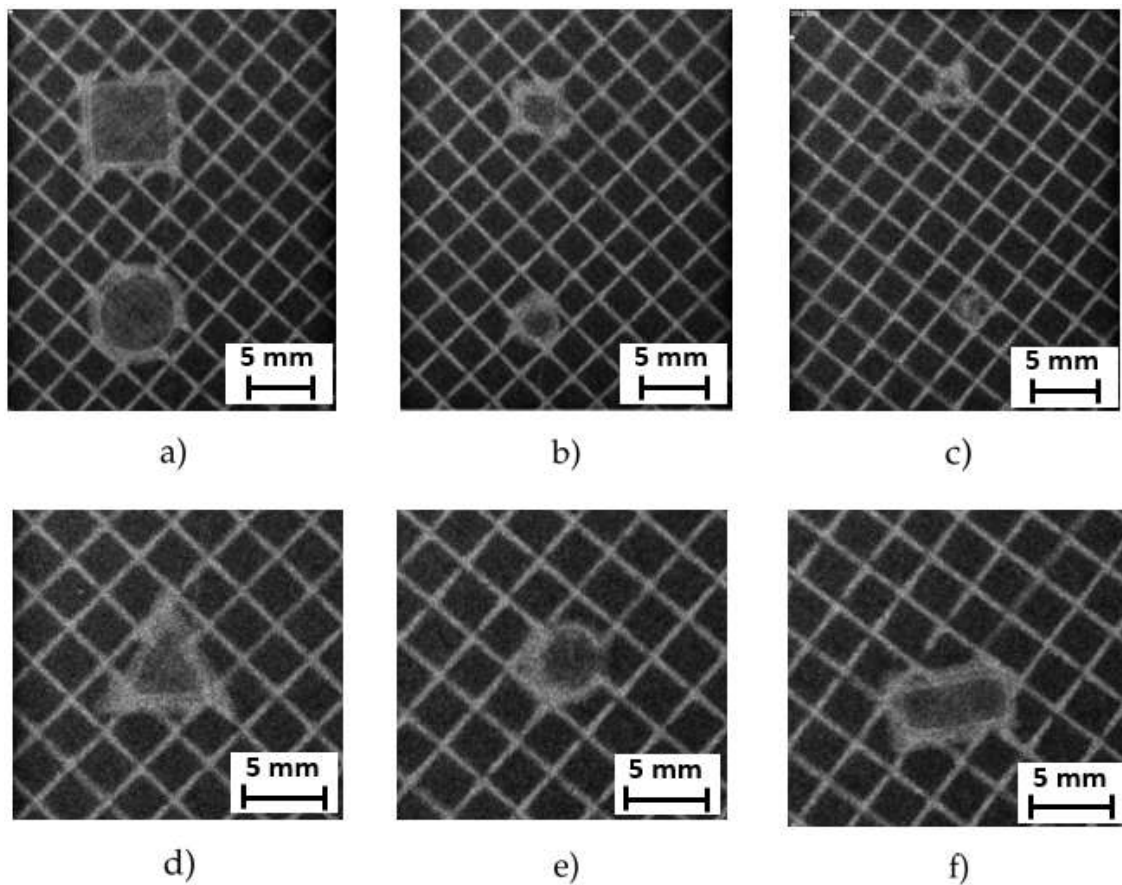


Figura 5.25: Resultados da inspeção do provete 3
a) vazio 1 e 4 (10 ms), b) Vazio 2 e 5 (10 ms), c) vazio 3 e 6 (10 ms), d) vazio 7 (10 ms), e)
vazio 8 (10 ms), f) vazio 9 (10 ms) .

• Inspeção dos fios inseridos no provete 6:

Pretendeu-se observar os fios do provete 6, e deste modo complementar a inspeção da termografia, onde só os fios de *Kevlar*[®] foram possíveis de detetar. Seguidamente são apresentadas as imagens obtidas através de raio-x, acompanhadas pela imagem do provete 6, onde está identificada a zona que foi inspecionada.

A primeira zona (figura 5.26) a ser inspecionada continha os fios de NiTi(2), cobre(5) e ferro(6), onde todos os fios são perfeitamente visíveis.

A segunda zona (figura 5.27) continha os fios de Niti(1), ferro(6) e Kevlar (7). Neste caso os arames metálicos continuam a ser visíveis, mas o fio de *Kevlar*[®] não é detetável.

Na zona apresentada na figura 5.28, foi inspecionada a zona que contém o arame de cobre(5) e a fibra de vidro (8). Como era de esperar o arame de cobre distingue-se perfeitamente enquanto que a fibra de vidro não é detetável.

Por fim inspecionou-se uma zona que continha os fios de NiTi (2), *Kevlar*[®] (4), *Kevlar*[®] (7), e a fibra de vidro (8) (figura 5.29). Novamente o arame de NiTi é visível, e neste caso, a fibra de vidro também é visível tanto fora como dentro do provete.

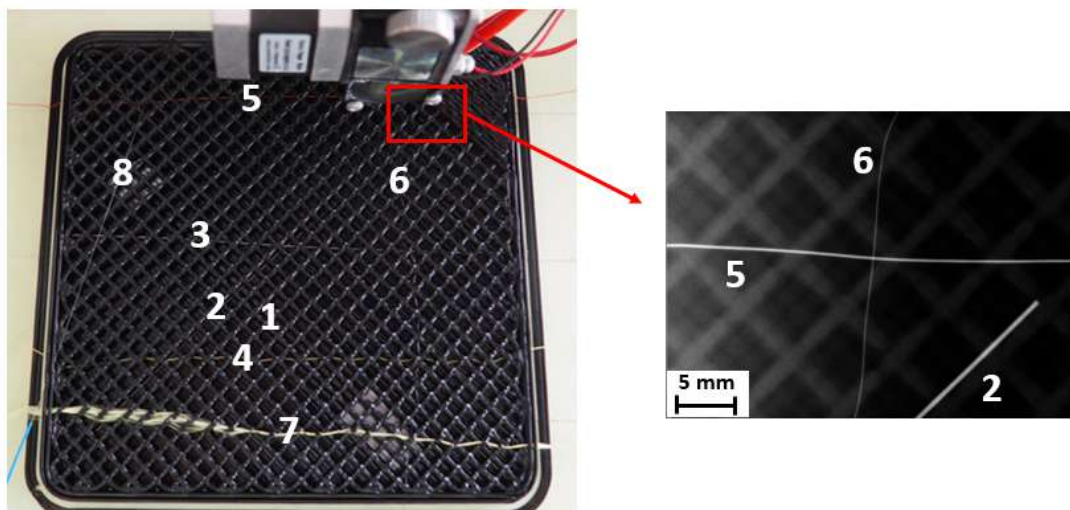


Figura 5.26: Zona com NiTi(2), cobre(5) e ferro(6) - 20 ms.

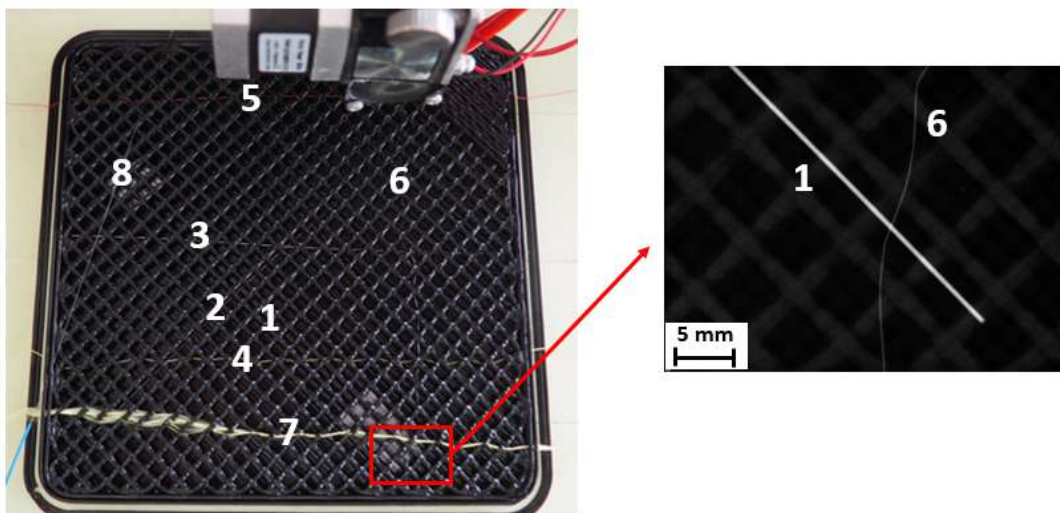


Figura 5.27: Zona com Niti(1), ferro(6) e Kevlar® (7) - 10 ms.

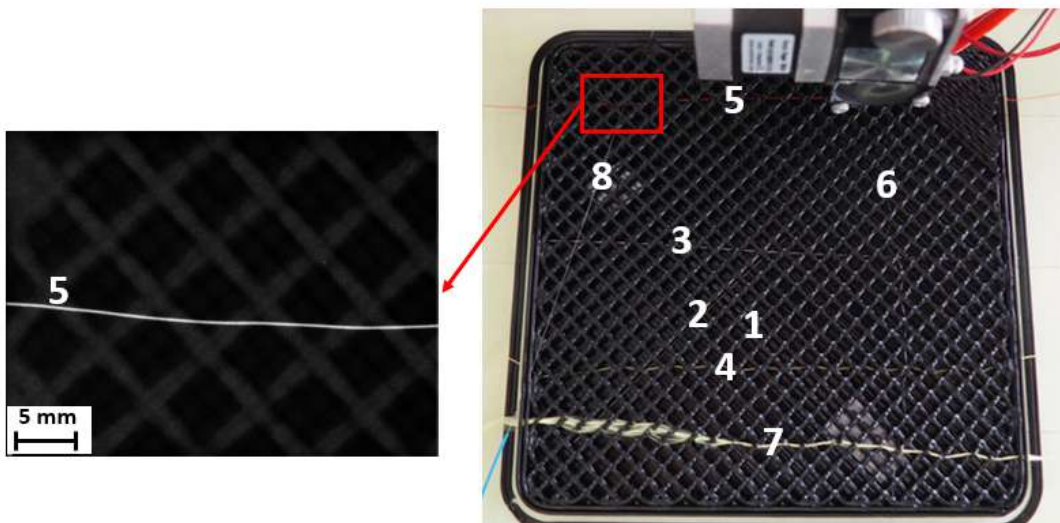


Figura 5.28: Zona com cobre(5) e a fibra de vidro (8) - 10ms.

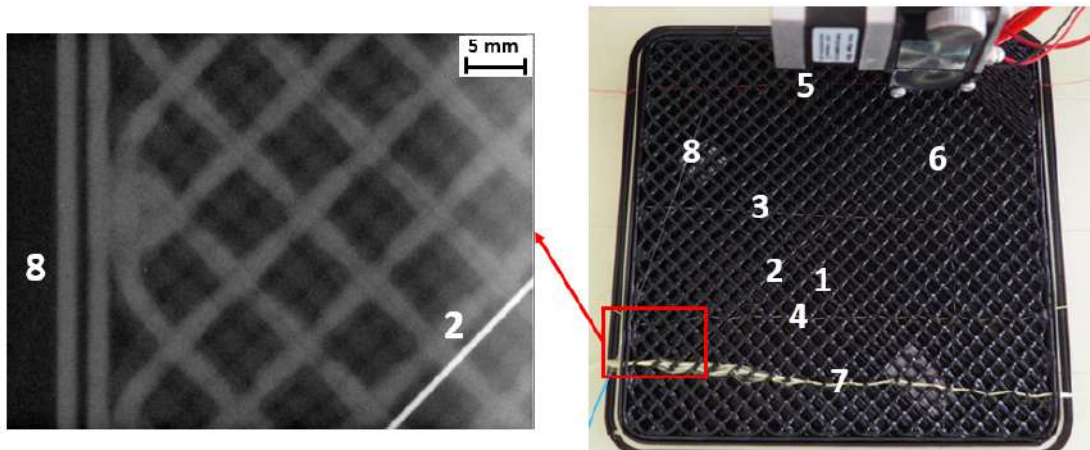


Figura 5.29: Zona com NiTi (2), Kevlar® (4), Kevlar® (7), e a fibra de vidro (8) - 10 ms .

• **Inspecção das amostras de fibra de carbono inseridas no provete 7:**

Após realizados vários, ensaios verificou-se que com um tempo de exposição até 120 ms ainda é possível observar o interior do provete, mas as amostras de fibra de carbono não absorvem radiação suficiente para se conseguir observar o contraste face ao restante material. Com 160 ms o tempo da radiação é excessivo, uma vez que, o material fica saturado e toda a radiação passa através do provete. Como no equipamento utilizado não é possível utilizar um tempo de exposição entre os 120 ms e os 160 ms, não é possível detetar as amostras de fibra de carbono.

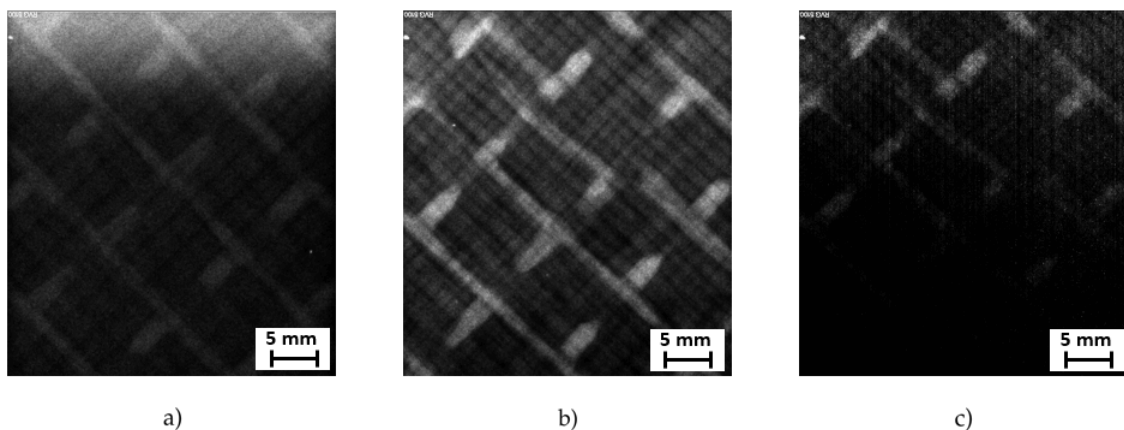


Figura 5.30: Resultados da inspecção do provete 7
a) 10 ms, b) 120 ms, c) 160 ms.

5.4 Resultados dos Ultra-Sons

5.4.1 Resultados dos Ultra-Sons com sonda de contacto

De modo a avaliar a possibilidade de realizar END pelo método de Ultra-sons (US), foram realizados testes de medição da velocidade do som e do coeficiente de atenuação acústica

de diversos materiais. Foram utilizadas as sondas de contacto de 2 e 4 MHz apresentadas no capítulo anterior. Foram utilizadas três chapas (aço 316L, alumínio e cobre) e o provete de PEEK.

Através do equipamento de US, é possível ler o tempo do percurso das ondas sonoras [s] em função do ganho [dB]. Com a utilização da função *GATE* é colocada uma linha 1) por cima do pico da onda, como é apresentado na figura 5.31, a partir de onde se obtém o tempo 2) do percurso da onda no ponto de maior ganho coberto por essa mesma linha.



Figura 5.31: Imagem da janela do equipamento de ultra-sons
1) linha da função *GATE*, 2) exemplo do valor to tempo medido na *GATE*.

As sondas utilizadas funcionaram em modo de emissão e receção. Deste modo, entre dois picos do gráfico, é medido o tempo do percurso da onda sonora desde a saída da sonda, até à chegada do som refletido pelo provete à mesma.

