



André Francisco Fino Gomes

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Ensaaios Não Destrutivos para
Impressão 3D de Materiais Compósitos
de Matriz Polimérica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Associado com Agregação, FCT
Coorientador: Doutor Miguel Araújo Machado,
Professor Auxiliar Convidado, FCT

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, FCT
Vogais: Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da Silva
Carvalho, Professora Auxiliar, FCT
Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Associado com Agregação, FCT



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2019

Ensaio Não Destrutivo para Impressão 3D de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Copyright © 2019 André Francisco Fino Gomes

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial:

Aos meus orientadores, professores Telmo Santos e Miguel Machado, pela disponibilidade e preocupação demonstrada ao longo de todo este trabalho, pela transmissão de conhecimentos e esclarecimento de dúvidas, pelas críticas e correções transmitidas.

Aos professores e técnicos do núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), que sempre estiveram disponíveis para auxílio, durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos por me terem recebido de braços abertos e por partilharem comigo o espírito de companheirismo vivido dentro daquelas quatro paredes, e por se mostrarem sempre disponíveis a ajudar o próximo. Agradeço em especial, a disponibilidade e ajuda prestada pelos Engenheiros Patrick Inácio e Rui Santos.

Aos meus colegas de curso, em especial, ao Tales Carvalheira, ao Diogo Simões, ao Rafael Costa, ao Rodrigo Antunes, ao Daniel Tomás e ao Rafael Ribeiro, pelo seu apoio e amizade.

Aos amigos de longa data, pelos momentos de distração, mesmo apesar da minha pouca disponibilidade ao longo deste trabalho.

À Micaela, pelo apoio, inspiração e motivação dados nos momentos mais decisivos da realização deste projeto.

À minha família, principalmente aos meus pais e irmão, pelo amor, apoio e motivação dados no dia-a-dia e pela paciência que tiveram em todos os momentos.

Esta tese foi realizada no âmbito do Projeto FIBR3D, ao qual se agradece o apoio financeiro concedido. 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 às instituições que financiaram este projecto.

RESUMO

O recurso a materiais compósitos para produção de peças estruturais, em que um dos principais requerimentos é a reduzida densidade, tem aumentado bastante nos últimos tempos em áreas como a automóvel ou aeroespacial, por exemplo. Como tal, tem crescido a preocupação e o investimento na deteção de possíveis falhas nestes componentes. Sendo os Ensaios Não Destrutivos (END), métodos que inspecionam peças sem alterar as propriedades ou o normal funcionamento destas, torna-se necessário a sua utilização na inspeção destes materiais.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os métodos de Termografia Ativa Pulsada (TAP) e Ultra-Sons sem Contacto (USSC) na identificação de defeitos em peças de Poliacido Láctico (PLA), produzidas pela tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM).

Desevolveram-se bancadas de ensaio para a realização das técnicas TAP e USSC sobre peças de PLA produzidas por FDM contendo defeitos a profundidades diferentes e com várias geometrias e dimensões. Foi também produzido um provete com variação de espessura para avaliar que efeitos tem no ensaio de USSC. Foi avaliada a identificação do alinhamento de reforços colocados entre camadas do material da matriz.

Conclui-se que, na inspeção de delaminações com 0,5 mm de espessura por TAP, o modo reflexão é mais favorável para superfícies planas e o modo transmissão, para superfícies curvas. Apenas foi possível verificar o alinhamento dos reforços de material condutor e, pelo ensaio de TAP com excitação elétrica. Verificou-se que ao contrário da técnica de USSC, a técnica de TAP permitiu diferenciar as delaminações com 0,1 mm de espessura, em relação à sua posição em profundidade. Com duas sondas de 50 kHz fixas a uma distância de 156 mm entre elas, verificou-se que, basta um pequeno aumento da quantidade de material colocado entre estas (1 mm), para fazer aumentar amplitude do sinal, o que pode ser explicado pelo maior valor do coeficiente de atenuação no ar, em relação ao PLA.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios Não Destrutivos (END)

Ultra-Sons sem Contacto (USSC)

Termografia Ativa Pulsada (TAP)

Fused Deposition Modelling (FDM)

ABSTRACT

The use of composite materials for the production of structural parts, which one of the main requirements is a low density, has increased significantly in recent times in areas such as automotive or aerospace, for example. As such, concern and investment in the evaluation of these components has grown, to detect possible failures. The Non-Destructive Testing (NDT) are methods that inspects parts without altering their properties or normal operation so, their use in the evaluation of these materials becomes necessary.