Este percurso equivale a duas espessuras do material, ou seja, é possível determinar uma espessura total $[\Delta x]$ que corresponde a um determinado intervalo de tempo $[\Delta t]$ que por sua vez, depende do número de picos escolhidos.

Utilizando as variáveis anteriores, a velocidade do som no material é calculada pela equação 5.1.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Em que v é a velocidade do som [m/s], Δx a distância percorrida pelo som [m] e Δt o tempo correspondente à distância percorrida pelo som [s].

Neste caso em específico utilizando a sonda de 4 MHz e considerando os três primeiros picos, a distância total será equivalente a quatro espessuras do material. Como a referida

imagem pertence ao provete de PEEK de espessura 6,7 mm, a distância total percorrida pelo som será:

$$\Delta x = 4 \times 6,7 = 26,8 \text{ mm} = 0,0268 \text{ m} \quad (5.2)$$

O valor do intervalo de tempo correspondente à distância calculada é dado diretamente pelo equipamento, quando colocada uma *GATE* no primeiro pico e outra no terceiro. Temos então:

$$\Delta t = 10,407 \mu\text{s} = 10,407 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (5.3)$$

Deste modo, ficamos com:

$$v = \frac{0,0268}{10,407 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow v = 2575,19 \text{ m/s} \quad (5.4)$$

A taxa de decaimento da vibração mecânica à medida que esta se propaga ao longo do material é dada por:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (5.5)$$

Em que P é o ganho em [dB], P_0 é o ganho pontual [dB], α é o coeficiente de atenuação acústica [dB/m] e d é a distância correspondente a um determinado tempo [m].

Para retirar o valor do coeficiente de atenuação acústica (α) da equação 5.5, foi realizada uma regressão exponencial que relaciona a distância (x) em [m] com o ganho (P) em [dB].

Recorrendo ao mesmo método da medição com as *GATES*, foram retirados os tempos de cada um dos três picos. A respetiva distância é calculada através da equação 5.1, colocando em evidência o Δx :

$$\Delta x = v \times \Delta t \quad (5.6)$$

Considerou-se o primeiro pico como distância inicial de valor 0, ou seja, todas as outras distâncias são relativas a esta.

Na continuação da anterior análise do provete de PEEK, na tabela 5.1 são apresentados os valores utilizados para a criação da regressão exponencial.

Através da figura 5.32 é possível retirar a equação $y = 39,78 \cdot e^{-83,55x}$. O valor de α é de 86,76 dB/m.

Tabela 5.1: Valores correspondentes à regressão exponencial para o PEEK com a sonda de 4 MHz.

Material	t(s)	x(m)	y(dB)
	0	0	39,744
PEEK	$5,14 \times 10^{-6}$	0,0132	13,392
	$10,41 \times 10^{-6}$	0,0268	3,888

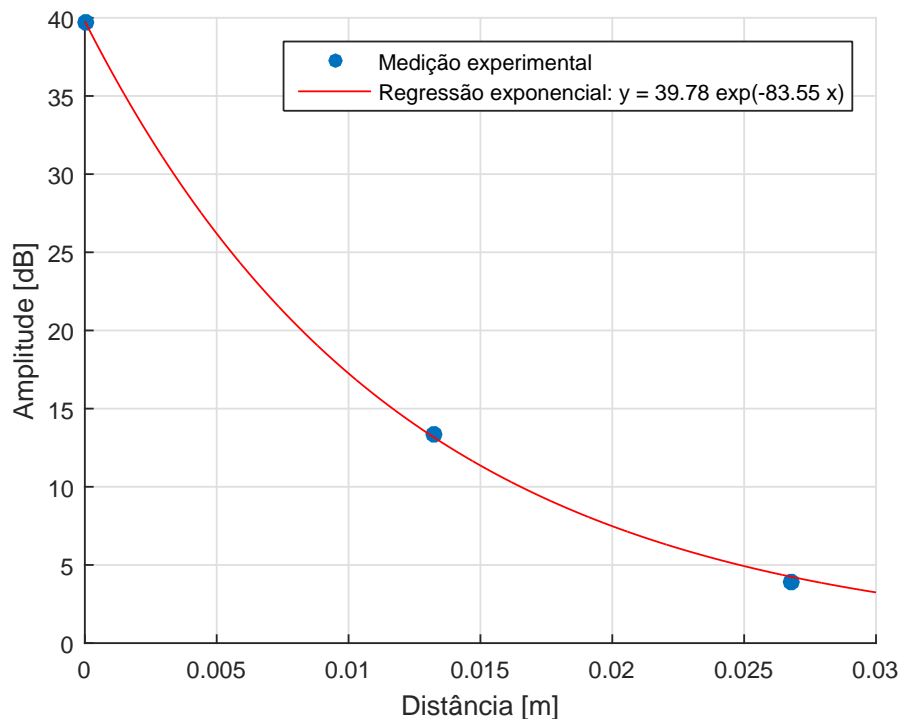


Figura 5.32: Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.

Aplicando o mesmo método, foram realizados ensaios a cada um dos materiais. Foram realizados ensaios com a mesma sonda e o mesmo material mas com diferente frequência do equipamento. Os materiais foram inspecionados com a sonda de 4 MHz com 4 e 5 MHz no equipamento e a sonda de 2 MHz com 2 e 2,5 MHz. Os valores obtidos são apresentados na tabela 5.2 e os restantes gráficos encontram-se em anexo.

Tabela 5.2: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de medição a velocidade do som e do coeficiente de atenuação acústica, em que x é a espessura do material, x total é a distância percorrida pelo som, t total é o tempo do percurso do som, v a velocidade do som e α o coeficiente de atenuação acústica.

Material	x [mm]	nº de picos	x total [m]	Freq. da Sonda [MHz]	Freq. do Equip. [MHz]	t total [s] $\times 10^{-6}$	v [m/s]	α [dB/m]
PEEK	6,7	3	0,027	4	4	10,4	2575	84
				4	5	10,4	2570	80
				2	2	10,3	2592	46
				2	2,5	10,3	2590	63
Aço 316L	4	4	0,024	4	4	4,2	5760	20
				4	5	4,3	5592	11
				2	2	4,4	5424	27
				2	2,5	4,7	5142	28
Alumínio	30	4	0,18	4	4	28,2	6385	14
				4	5	28,1	6411	13
				2	2	28,3	6359	10
				2	2,5	28,3	6364	9
Cobre	10	4	0,06	4	4	13,1	4585	12
				4	5	13,1	4587	10
				2	2	13,0	4633	12
				2	2,5	13,0	4641	18

Para comparação dos resultados obtidos foi consultada a tabela de valores da velocidade do som em diversos materiais da *OLYMPUS* [29]. Os valores das velocidades são: 2460 m/s para o *Polyethylene* (polímero de características semelhantes ao PEEK), 5740 m/s para o aço, 6320 m/s para o alumínio e 4660 m/s para o cobre.

Através dos resultados obtidos com o método de US, verificou-se que o valor médio da velocidade do som para os referidos materiais é de: 2582 m/s para o PEEK, 5480 m/s para o aço, 6380 m/s para o alumínio e 4612 m/s para o cobre.

Estas diferenças nos valores da velocidade pode dever-se à dificuldade de precisão na medição manual do som, pois qualquer ligeira inclinação da sonda podem alterar a fiabilidade dos resultados.

Relativamente aos valores do coeficiente de atenuação acústico, verifica-se que maioritariamente aumenta com o aumento da frequência imposta. Este fenómeno é explicado pela absorção sonora, que consiste na conversão da energia sonora em calor. Quanto mais rápidas forem as oscilações mais energia se perde, logo a absorção aumenta com a frequência.

O coeficiente de atenuação acústica do PEEK é notavelmete superior ao dos restantes

materiais. O que comprova que a atenuação acústica nos polímeros é muito superior comparada com a dos metais.

5.4.2 Resultados da técnica de Ultra-Sons por imersão

Com o uso da mesa xy referida no capítulo 4, foram realizados ensaios com o objetivo de detetar os vazios no interior dos materiais. Para tal, foi medida a variação da amplitude, dada pelo já referido equipamento de US. Foram analisados o provete de PEEK e o provetes 1 de PLA. Para cada um dos provetes foram testadas as sondas de 2, 4 e 10 MHz.

A mesa xy possui um curso máximo de 100 mm em x e em y, pelo que para serem inspeccionadas todas as quatro caixas do provete de PEEK foram realizados dois ensaios para cada umas das sondas. Verificou-se que a variação de amplitude foi evidente na localização das caixas, exceto para a caixa 2 (5mm de diâmetro e 2 mm de profundidade) com a sonda de 2 MHz.

Nas figuras 5.33 e 5.34 são apresentados os resultados dos ensaios para o provete de PEEK com a sonda de 4 MHz. Os restantes resultados encontram-se em anexo. O vazio do provete 1 não foi possível de detetar. Como tal, foi impresso um provete idêntico ao provete 1, mas com um enchimento de 100 %. Deste modo, através da comparação dos resultados dos dois provetes é possível perceber se os resultados negativos são devido à percentagem de enchimento de material, ou do processo de impressão 3D.

Com a sonda de 2 MHz foi possível identificar uma alteração da amplitude na zona do vazio, embora não apresentasse a forma do quadrado bem definida. Com as restantes sondas o vazio continua a não ser detetado. Na figura 5.35 é apresentado o resultado do ensaio do provete 1 e na figura 5.36 é ilustrado o resultado do ensaio do provete 1 com enchimento de 100 %, ambos com a sonda de 2 MHz. Os restantes resultados encontram-se em anexo.

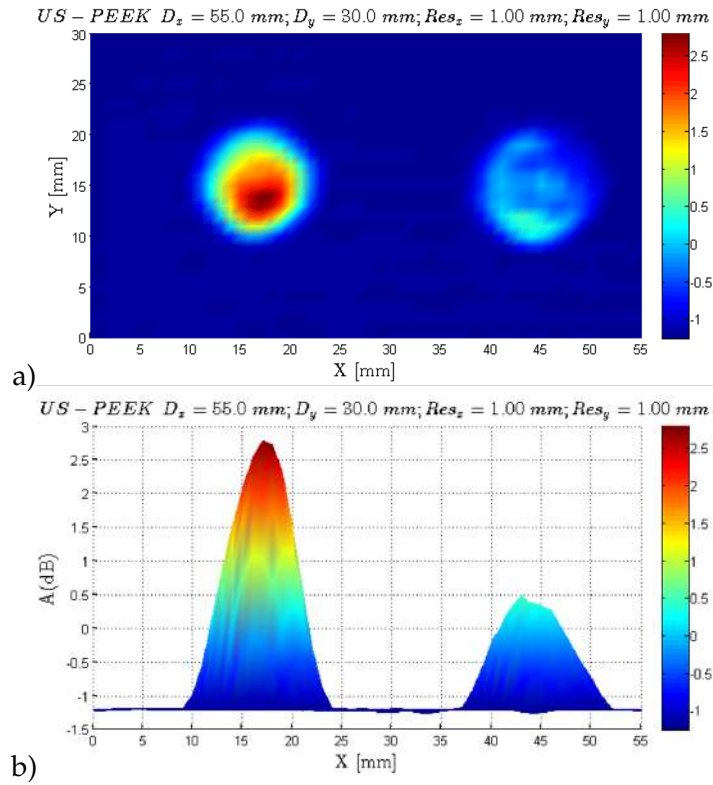


Figura 5.33: Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 4 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

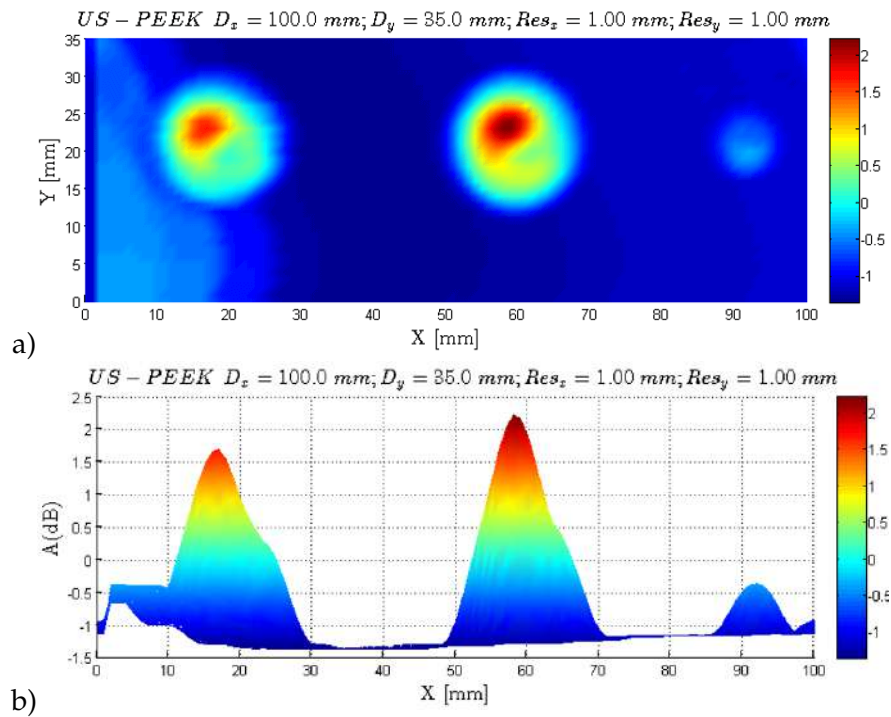


Figura 5.34: Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 4 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

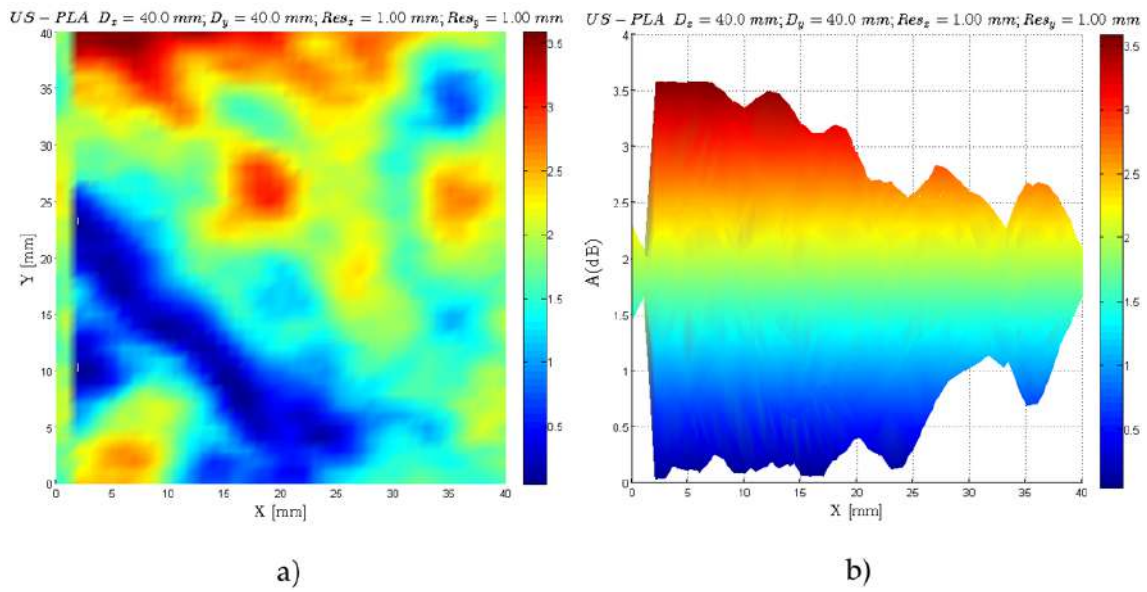


Figura 5.35: Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 2 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