The objective of this work was to evaluate the methods of Active Pulsed Thermography (APT) and Air-Coupled Ultrasound (ACUS) in the identification of defects in Poly(lactic acid) (PLA) parts produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology.

Test structures were developed to perform the APT and ACUS techniques on FDM-produced PLA parts, containing defects at different depths and with various geometries and dimensions. A thickness-varying specimen was also produced to verify the effect that it has on the ACUS method. The identification of the reinforcement fibers alignment, placed between layers of the matrix material was evaluated.

It can be concluded that in the inspection of 0.5 mm thick delaminations, by APT, the reflection mode is more favorable for flat surfaces and the transmission mode for curved surfaces. It was only possible to verify the alignment of the conductor reinforcements and by the APT test with electrical excitation. Unlike the ACUS method, the TAP technique allowed to differentiate the delaminations with 0.1 mm thickness, at different depths. A small variation of material between probes has been shown to vary the signal amplitude, due to the higher attenuation of the wave in the air. With two probes with 50 kHz of frequency in front of each other at a distance of 150 mm, it was seen that a small increase of material between them (1 mm) can increase the signal amplitude, which can be explained by the fact that the attenuation coefficient is higher in the air than it is in the PLA.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing (NDT)

Air-Coupled Ultrasound (ACUS)

Active Pulsed Thermography (APT)

Fused Deposition Modelling (FDM)

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
PALAVRAS-CHAVE	vii
ABSTRACT.....	ix
KEY-WORDS.....	ix
ÍNDICE.....	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA	xvii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Estado da Arte e Motivação	1
1.2 – Objetivo	2
1.3 – Metodologia	3
1.4 – Estrutura da Dissertação	3
2 – ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Material Compósito.....	5
2.2.1 - Aplicações.....	6
2.3 – Fused Deposition Modelling (FDM).....	8
2.3.1 - Parâmetros da tecnologia FDM	9
2.3.2 - Defeitos associados ao processo FDM	11
2.4 - Termografia	11
2.4.1 - Estado da Arte	12
2.5 - Ultra-Sons sem contacto	14
2.5.1 - Campo Próximo	15
2.5.2 - Atenuação Acústica	16
2.5.3 - Estado da Arte	17
3 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA INSPEÇÃO	21
3.1 – Introdução	21
3.2 – Termografia	21
3.2.1 – Requisitos Funcionais	22
3.2.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento.....	22
3.3 – Ultra-Sons	24
3.3.1 – Requisitos Funcionais	25
3.3.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento.....	25
3.4 - Material utilizado na produção dos provetes	27
3.5 - Projeto e produção dos provetes.....	28

3.5.1 - Provete com 3 diferentes espessuras.....	28
3.5.2 - Provete plano com 3 delaminações	29
3.5.3 - Provete curvo com 3 delaminações	29
3.5.4 - Provete plano com 15 delaminações	30
3.5.5 - Provete curvo com 15 delaminações	31
3.5.6 - Provete reforçado com dois arames de NiTi	32
3.5.7 - Provete com delaminação, reforçado com uma fibra de Kevlar e dois arames de Cu	32
3.5.8 - Provete com 3 fitas de PTFE	33
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 – Introdução	35
4.2 – Validação Experimental do ensaio de USSC	35
4.3 – Transmissividade de uma onda sonora através de um provete de PLA	38
4.4 – Provete com 3 diferentes espessuras	39
4.5 – Provete plano com 3 delaminações	40
4.5.1 – Termografia ativa pulsada	40
4.5.2 – Ultra-sons sem contato.....	42
4.6 – Provete curvo com 3 delaminações	44
4.6.1 – Termografia ativa pulsada	44
4.7 – Provete plano com 15 delaminações	47
4.7.1 – Termografia ativa pulsada	47
4.7.2 – Ultra-sons sem contato.....	50
4.8 – Provete curvo com 15 delaminações	50
4.8.1 – Termografia ativa pulsada	50
4.9 – Provete reforçado com dois arames de NiTi	52
4.9.1 – Termografia ativa pulsada	52
4.10 – Provete com delaminação, reforçado com uma fibra de Kevlar e dois arames de Cu	53
4.10.1 – Termografia ativa pulsada	53
4.10.2 – Ultra-sons sem contato	54
4.11 – Provete com 3 fitas de PTFE	54
4.11.1 – Termografia ativa pulsada	55
4.11.2 – Ultra-sons sem contato	56
4.12 - Síntese do capítulo	56
5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	59
5.1 – Introdução	59
5.2 – Conclusões.....	60
5.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos (adaptado de [7])	6
Figura 2.2 - Sensores fabricados em Policaprolactona por FDM [8]	7
Figura 2.3 - Representação esquemática do processo FDM	8
Figura 2.4 - Parâmetros da tecnologia FDM [5]	10
Figura 2.5 - Montagem experimental do ensaio de TAP em modo reflexão [14].....	12
Figura 2.6 - Representação do ensaio de TAP sobre as longarinas com variação de parâmetros [15]	13
Figura 2.7 - Ensaio de TAP sobre as placas planas [15].....	13
Figura 2.8 - Resultado da inspeção das placas por TAP (adaptado de [15])	14
Figura 2.9 – Consequências do campo próximo (adaptado de [17])	15
Figura 2.10 - Gráfico da atenuação acústica (adaptado de [18])	16
Figura 2.11 - Ensaio C-Scan da técnica de USSC com as sondas emissora (Tx) e recetora (Rx) em lados diferentes da amostra [22]	18
Figura 2.12 - Identificação de duas delaminações através do ensaio C-Scan do método USSC [22]	18
Figura 2.13 - Resultado do ensaio C-San de uma peça com variação de espessura [22]	19
Figura 3.1 - Projeto da bancada de ensaios para TAP	23
Figura 3.2 – Peças constituintes do painel matricial de lâmpadas de 20 W	24
Figura 3.3- Resultado final do painel matricial de lâmpadas de 20 W.....	24
Figura 3.4 - Projeto da bancada para a realização de ensaios A-Scan da técnica de USSC.	26
Figura 3.5 - Montagem para realização do ensaio C-Scan da técnica USSC.	26
Figura 3.6 - Provete com 3 espessuras diferentes	28
Figura 3.7 - Provete plano com 3 delaminações	29
Figura 3.8 - Representação da modelação geométrica, realizada em SolidWorks, para impressão do provete curvo com 3 delaminações	30
Figura 3.9 - Visualização da delaminação em forma de triângulo, durante a impressão do provete.....	30
Figura 3.10 - Provete plano com 15 delaminações	31
Figura 3.11 - Provete curvo com 15 delaminações.....	31
Figura 3.12 - Impressão do provete reforçado com dois arames de NiTi.....	32
Figura 3.13 - Impressão do provete com inserção de fibras e de uma fita de PTFE	33
Figura 3.14 - Impressão do provete com inserção de fitas de PTFE	33

Figura 4.1 - Esquema da montagem para realização dos ensaios de USSC	35
Figura 4.2 - Gráficos A-Scan de vários ciclos do sinal entre sonda emissora e recetora	37
Figura 4.3 - Representação da Transmissividade da onda	38
Figura 4.4 - Resultado dos ensaios A-Scan nas diferentes secções do provete	40
Figura 4.5 - Ensaio de TAP em modo reflexão, com lâmpada infra-vermelha com 175 W	41
Figura 4.6 - Ensaio de TAP em modo Transmissão com uma fonte de excitação de 350 W durante 30 s	41
Figura 4.7 - Ensaio de TAP em modo Reflexão com uma fonte de excitação de 350 W, durante 30 s	41
Figura 4.8 – Resultado do ensaio A-Scan com as sondas de 120 kHz nas várias zonas do provete	43
Figura 4.9 - Ensaio de TAP em modo reflexão com aquecimento da superfície côncava.....	45
Figura 4.10 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete.....	45
Figura 4.11 - Ensaio de TAP em modo reflexão com aquecimento da superfície convexa.	46
Figura 4.12 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete.....	46
Figura 4.13 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte e provete, com excitação durante 60 s	47
Figura 4.14 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte e provete, com excitação durante 20 s	48
Figura 4.15 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm, entre fonte com 350 W e provete, com excitação durante 20 s	49
Figura 4.16 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete.....	49
Figura 4.17 – Resultado do ensaio C-Scan com as sondas de 200 kHz	50
Figura 4.18 - Ensaio de TAP com aquecimento do lado convexo do provete.....	51
Figura 4.19 - Ensaio de TAP com aquecimento do lado côncavo do provete.....	51
Figura 4.20 - Resultado do ensaio de Termografia por efeito de Joule, alimentado por uma corrente de 0,5 A durante 1 s	52
Figura 4.21 - Resultado do ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte (175 W) e provete, com excitação durante 20 s.....	53
Figura 4.22 - Resultado do ensaio C-Scan	54
Figura 4.23 - Ensaio de TAP com fonte de excitação de 350 W, durante 30 s.....	55
Figura 4.24 - Resultados do ensaio C-Scan com as sondas de 200 kHz a uma distância entre si de 75 mm	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades dos polímeros mais utilizados em FDM (adaptado de [16])	17
Tabela 3.1 - Requisitos funcionais do equipamento para Termografia	22
Tabela 3.2 - Requisitos funcionais do equipamento para Ultra-Sons	25
Tabela 3.3 - Algumas propriedades dos materiais de reforço	28
Tabela 4.1 - Cálculo do erro entre os valores experimentais e os valores medidos.....	38
Tabela 4.2 - Impedância acústica dos meios envolvidos.....	39
Tabela 4.3 - Valores calculados das diversas reflexões e transmissões da onda.....	39
Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados no ensaio A-Scan	42
Tabela 4.5 – Propriedades de cada par de sondas.....	44
Tabela 4.6 – Vantagens e desvantagens das técnicas de TAP e USSC	57