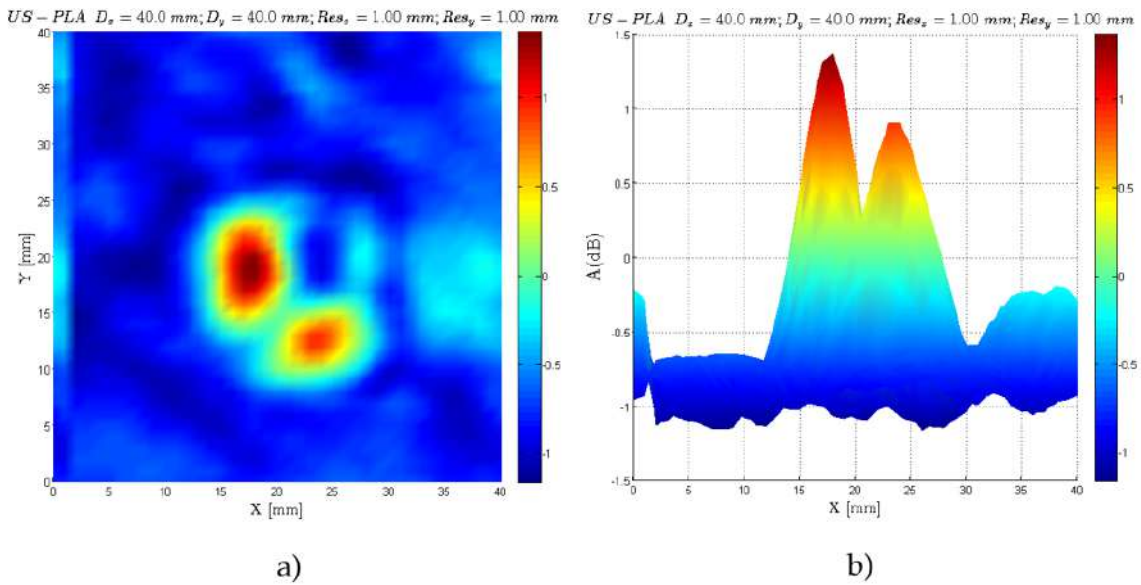


Figura 5.36: Inspeção do provete 1 PLA 100 % com sonda de 2 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

5.5 Resultados das Correntes Induzidas

Foram realizados ensaios com a sonda de 550 espiras. Após vários ensaios concluiu-se que os melhores resultados são obtidos com a sonda a uma frequência de 4,5 MHz. De forma a perceber se a sonda detetava o arame de NiTi, foi realizado um ensaio com um arame de NiTi na superfície de um provete, e outro ensaio sem o arame. Comparando os dois resultados, percebe-se que existe uma alteração na variação da impedância que indica a presença do arame. Os ensaios com o arame, e sem o arame, estão representados nas figuras 5.37 e 5.38 respetivamente.

Foram realizados ensaios ao provete 6 com o objetivo de detetar os arames de ferro, cobre e NiTi, a uma profundidade de 1 mm para o NiTi e 2 mm para os restantes dois. A variação de impedância elétrica, quando a sonda atravessa a zona onde está o arame de ferro, foi evidente (figura 5.39). Com o arame de cobre também se verificou uma variação considerável da impedância elétrica (figura 5.40). Contudo no caso do arame de NiTi essa alteração não foi tão perceptível, não sendo possível afirmar que a alteração da impedância é devida à presença do arame (figura 5.41).

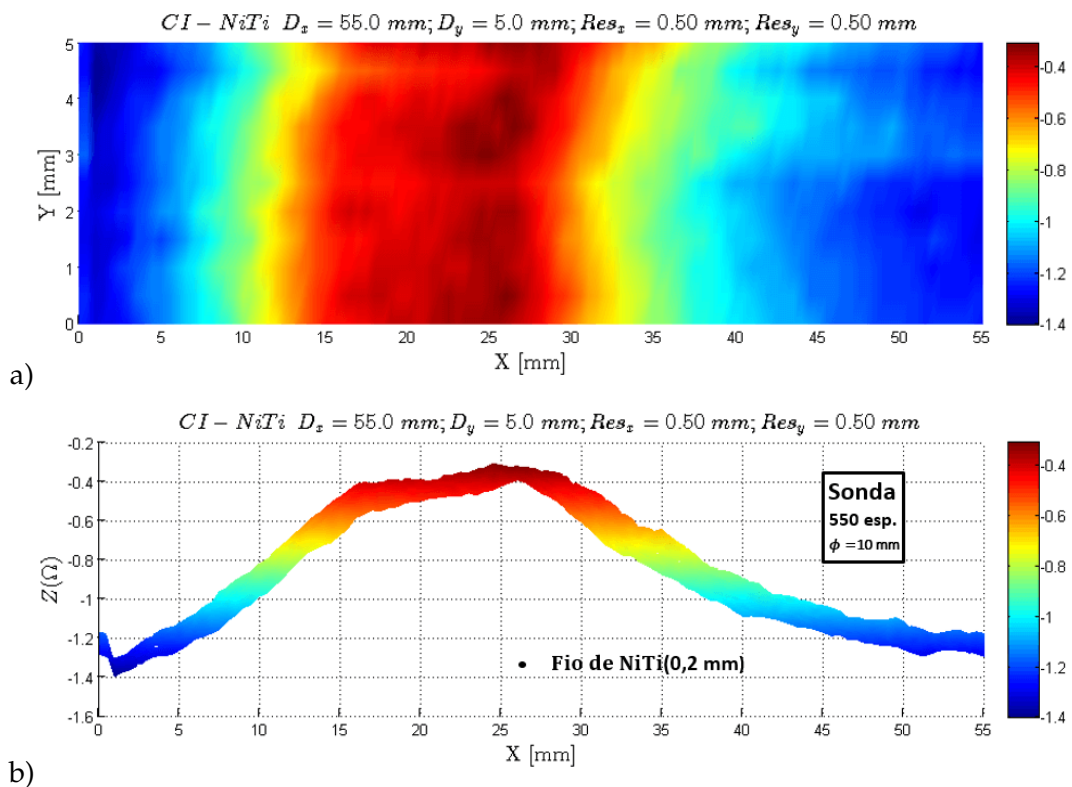


Figura 5.37: Inspeção do arame de NiTi não incluído
a) resultado do ensaio, b) vista lateral.

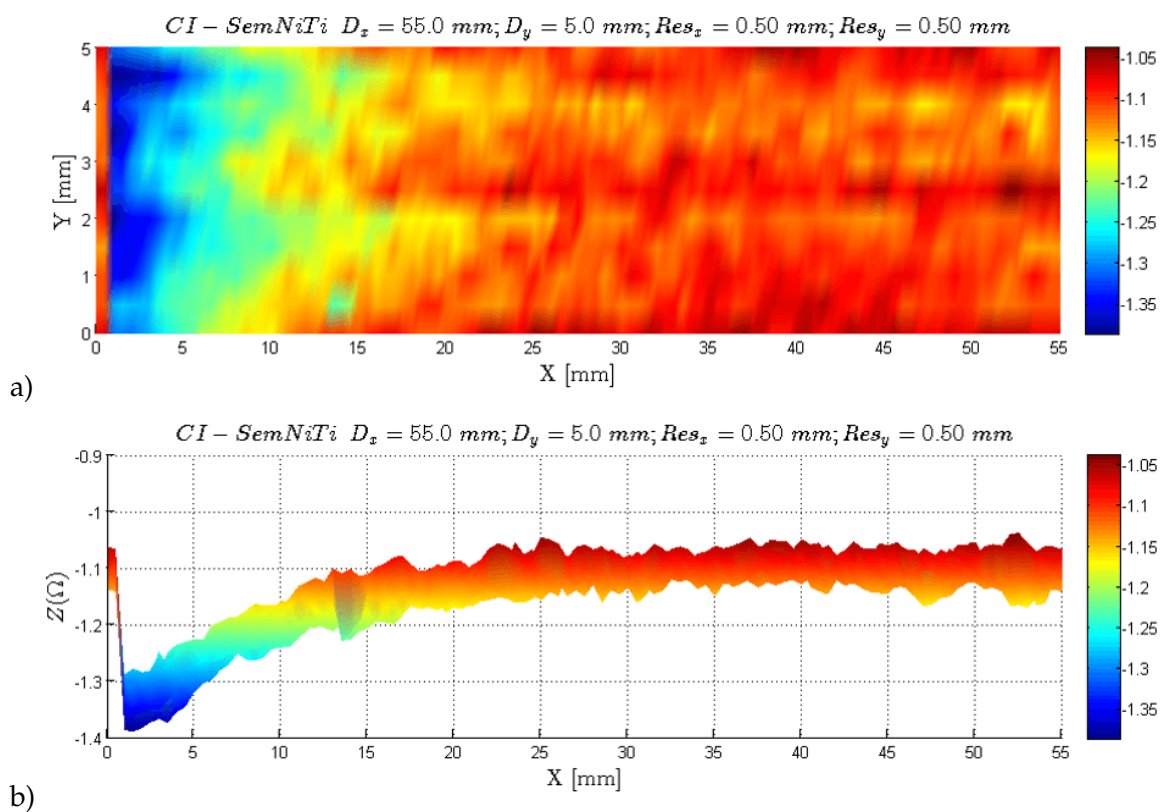


Figura 5.38: Inspeção sem arame de NiTi
a) resultado do ensaio, b) vista lateral.

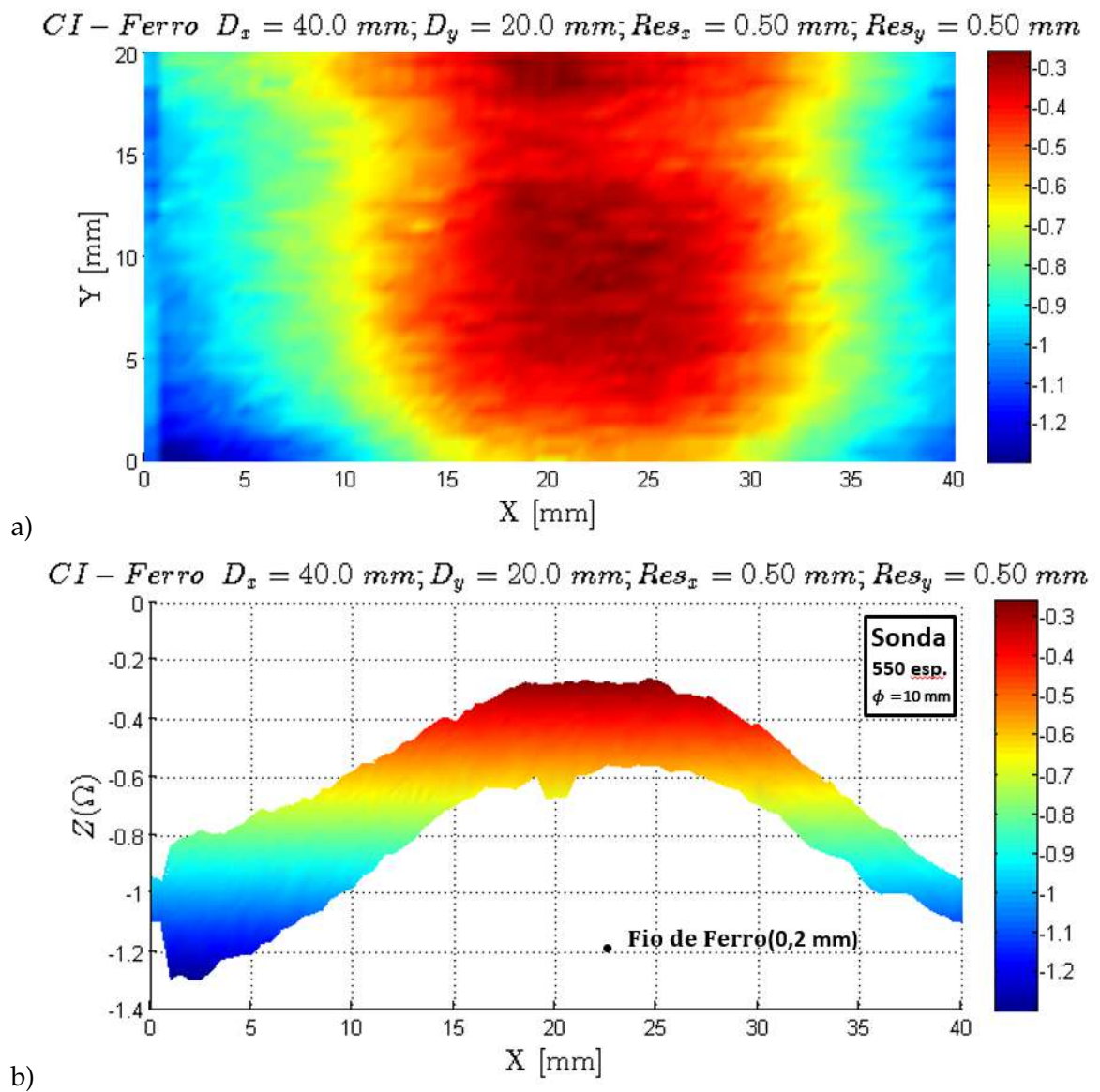


Figura 5.39: Inspeção do arame de ferro
a) resultado do ensaio, b) vista lateral.

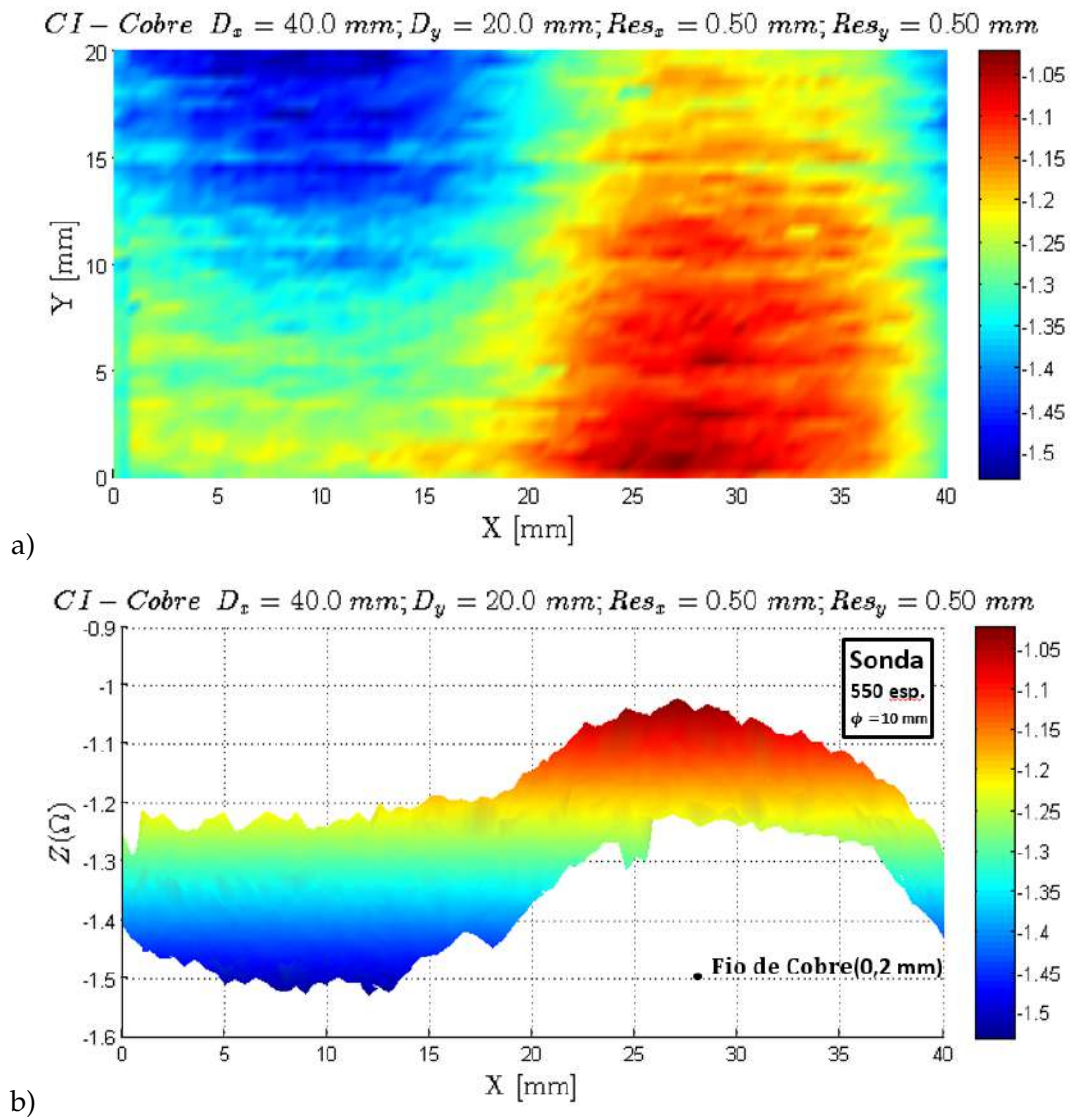


Figura 5.40: Inspeção do arame de cobre
a) resultado do ensaio, b) vista lateral.