NOMENCLATURA

N	Campo Próximo [mm]
f	Frequência [Hz]
λ	Comprimento de onda [mm]
L_E	Distância sonda emissora-amostra [mm]
L_R	Distância sonda recetora-amostra [mm]
D	Diâmetro do piezoelétrico [mm]
t	Tempo de onda [s]
c	Velocidade do som [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
d	Distância percorrida pela onda [m]
α	Coefficiente de atenuação acústica [$\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$]
A	Amplitude [dB]
e	Espessura [m]
Z	Impedância acústica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
ρ	Densidade [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CET	Coefficiente de Expansão Térmica
Cu	Cobre
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
MA	Manufatura Aditiva
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NiTi	<i>Nitinol</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PLA	<i>Poly(lactic Acid)</i>
PMC	<i>Polymer Composite Matrix</i>
PMMA	<i>Poly(methyl methacrylate)</i>
PTFE	Poly(tetrafluorethylene)
TA	Termografia Ativa
TAP	Termografia Ativa Pulsada
TP	Termografia Passiva

UNL	Universidade Nova de Lisboa
USSC	Ultra-Sons sem contacto
UV	Ultra-Violeta

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Estado da Arte e Motivação

Os Ensaio Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de descontinuidades em peças e posterior avaliação dos seus defeitos [1]. Estas técnicas têm por base a aplicação de certos princípios físicos, como meio para identificar possíveis defeitos sem, no entanto, alterar as propriedades ou o normal funcionamento das peças.

Algumas indústrias como a automóvel, encontram-se cada vez mais ligadas à consciencialização ambiental, que leva à maior utilização nos seus componentes de materiais *eco-friendly* e renováveis [2], como os compósitos de matriz polimérica. Os compósitos são materiais multifásicos que apresentam propriedades oriundas de todas as fases constituintes (Princípio da ação combinada) [3]. A utilização destes materiais prende-se com a combinação de propriedades como, elevada resistência mecânica e reduzida densidade.

Um dos métodos mais comuns de produção desses compósitos por manufatura aditiva (MA) é a tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM). Esta tecnologia consiste na deposição por camadas, de material que se encontra sobre a forma de filamento e que é aquecido, sendo posteriormente extrudido quando alcançado o seu ponto de fusão. Esse material volta rapidamente ao estado sólido, depois de depositado sobre uma plataforma, devido às suas

propriedades termoplásticas [4]. Porém esta tecnologia envolve vários parâmetros [5] e as alterações que podem ocorrer nestes, durante o processo de produção, podem provocar diversos defeitos nas peças [4], tais como delaminações, vazios e a existência de porosidades.

A produção de compósitos por MA permite combinar as melhores propriedades físicas com um processo de produção automatizado no entanto, com a introdução de novos processos e materiais de produção, surgem novos defeitos o que leva à necessidade de adaptar ou desenvolver técnicas de END para estes materiais.[6].