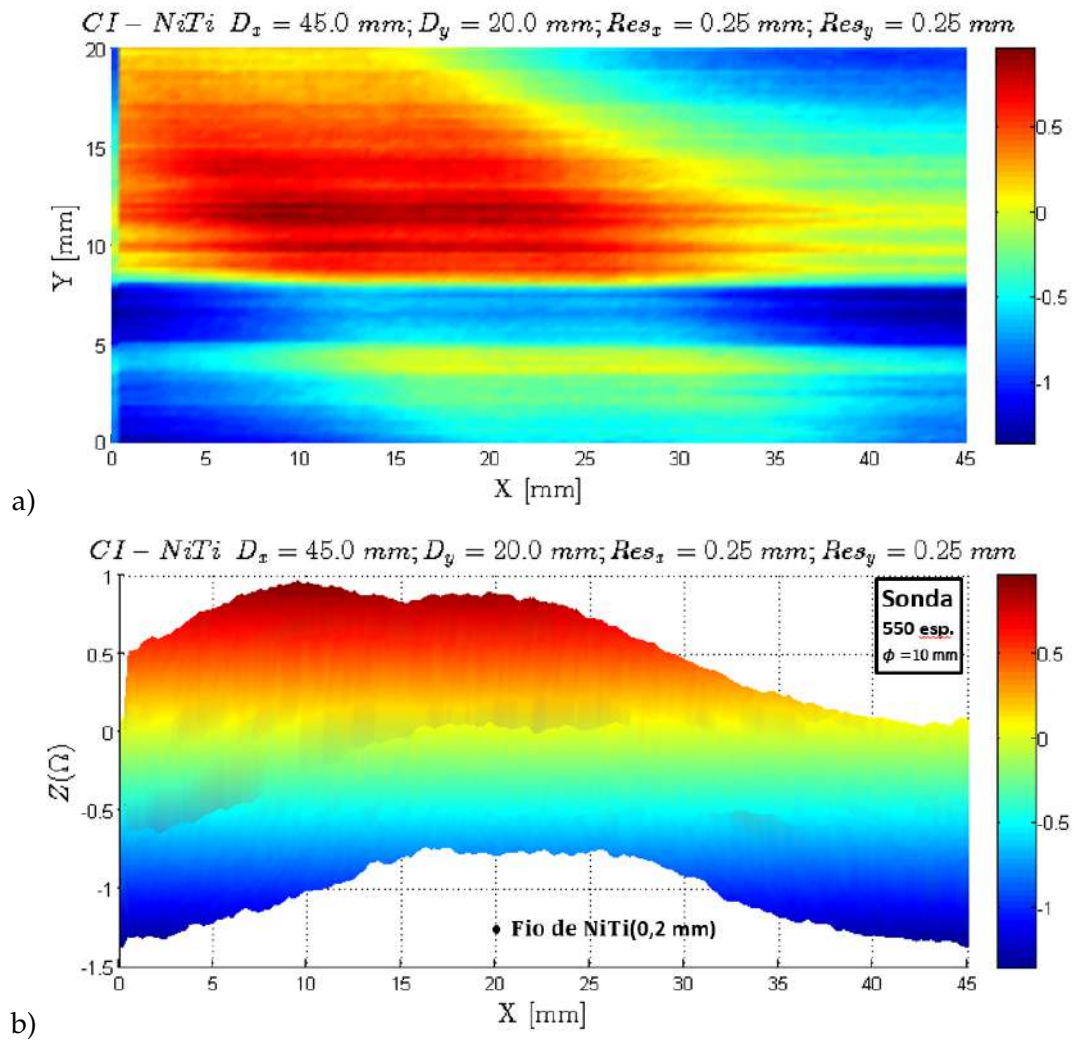


Figura 5.41: Inspeção do arame de NiTi
a) resultado do ensaio, b) vista lateral.

Nos ensaios com a sonda de 20 espiras verificou-se uma alteração da impedância mais significativa, mas ainda pouco fiável para se afirmar que é devida à presença do arame de NiTi (figura 5.42). Os restantes arames foram novamente detetados, sendo possível verificar os seus resultados em anexo.

Relativamente à sonda de emissão-receção em nenhum dos ensaios foi possível detetar os arames. O ensaio na zona do arame de NiTi é ilustrado na figura 5.43. Em anexo são apresentados os resultados dos restantes arames.

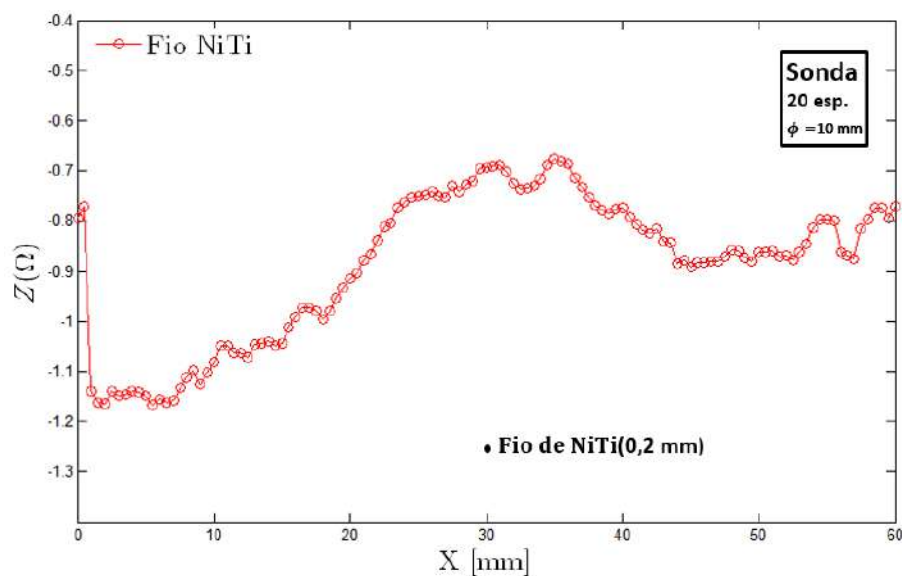


Figura 5.42: Inspeção do arame de NiTi com sonda de 20 espiras.

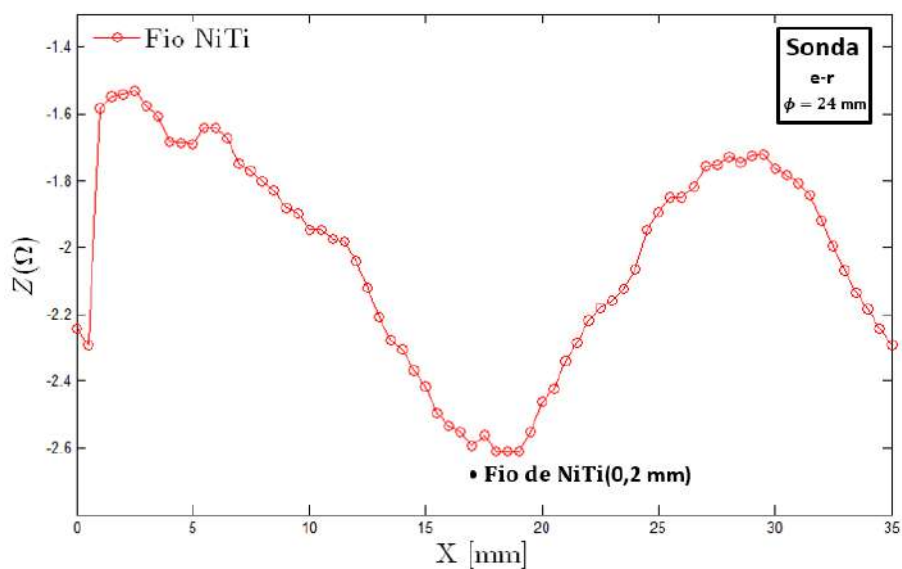


Figura 5.43: Inspeção do arame de NiTi com sonda emissão-receção.

Na inspeção do provete 7, que contém as amostras de fibra de carbono, foram realizados dois ensaios com a sonda de 550 espiras, com uma frequência de 4,5 MHz. Foram realizados dois ensaios, um sobre as três amostras a 1 mm, 2 mm e 3 mm da superfície do provete e outro às amostras a 4 mm e 5 mm da mesma referência. Os respectivos ensaios estão ilustrados nas figuras 5.44 e 5.45.

Conclui-se desta forma que a variação de impedância na zona das amostras até 3 mm de profundidade é evidente, no entanto a mais de 3 mm não são possíveis de detetar.

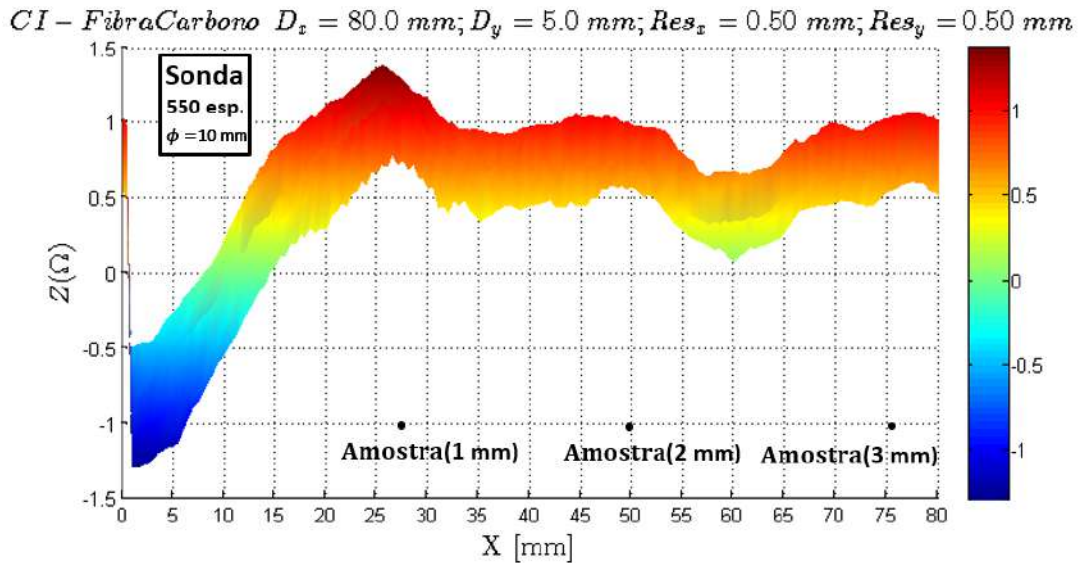


Figura 5.44: Inspeção das amostras a 1 mm, 2 mm e 3 mm da superfície do provete.

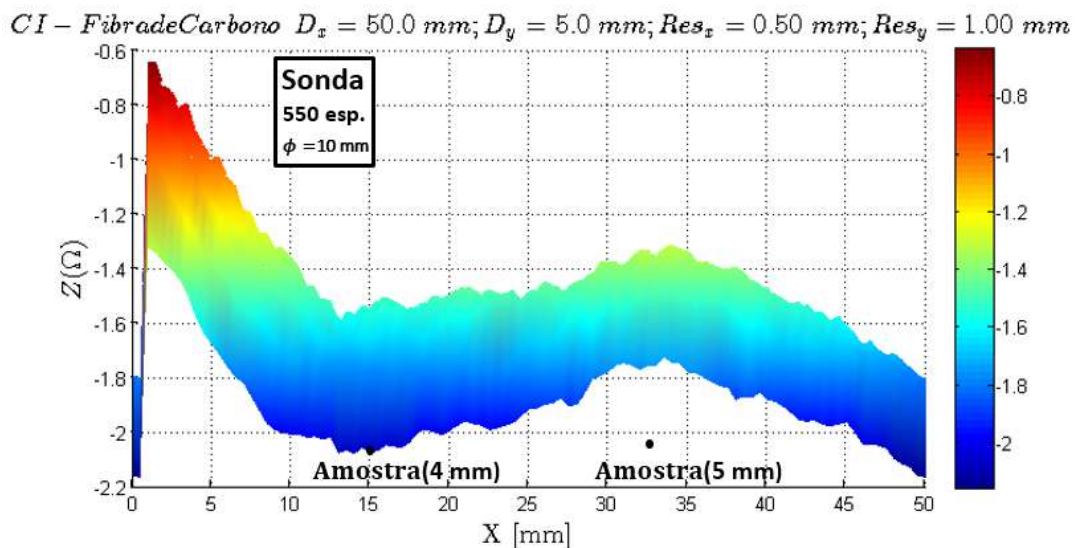


Figura 5.45: Inspeção das amostras a 4 mm e 5 mm da superfície do provete.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Introdução

Este capítulo é dividido entre as conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido e os possíveis desenvolvimentos futuros nas áreas abordadas ao longo deste trabalho.

Embora seja realizada, no capítulo 3, uma análise dos resultados da produção dos provetes, os resultados mais relevantes foram apresentados ao longo do capítulo 5. Deste modo, no presente capítulo pretende-se sintetizar essa informação dando evidência aos fatores mais relevantes que foram obtidos na análise dos ensaios.

6.2 Conclusões

Ao longo desta dissertação foram avaliadas quatro diferentes técnicas de ensaios não destrutivos para inspeção de materiais compósitos produzidos por manufatura aditiva: termografia ativa, radiografia digital, ultra-sons imersos e correntes induzidas.

Dependendo das técnicas, obtiveram-se diferentes resultados na deteção dos defeitos. Deste modo, é apresentada uma revisão dos resultados obtidos em cada um dos casos.

- **Termografia ativa:**

Para esta técnica foi desenvolvida uma estação de ensaios com fontes de calor customizadas, onde foi possível concluir que o modo de transmissão permite obter melhores resultados do que o modo de reflexão. As temperaturas ótimas de inspeção no caso da transmissão variam entre os 26 – 30 °C, já no caso da reflexão variam entre os 28 – 53 °C. Conclui-se também que os melhores resultados obtêm-se com uma lâmpada de infravermelhos de halogéneo com 1300 W.

Com esta técnica foram detetados vazios até 1 mm de diâmetro e até 7 mm de profundidade. O efeito da curvatura revelou-se um fator que dificulta a deteção de vazios que sem a curvatura são perfeitamente detetáveis, onde defeitos com dimensões inferiores a 4

mm e com mais de 3 mm de profundidade são indetetáveis. Foram detetados vazios nos três tipos de polímeros produzidos, PLA, ABS e Nylon.

No provete 6 foi possível detetar o fio de *Kevlar*® com diâmetro variável, mas não o fio de *Kevlar*® com 0,3 mm de diâmetro, nem os fios metálicos nem a fibra de vidro. As amostras de fibra de carbono inseridas foram detetadas até a uma profundidade máxima de 4 mm. Em relação às delaminações foi detetada a zona com massa de lítio a 4 mm de profundidade.

• **Radiografia digital:**

Através dos ensaios de radiografia digital concluiu-se que o tempo ótimo de exposição para o caso em estudo, está entre os 10 ms e os 20 ms.

Com a utilização desta técnica, foi possível detetar vazios até 1 mm de diâmetro. Foi também possível a deteção de vazios nos diferentes polímeros.

Os fios de NiTi, ferro (98 % de ferro), cobre e fibra ótica foram detetados, contrariamente aos fios de *Kevlar*® que permaneceram invisíveis. Deste modo com a termografia é possível detetar o *Kevlar*®, enquanto que com a radiografia digital são detetados os restantes fios. As amostras de fibra de carbono no provete 8 foram indetetáveis.

• **Ultra-sons:**

Através do método de ultra-sons verificou-se que a estratégia utilizada para medição da velocidade do som, e do coeficiente de atenuação acústica, permite obter resultados precisos. Contudo verificou-se que esta técnica não é possível de aplicar aos provetes impressos devido à elevada atenuação acústica dos polímeros utilizados.

Com a técnica de ultra-sons por imersão foi possível fazer um varrimento ao longo do material, e deste modo detetar a variação da amplitude do som refletido nos vazios da face inferior da placa de PEEK. Contudo, esta técnica (com sondas de 2, 4 e 10 MHz) não permite a deteção de vazios nos provetes impressos. Apenas no provete de PLA com enchimento de 100% foi detetado o vazio, com a sonda de 2 MHz, embora com a forma pouco definida.

• **Correntes induzidas:**

Com a sonda em modo de dupla função de 550 e 20 espiras, foi possível detetar os arames de ferro (98 % de ferro) e cobre. Com a sonda de 20 espiras verificou-se uma pequena alteração no valor da intensidade do campo magnético na zona do fio de NiTi até 2 mm de profundidade. Relativamente à sonda em modo de emissão-receção não foi possível detetar nenhum dos fios.

6.3 Propostas para desenvolvimentos futuros

Tendo em conta a dificuldade na deteção dos fios de NiTi, poderá ser desenvolvida uma nova técnica como é o caso da termografia assistida por correntes induzidas. Esta técnica consiste na utilização das correntes induzidas para provocar a excitação térmica do material a inspecionar. Deste modo será possível observar a diferença de temperatura entre o material de reforço e o restante provete, através de uma câmara termográfica.

Tendo em conta os bons resultados do método de raio-x, seria útil adquirir um sistema de *3D Computed Tomography*, que permite uma análise 3D das peças a inspecionar. Esta técnica, permite uma maior facilidade, ao utilizador na inspeção de todo o volume da peça.

No âmbito dos ultra-sons verificou-se que através da utilização da menor frequência (2 MHz) foi possível inspecionar os provetes impressos. Deste modo, é necessário trabalhar com frequências mais baixas. Uma técnica que poderá ser testada são os ultra-sons com acoplamento de ar, onde se utilizam frequências entre os 50 e os 400 KHz. Uma empresa que comercializa este equipamento é a *Sonotec* [30].

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Boschetto, L. Bottini e F. Veniali. "Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining". Em: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 41 (2016), pp. 92–101.
- [2] Y.-s. Chang, Z. Yan, K.-h. Wang e Y. Yao. "Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Non-destructive testing of CFRP using pulsed thermography and multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition". Em: *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 61 (2016), pp. 54–63.
- [3] P. D. Pastuszak. "Characterization of Defects in Curved Composite Structures Using Active Infrared Thermography". Em: *Procedia Engineering* 157 (2016), pp. 325–332.
- [4] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco e G. Pappaletta. "Residual stress measurement in Fused Deposition Modelling parts". Em: *Polymer Testing* (2017), pp. 249–255.
- [5] O. S. Carneiro, A. F. Silva e R. Gomes. "Fused deposition modeling with polypropylene". Em: *Materials and Design* 83 (2015), pp. 768–776.
- [6] M. Nikzad, S. H. Masood e I. Sbarski. "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling". Em: *Materials and Design* 32.6 (2011), pp. 3448–3456.
- [7] N. Li, Y. Li e S. Liu. "Rapid Prototyping of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites by 3D Printing Rapid Prototyping of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites by 3D Printing". Em: *Journal of Materials Processing Technology* 238 (2016), pp. 218–225.
- [8] R. Anitha, S. Arunachalam e P. Radhakrishnan. "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling". Em: *Journal of Materials Processing Technology* 118.1-3 (2001), pp. 385–388. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3.
- [9] A. Katunin, K. Dragan e M. Dziendzikowski. "Damage identification in aircraft composite structures : A case study using various non-destructive testing techniques". Em: *COMPOSITE STRUCTURE* 127 (2015), pp. 1–9.
- [10] S. Wang, Y. Hu, L. Song, Z. Wang, Z. Chen e W. Fan. "Preparation and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposite". Em: *Polymer Degradation and Stability* 77.3 (2002), pp. 423–426.

- [11] Z. Zhang, C. Breidt, L. Chang e K. Friedrich. "Wear of PEEK composites related to their mechanical performances". Em: *Tribology International* 37.3 (2004), pp. 271–277.
- [12] H. P. da Silva. "Comportamento Mecânico de Compósitos de Fibra de Vidro/Epoxy Nano Reforçados". Doutorado. Universidade de Coimbra, 2014.
- [13] C. Meola, S. Boccardi e G. maria Carlomagno. "Composite Materials in the Aeronautical Industry". Em: *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials* (2017), pp. 1–24.
- [14] M. Farvizi, T. Ebadzadeh, M. R. Vaezi, E. Y. Yoon, Y. J. Kim, J. Y. Kang, H. S. Kim e A. Simchi. "Effect of starting materials on the wear performance of NiTi-based composites". Em: *Wear* 334-335 (2015), pp. 35–43.
- [15] Y. Li, Z.-w. Yang, J.-t. Zhu, A.-b. Ming, W. Zhang e J.-y. Zhang. "Investigation on the damage evolution in the impacted composite material based on active infrared thermography". Em: *NDT & E International* 83 (2016), pp. 114–122.
- [16] M. Lizaranzu, A. Lario, A. Chiminelli e I. Amenabar. "Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools". Em: *Infrared Physics and Technology* 71 (2015), pp. 113–120.
- [17] CANEND. *Termografia por Infra Vermelhos*. URL: <http://canend.net/index.php/10-metodos/13-termografia..>
- [18] M. Jolly, A. Prabhakar, B. Sturzu, K. Hollstein, R. Singh, S. Thomas, P. Foote e A. Shaw. "Review of Non-destructive Testing (NDT) Techniques and their Applicability to Thick Walled Composites". Em: *Procedia CIRP* 38 (2015), pp. 129–136.
- [19] H. Nouri, S. Guessasma e S. Belhabib. "Structural imperfections in additive manufacturing perceived from the X-ray micro-tomography perspective". Em: *Journal of Materials Processing Technology* 234 (2016), pp. 113–124.
- [20] E. O. Malheiro. "Implementação do prprocesso de medição por ultra-sons". Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [21] A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, U. Galietti, S. Marzano e M. D. Piccioni. "Characterization of Material Damage by Ultrasonic Immersion Test". Em: *Procedia Engineering* 109 (2015), pp. 395–402.
- [22] H. Ji. "Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material". Em: *Composites Part B* 110.November 2016 (2017), pp. 141–152.
- [23] BQ. *Prusa i3 BQ*. URL: <https://www.bq.com/pt/hephestos-prusa>.
- [24] FLUKE. *Câmera infravermelha Fluke Ti400*. URL: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/thermal-imaging/fluke-ti400.htm?pid=77090>.

- [25] G. Electric. *Krautkramer USM 36 Portable Flaw Detector*. URL: <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/ultrasound/krautkramer-usm-36-portable-flaw-detector>.
- [26] N. Instruments. *USB-6008 Dispositivo de E/S multifuncionais*. URL: <http://www.ni.com/pt-pt/support/model.usb-6008.html>.
- [27] ANSYS. *Electromagnetics*. URL: <https://www.google.pt/search?q=ansys>.
- [28] OLYMPUS. *NORTEC 500 Series*. URL: <http://www.olympus-ims.com/pt/500s/>.
- [29] OLYMPUS. *Material Sound Velocities*. URL: <http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gage/appendices-velocities/>.
- [30] SONOTEC. *Air-coupled Ultrasonic Inspections*. URL: <https://www.sonotec.eu/products/non-destructive-testing/air-coupled-ultrasonic-inspections/>.

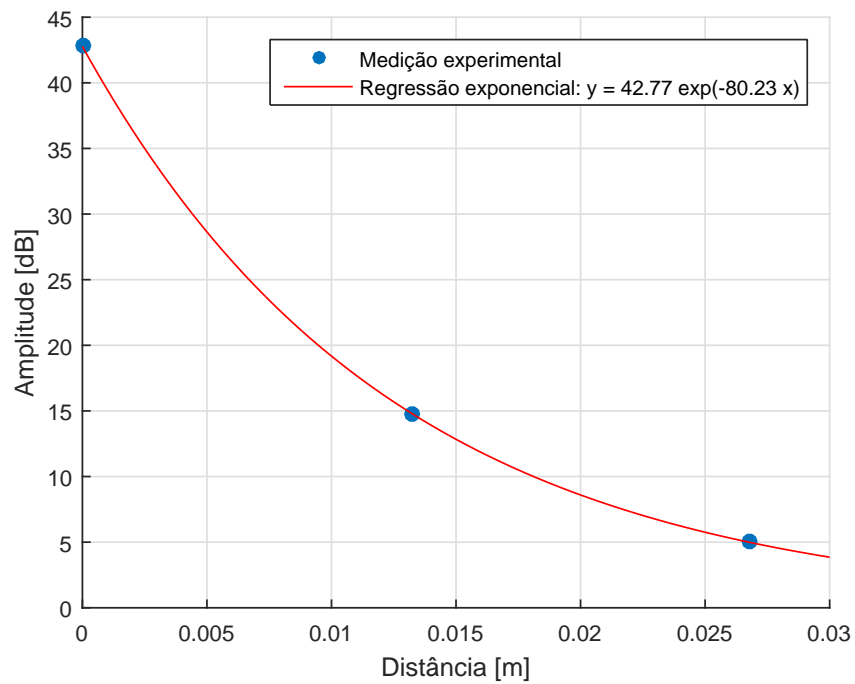


Figura A.1: Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.

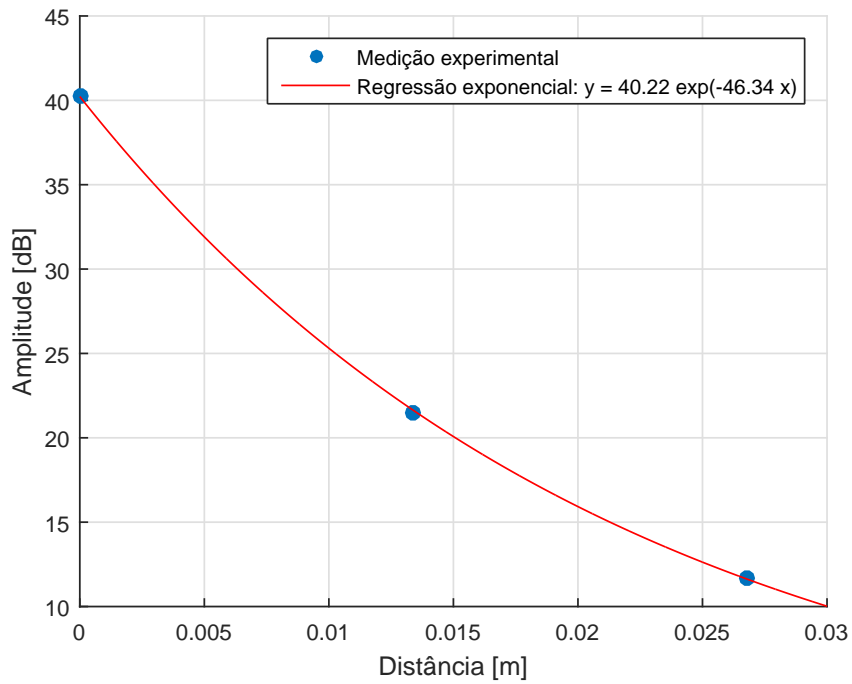


Figura A.2: Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.

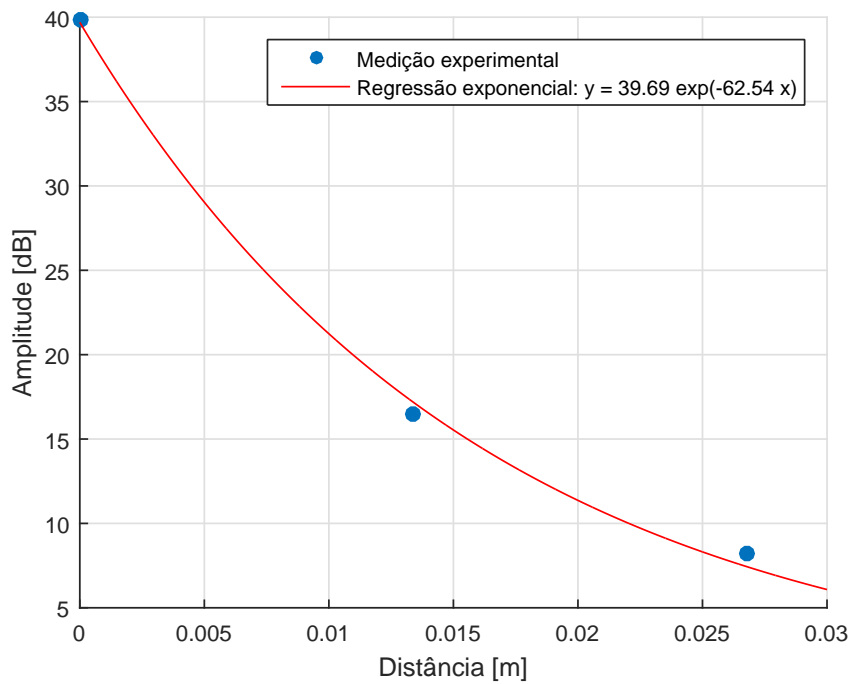


Figura A.3: Taxa de decaimento da vibração sonora para o PEEK com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.

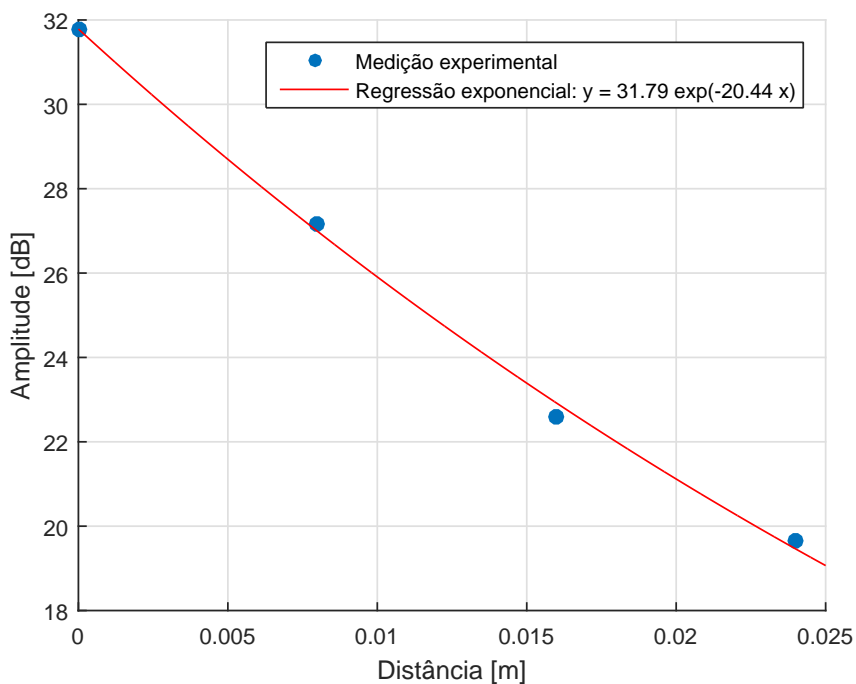


Figura A.4: Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.