As técnicas de END escolhidas tiverem por base alguns fatores como a matriz utilizada na produção dos provetes (Polyactic Acid ou PLA), a possibilidade de realizar os ensaios sem contato direto com as amostras a inspecionar, o facto de se poder obter uma imagem da peça com os defeitos presentes no seu interior. De acordo com estes fatores, foram então utilizadas as técnicas de Ultra-sons sem contacto (USSC), ou com acoplamento de ar, e de Termografia Ativa Pulsada (TAP).

O princípio de funcionamento dos END por ultra-sons (US) baseia-se na transmissão de ondas sonoras de elevada frequência (superiores a 20 kHz) nas peças a inspecionar. Estas ondas ao incidir numa interface (zona de separação entre meios diferentes) refletem-se, e quando recebidas pelas sondas permitem identificar e localizar defeitos. Esses defeitos são detetados, desde que o comprimento de onda dos US seja inferior à dimensão do defeito, para que a reflexão ocorra no mesmo.

O princípio de funcionamento dos END por termografia, consiste na incidência de pulsos térmicos na peça a inspecionar, verificando através de uma câmara de infravermelhos, a alteração da temperatura no material, sendo que a presença de um defeito na peça altera a condução do calor nesse local, o que permite identificar e localizar possíveis defeitos através da diferença de temperaturas com o resto da peça.

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho foi investigar a aplicabilidade das técnicas de END de Termografia Ativa Pulsada e Ultra-sons sem contacto para a identificação de defeitos internos (delaminações) em componentes de material compósito de matriz polimérica, produzidos por *Fused Deposition Modelling*. Pretendeu-se, com as mesmas técnicas, verificar o alinhamento de fibras de reforço inseridas no interior desses componentes.

Para alcançar estes objetivos definiu-se a necessidade de criação de meios laboratoriais adequados para a realização de ensaios com o intuito de, através da alteração dos parâmetros das várias técnicas, avaliar a variação do contraste entre a zona do defeito e resto dos componentes.

Pretendeu-se investigar a influência da curvatura na superfície de componentes, na identificação de defeitos internos.

1.3 – Metodologia

No sentido de atingir os objetivos propostos foram produzidos por FDM, um total de 8 provetes, tendo como matriz o PLA, de modo a serem inspecionados pelos métodos de TAP e USSC. Os provetes foram produzidos de acordo com os diferentes objetivos definidos: avaliar a identificação de delaminações com diferentes geometrias e espessuras, verificar o alinhamento de fibras de reforço inseridas entre camadas de material, verificar a alteração na identificação de defeitos devido à curvatura de uma peça, verificar a alteração do sinal de uma onda com a variação da quantidade de material entre duas sondas de ultra-sons.

Foram construídas bancadas de ensaio com perfil Bosch para a realização dos ensaios de END, de acordo com os requisitos funcionais de ambas as técnicas de inspeção estudadas neste trabalho.

Para o ensaio de TAP foi necessário construir uma área de trabalho estável que permita variar facilmente os parâmetros do ensaio (tempo de excitação, distância fonte-provete, distância câmara-provete, etc.) e apoiar e fixar as diferentes fontes de excitação, os diferentes provetes e as câmaras termográficas.

Para o ensaio A-Scan da técnica de USSC foi necessário construir uma área de trabalho estável que permita variar facilmente os parâmetros do ensaio (distância sondas emissora-recetora, distância sondas-provete, etc.) e apoiar e fixar os diferentes pares de sondas e as diferentes amostras.

1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

No Capítulo 1, realiza-se uma introdução ao trabalho e aos objetivos e motivações que levaram à sua realização.

No Capítulo 2, apresenta-se um enquadramento científico da matéria abordada e expõe-se algum do trabalho já desenvolvido na área por diversos autores, de modo a perceber os passos tomados ao longo deste documento. Em 2.2 aborda-se a utilidade dos materiais compósitos e possíveis aplicações, em 2.3 apresenta-se a técnica de MA denominada por FDM e os parâmetros e defeitos associados ao mesmo, em 2.4 e 2.5 descrevem-se as técnicas de END abordadas bem como alguns resultados de outros autores.