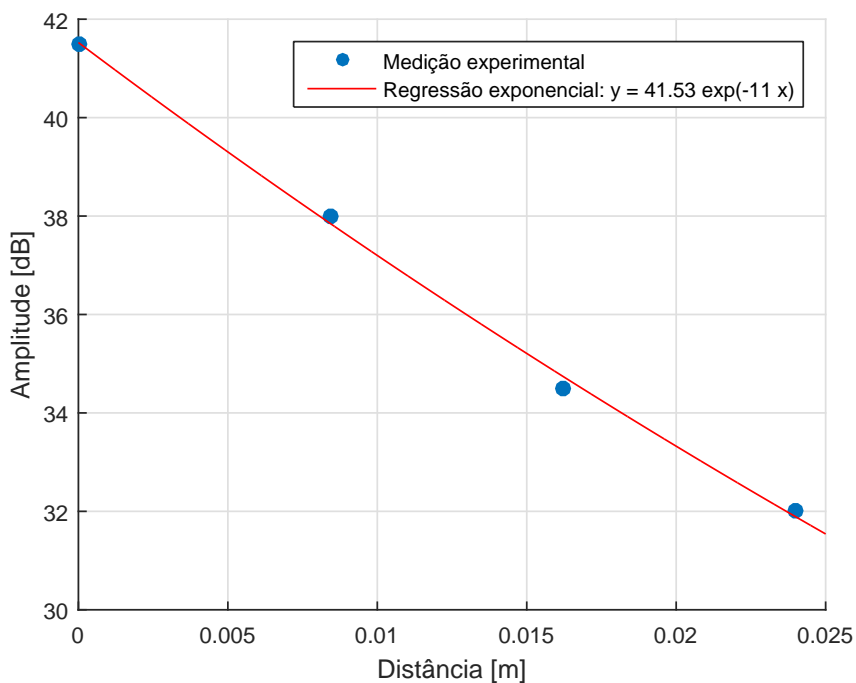


Figura A.5: Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.

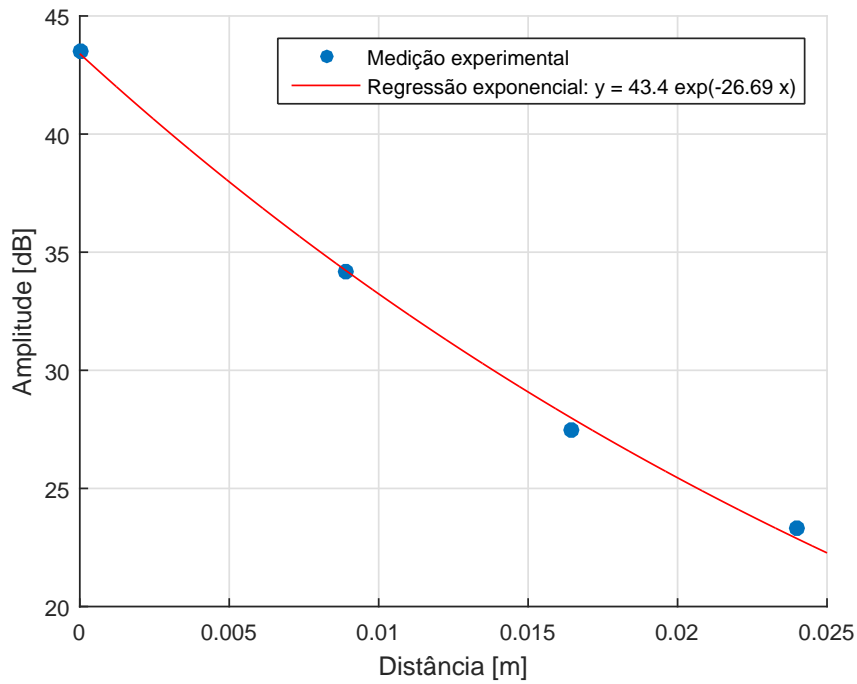


Figura A.6: Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.

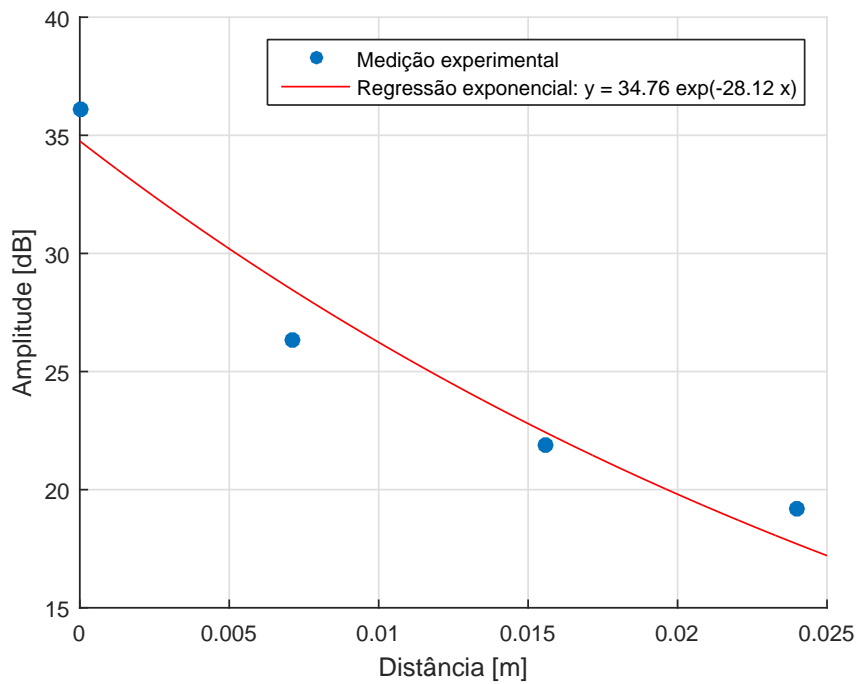


Figura A.7: Taxa de decaimento da vibração sonora para o aço 316L com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.

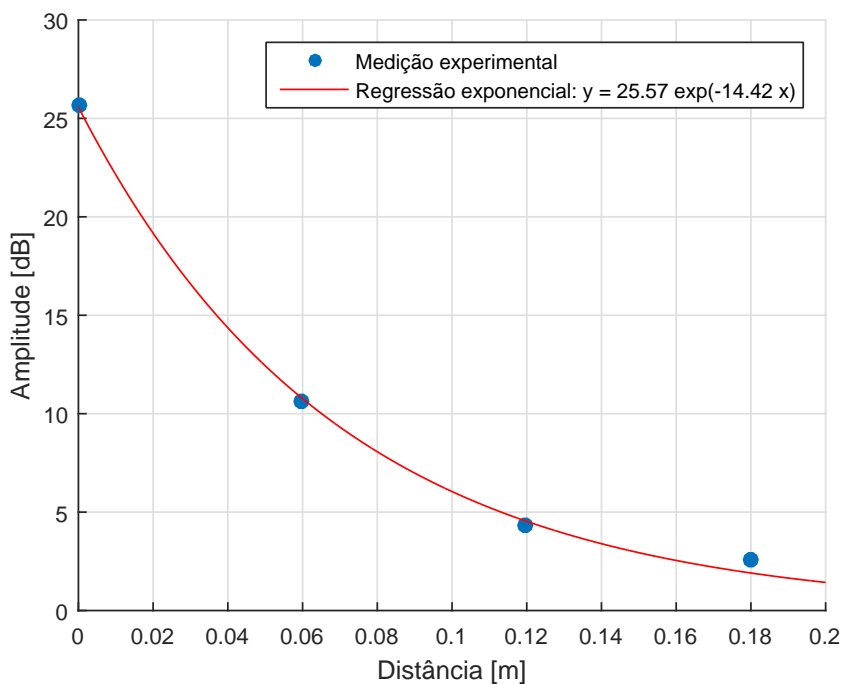


Figura A.8: Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.

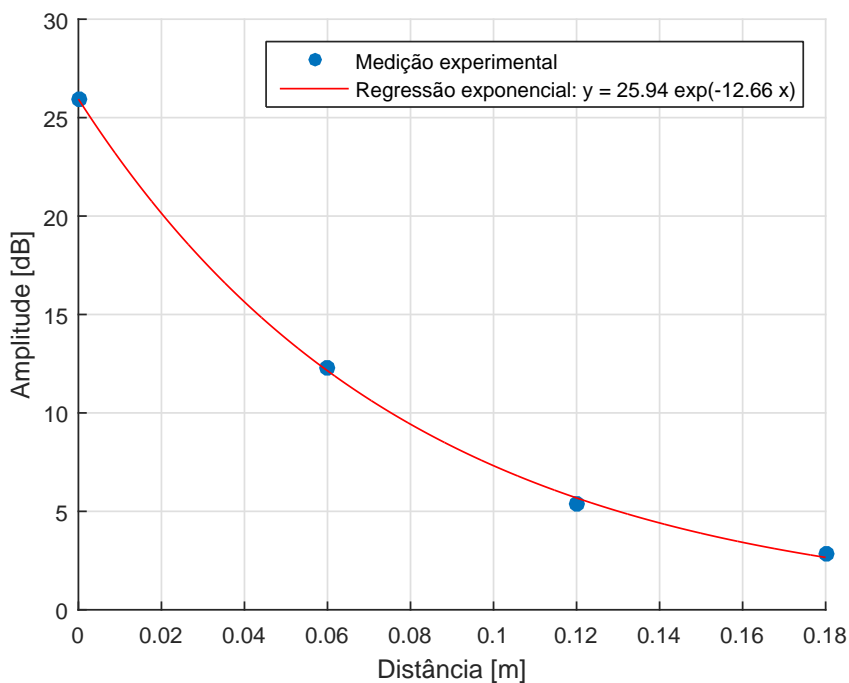


Figura A.9: Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.

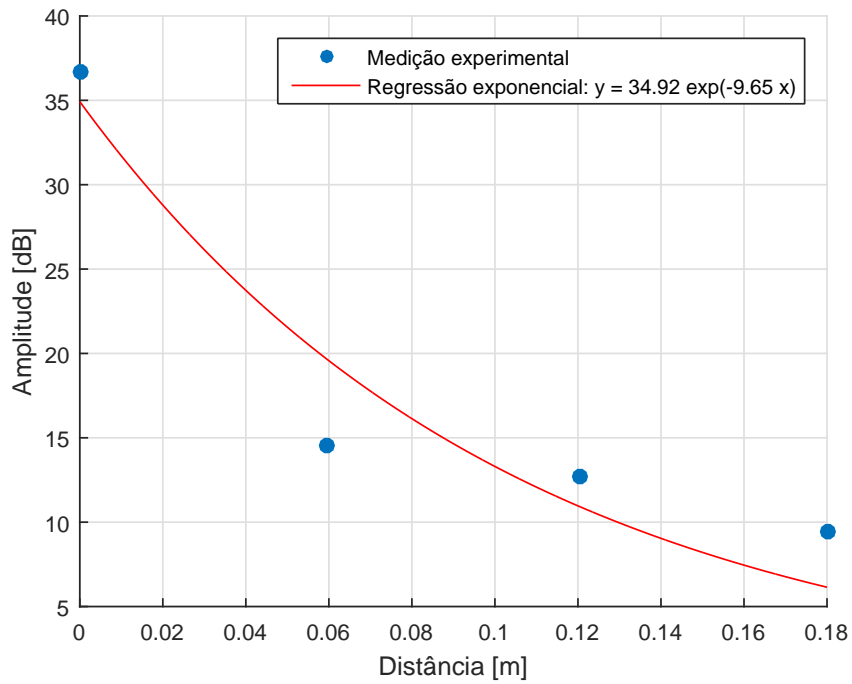


Figura A.10: Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.

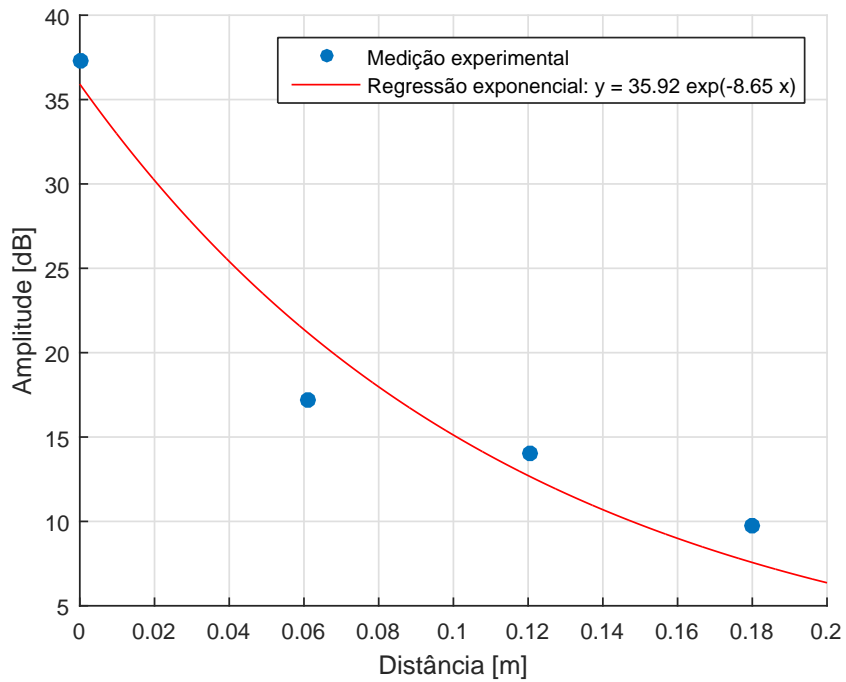


Figura A.11: Taxa de decaimento da vibração sonora para o alumínio com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.

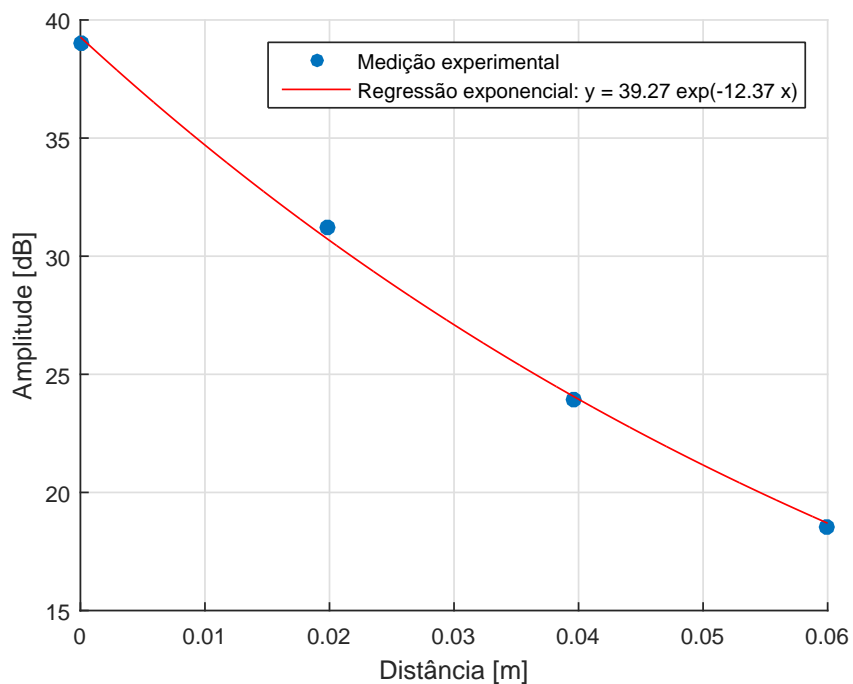


Figura A.12: Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 4 MHz e uma frequência de 4 MHz no equipamento.

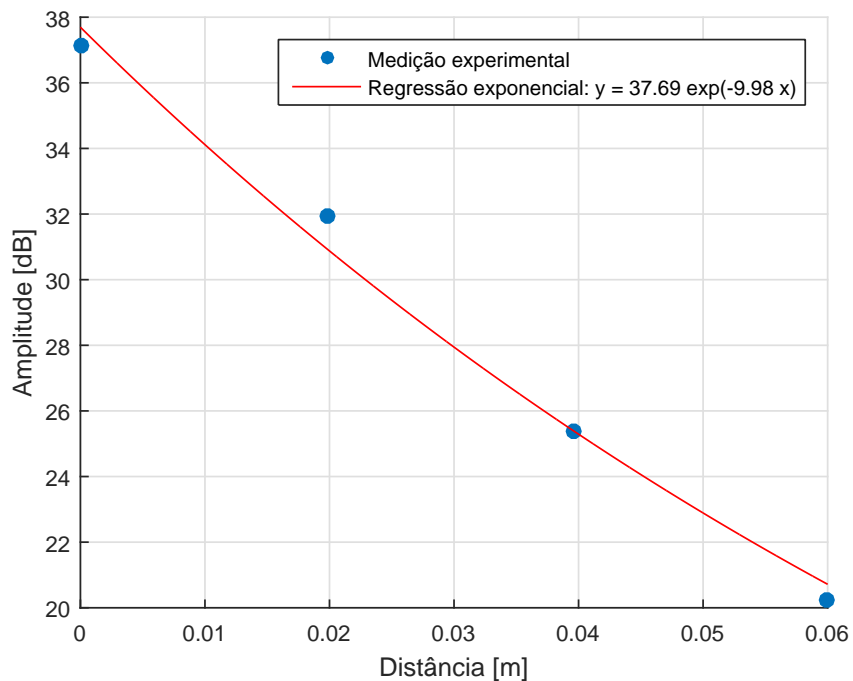


Figura A.13: Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 4 MHz e uma frequência de 5 MHz no equipamento.

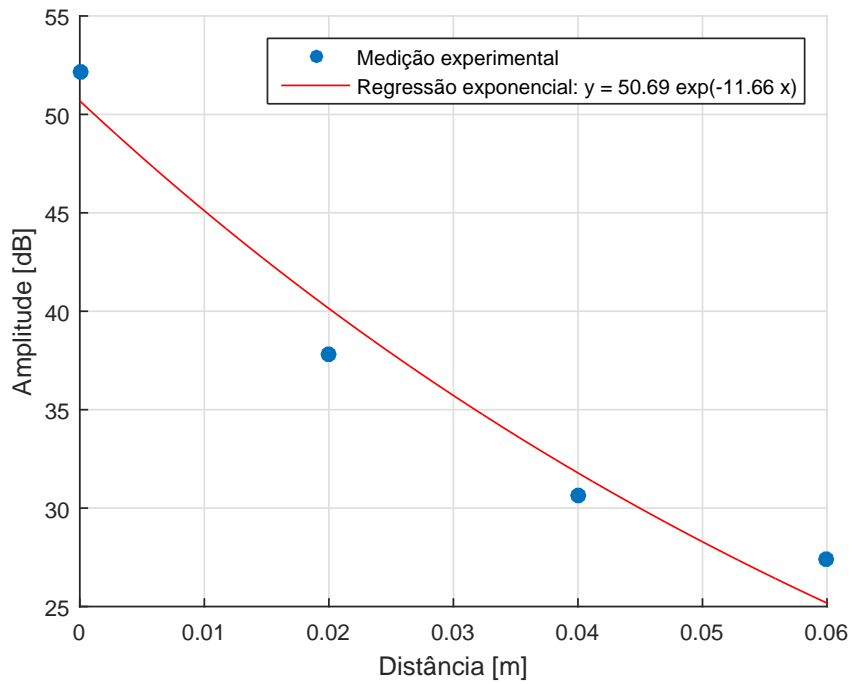


Figura A.14: Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2 MHz no equipamento.

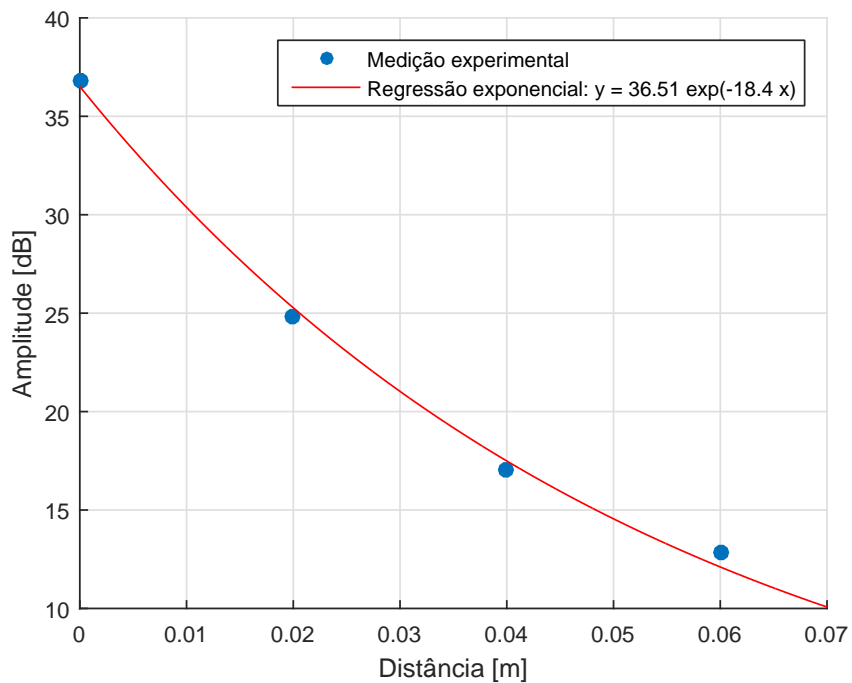


Figura A.15: Taxa de decaimento da vibração sonora para o cobre com sonda de 2 MHz e uma frequência de 2,5 MHz no equipamento.

Resultados Ultra-sons imersos:

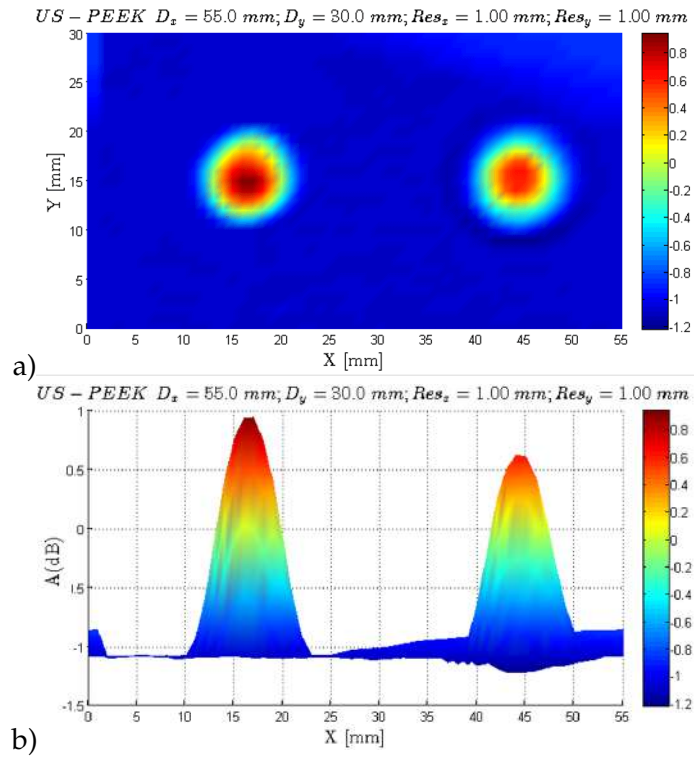


Figura A.16: Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 2 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

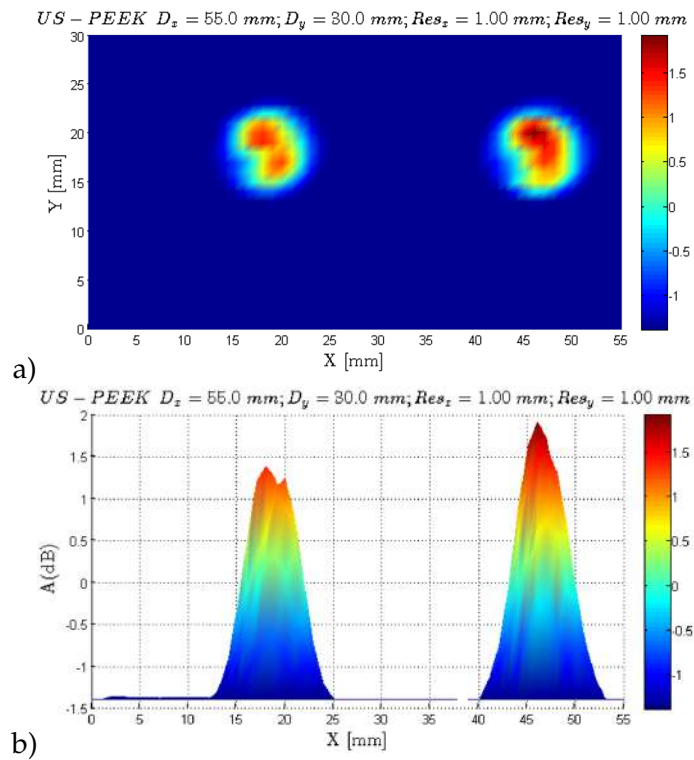


Figura A.17: Inspeção das caixas 1 e 2 com sonda de 10 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

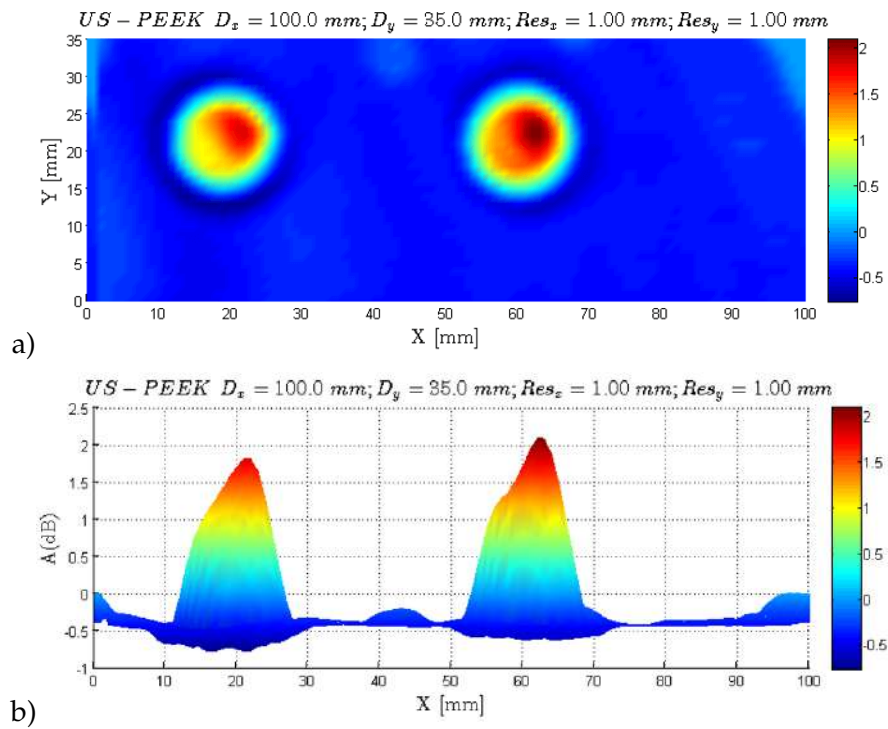


Figura A.18: Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 2 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

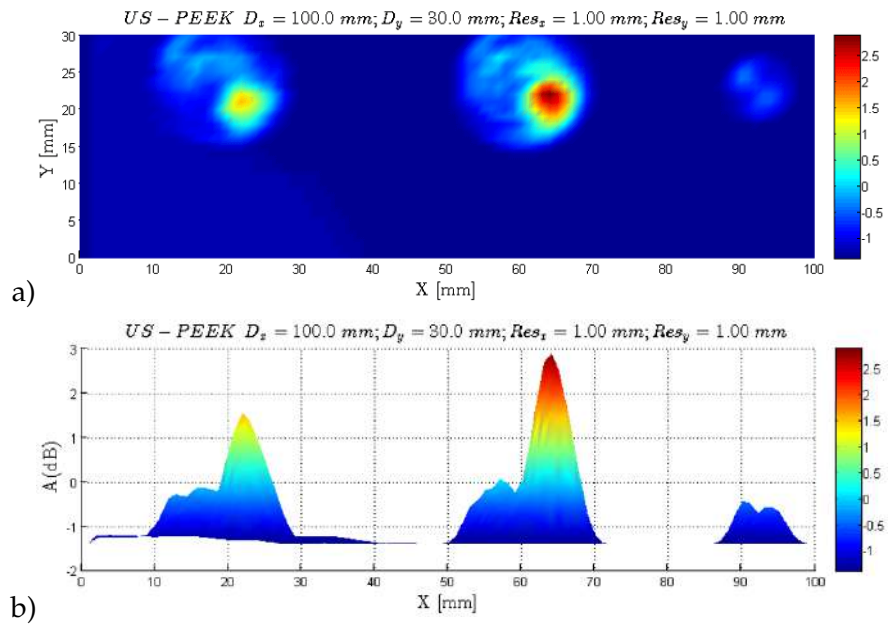


Figura A.19: Inspeção das caixas 2, 3 e 4 com sonda de 10 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

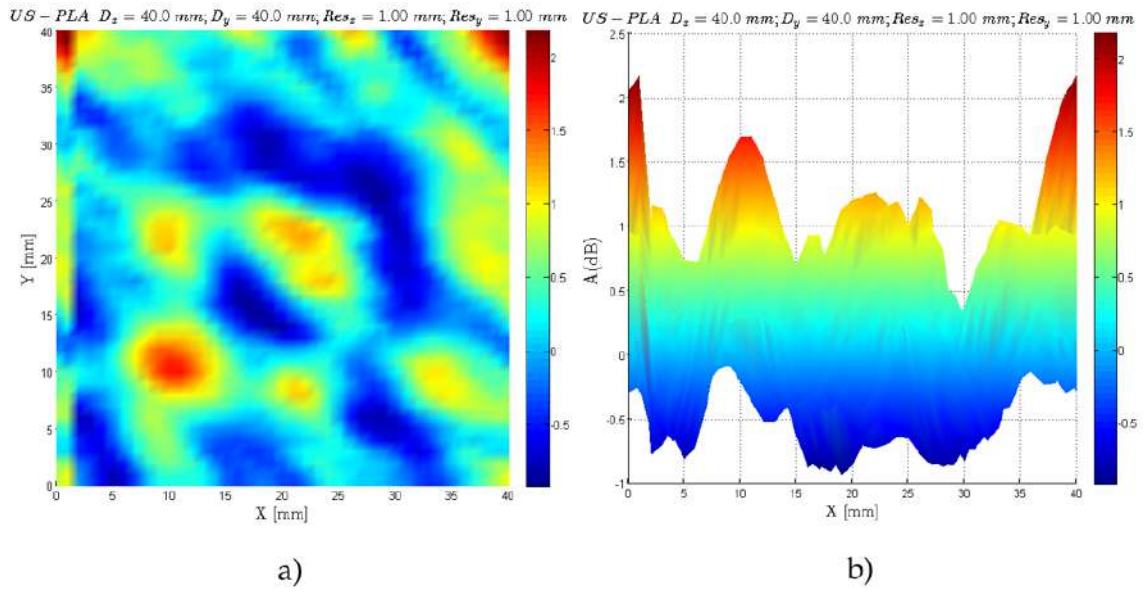


Figura A.20: Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 4 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