No Capítulo 3, descreve-se o trabalho realizado de origem, desde a concepção até à construção de todos os componentes necessários à realização das diferentes técnicas de ensaios não destrutivos abordadas. Em 3.2 e 3.3 descreve-se o trabalho desenvolvido para a realização das técnicas de Termografia e Ultra-Sons, respectivamente. Em 3.4 descreve-se os vários materiais utilizados na produção dos provetes. Em 3.5 foca-se no projeto e produção dos provetes que foram examinados pelas diferentes técnicas.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais e realiza-se uma discussão acerca dos mesmos. Em 4.2 encontra-se a teorização do ensaio A-Scan e o modelo analítico do mesmo. Em 4.12 encontra-se uma síntese com as principais conclusões retiradas sobre cada uma das técnicas.

No Capítulo 5, retiram-se as conclusões relativas aos resultados apresentados no capítulo anterior e apontam-se os possíveis seguintes passos para a continuação da investigação na mesma área.

2 – ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO

2.1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma revisão sobre os materiais compósitos e os principais tipos de falha associados a estes, e sobre a tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM), processo que permite a produção de compósitos, pertencente à família da Manufatura aditiva (MA) e ainda os diversos parâmetros do processo.

Abordam-se também as técnicas de Ensaio não destrutivo (END) a ser utilizadas durante este trabalho, bem como alguns dos estudos mais recentes realizados sobre cada uma destas técnicas.

2.2 – Material Compósito

Para muitas aplicações são necessárias combinações de propriedades num mesmo componente que, à partida, parecem “contraditórias”, como por exemplo: elevada resistência mecânica e tenacidade, juntamente com baixa densidade. Como tal, houve a necessidade de se produzir sinteticamente outro tipo de materiais denominados de compósitos.

Em geral, tal como é ilustrado na Figura 2.1, os materiais compósitos possuem dois constituintes, uma matriz contínua que é reforçada por fibras de reforço.

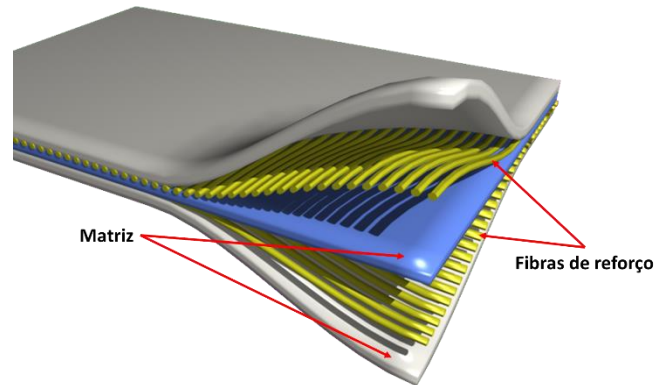


Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos (adaptado de [7])

Quando essa matriz é constituída por polímeros, os materiais denominam-se por compósitos de matriz polimérica.

2.2.1 - Aplicações

De acordo com Xin Wang et al.[8], os compósitos de matriz polimérica podem ter várias áreas de aplicação, que segundo os autores são as seguintes:

➤ **Biomédica:** Com o desenvolvimento dos processos de Ressonância Magnética e de Tomografia Computorizada, foi possível ter acesso a imagens com melhor resolução dos tecidos e órgãos do corpo humano. Devido à utilização destas técnicas recentes é possível reproduzir com maior fiabilidade, os componentes que vão ser aplicados nesta área. Os materiais utilizados são polímeros derivados de produtos naturais (gelatina, colagénio, etc.) ou moléculas sintéticas de polímeros (Polietilenoglicol, *PLGA*, álcool polivinílico, etc.), devido às suas boas qualidades de impressão, à biocompatibilidade com o corpo humano, à biodegradabilidade. Para aumentar as propriedades mecânicas e estruturais destes componentes, são introduzidos reforços como partículas de vidro, fosfatos de cálcio (Hidroxiapatita e Fosfato tricálcio), grafeno, etc.

➤ **Eletrónica:** O uso de tecnologia de impressão 3D permite a produção de protótipos eletrónicos, geometricamente apropriados e com tempo de desenvolvimento reduzido. Quando combinados com materiais condutores elétricos, os compósitos de matriz polimérica impressos são capazes de funcionar como dispositivos eletrónicos que podem ser utilizados de várias

maneiras. Sensores eletrônicos, como os sensores piezoresistivos ou sensores capacitivos foram fabricados através da técnica de impressão FDM, cujos resultados se encontram ilustrados na Figura 2.2. Os sensores piezoresistivos sofrem flexão mecânica através da alteração de resistências elétricas, e os sensores capacitivos podem ser impressos como parte de dispositivos de interface personalizados ou incorporados em embarcações inteligentes para detetar a presença e ausência de água. Esses sensores funcionais demonstraram a promissora aplicação da MA para produção de dispositivos eletrônicos.