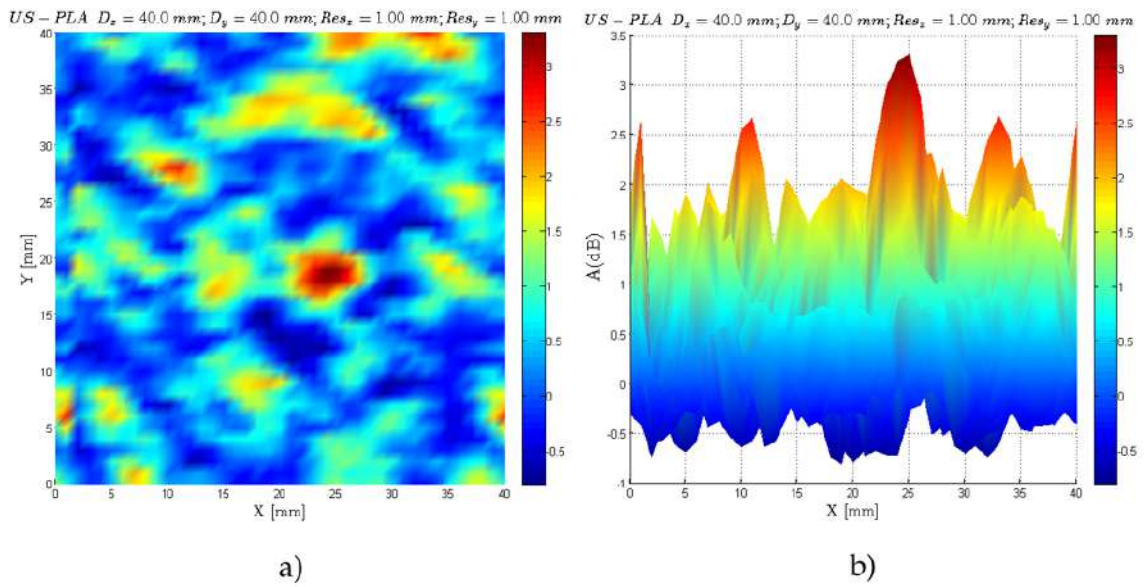


Figura A.21: Inspeção do provete 1 PLA com sonda de 10 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

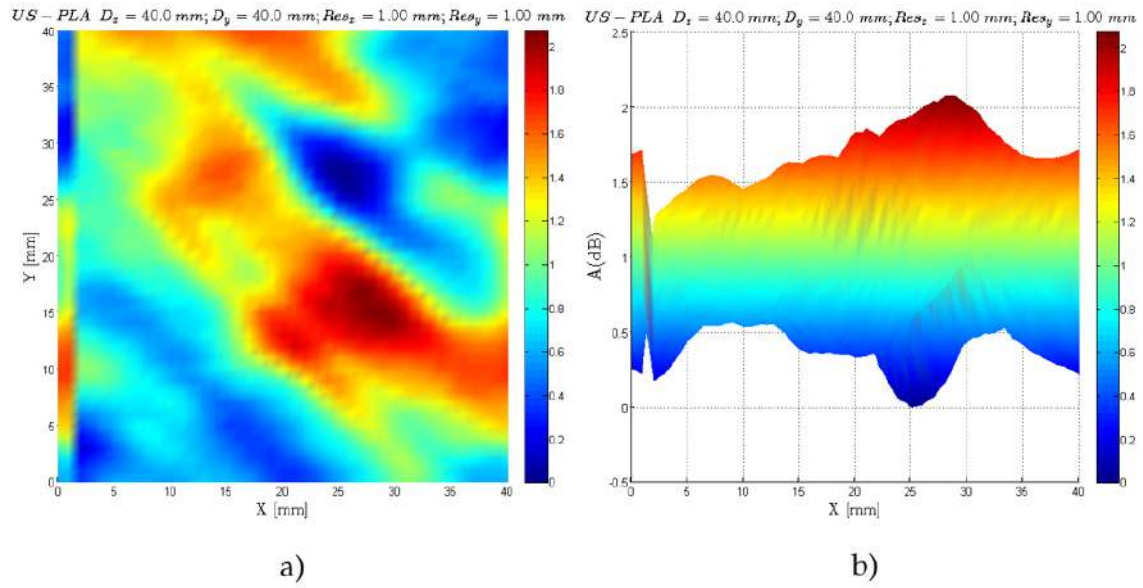


Figura A.22: Inspeção do provete 1 PLA 100% com sonda de 4 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

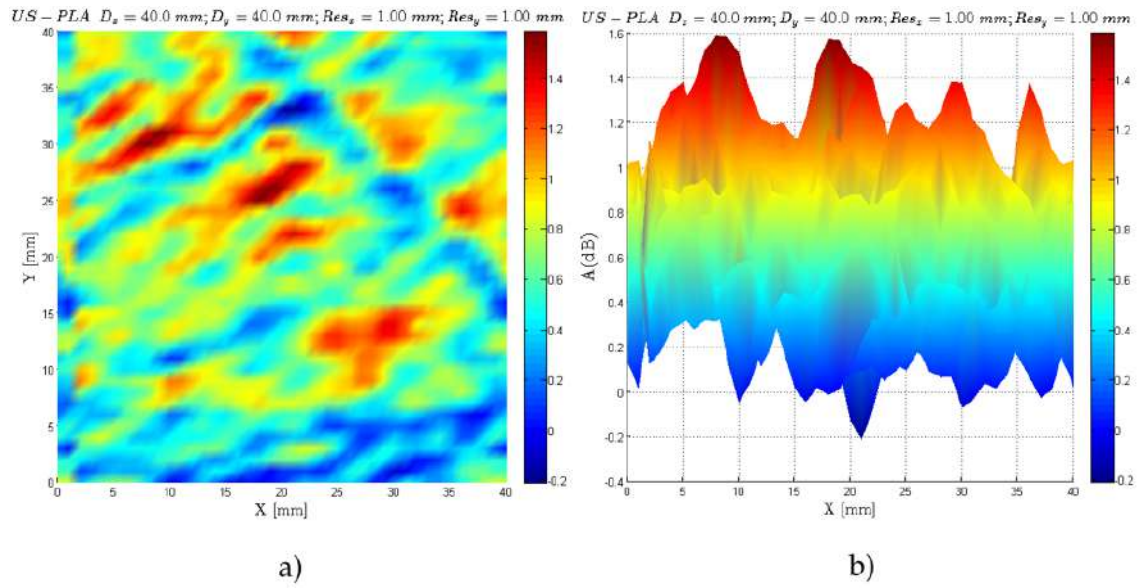


Figura A.23: Inspeção do provete 1 PLA 100% com sonda de 10 MHz
a) imagem C-Scan, b) vista lateral.

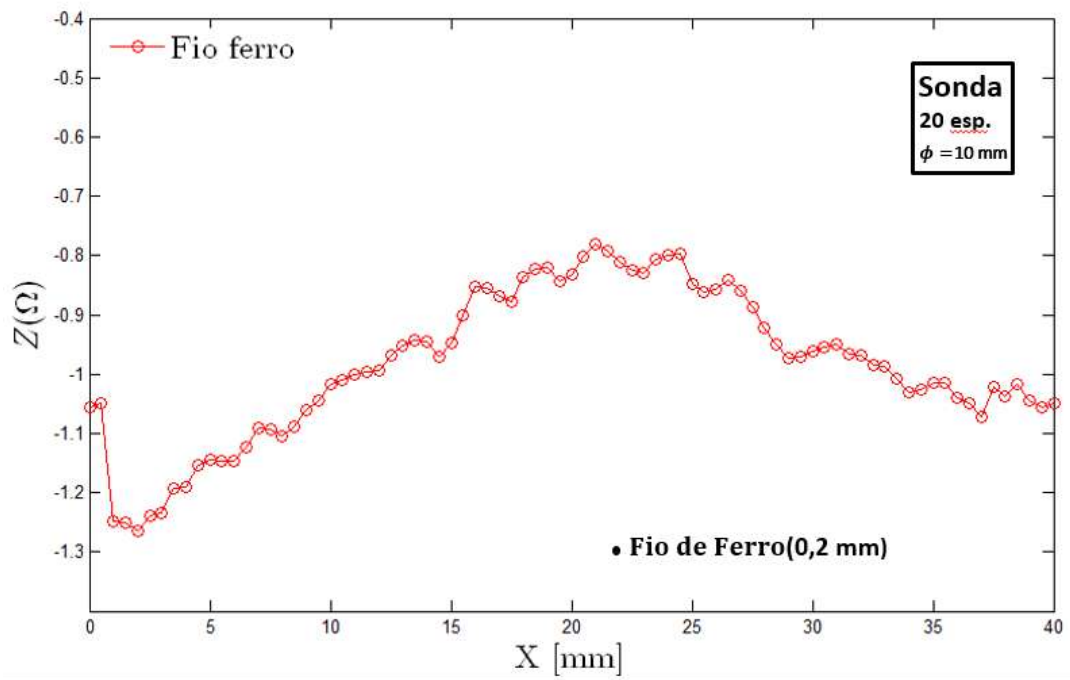


Figura A.24: Inspeção do fio de ferro com sonda em *Bridge* de 20 espiras.

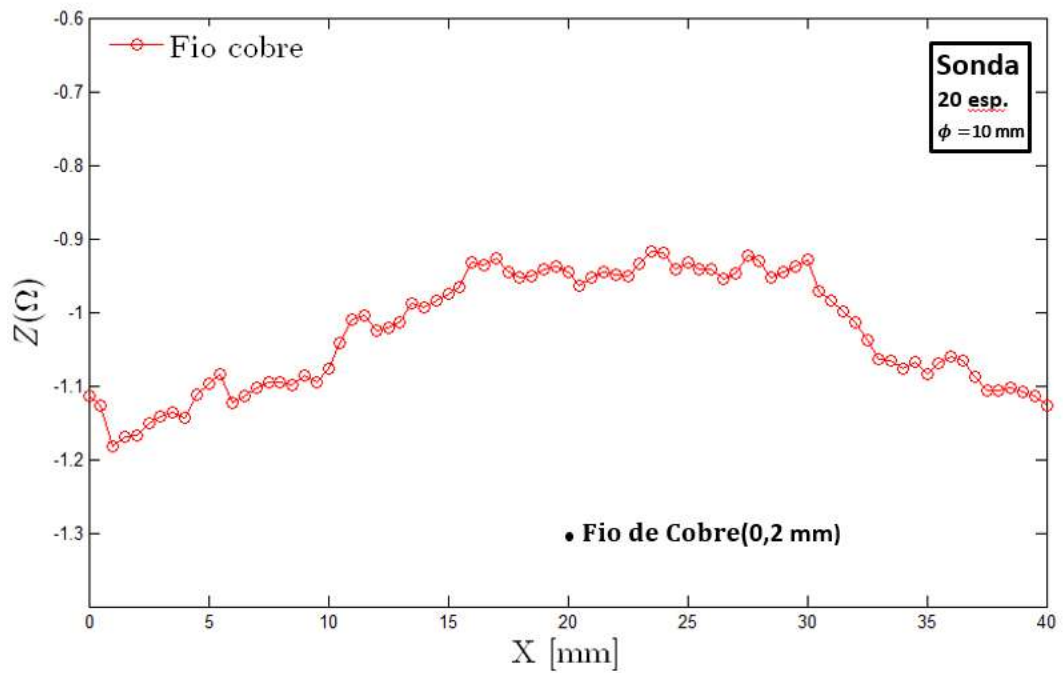


Figura A.25: Inspeção do fio de cobre com sonda em *Bridge* de 20 espiras.

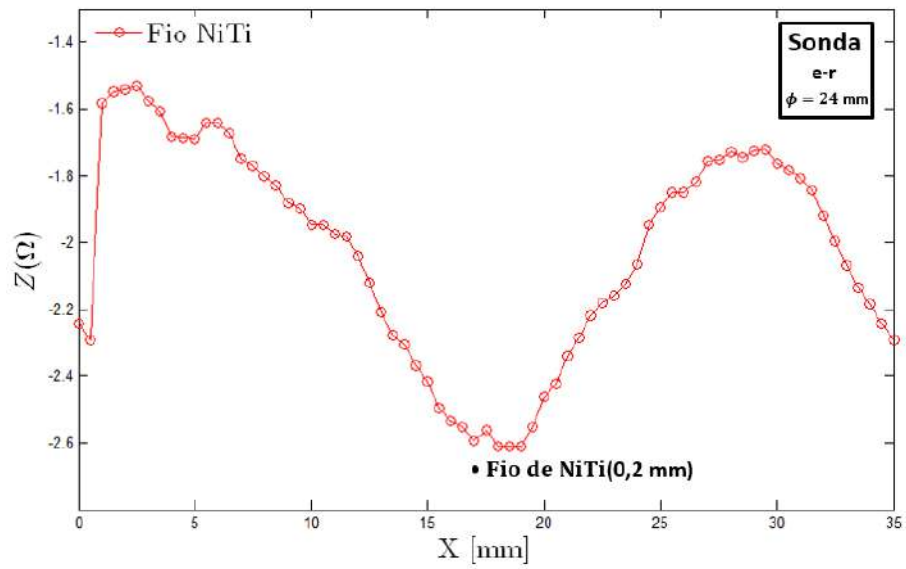


Figura A.26: Inspeção do fio de ferro com sonda emissão-receção.

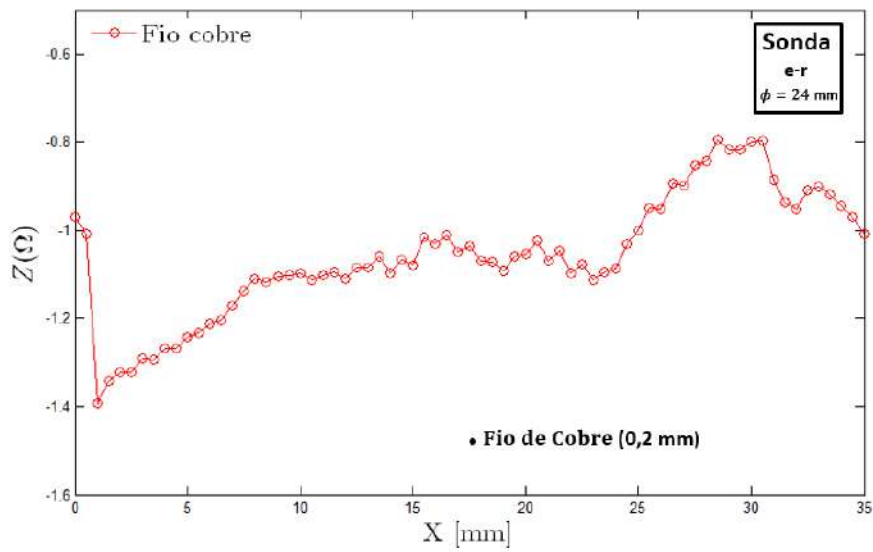


Figura A.27: Inspeção do fio de cobre com sonda emissão-receção.