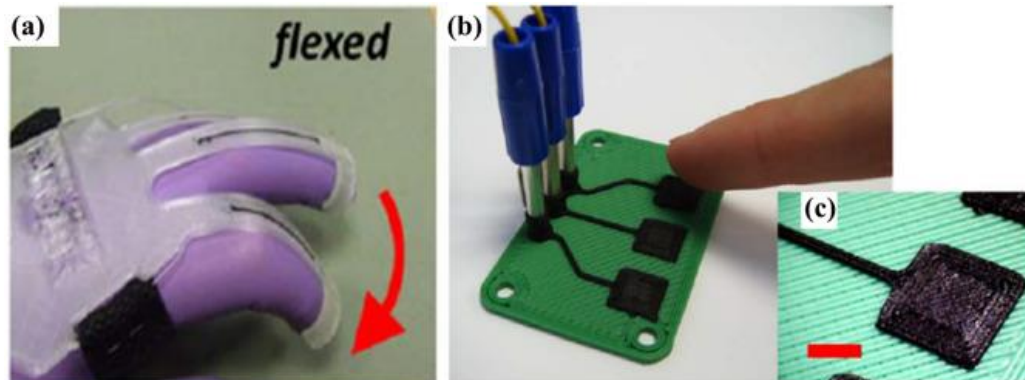


Figura 2.2 - Sensores fabricados em Policaprolactona por FDM [8]
a) Sensor Piezoresistivo, b) Sensor capacitivo, c) Vista de Pormenor de b).

➤ **Aeroespacial:** A maioria dos componentes aeroespaciais têm geometrias complexas que são dispendiosas para serem fabricados pelos métodos convencionais, portanto a MA é altamente adequada para o desenvolvimento desses componentes. Até agora, a maioria dos componentes aeroespaciais como o escape do motor e as pás das turbinas são produzidos por MA com materiais metálicos, pois os metais são geralmente mais fortes e suportam temperaturas mais elevadas do que os polímeros.

Recentemente, vários institutos de pesquisa começaram a explorar a aplicação MA de compósitos de matriz polimérica em componentes aeroespaciais, devido à eficiência de combustível causada pelo uso deste tipo de materiais. Foram produzidos componentes com perfil alar e hélices com compósitos de fibra de vidro e de fibra de carbono reforçados com fotopolímero usando um sistema de MA, assistida por UV [8].

A elevada fidelidade das réplicas do modelo digital e excelente reprodutibilidade foram conseguidas usando estes materiais para produzir componentes aeroespaciais. A excelente ligação entre camadas sucessivas de material favorece as boas propriedades mecânicas nos componentes produzidos por MA. As peças de material compósito fabricado suportam temperaturas até 250 °C e são 50% mais leves do que as peças de alumínio tradicionais, mantendo no entanto, dois terços da rigidez do alumínio [8].

2.3 – Fused Deposition Modelling (FDM)

A manufatura aditiva engloba os métodos de produção que constroem objetos através da adição sucessiva de camadas de material, ao contrário de métodos subtrativos como a maquinagem, que remove o material até se obter uma forma final.

Este processo de fabrico baseia-se na deposição sequencial de material que permite a criação de estruturas complexas, sem utilização de moldes e ferramentas caras e realizada rapidamente, controlando vários fatores como, composição, forma geométrica e funcionalidade, através de *softwares* computacionais (CAD), fatores esses que não são possíveis de obter através dos métodos convencionais [9], [10].

A técnica mais comum de manufatura aditiva de compósitos é realizada através da extrusão de materiais termoplásticos e é denominada por *Fused Deposition Modelling*. Isto deve-se à sua simplicidade e potencial de aplicação [11]. A tecnologia FDM constrói peças, camada por camada, através do aquecimento e extrusão dos materiais de deposição, de forma controlada e automatizada.

Existem várias técnicas para produção de compósitos via tecnologia FDM, o material da matriz e o material de reforço podem-se encontrar separados e ser apenas unidos no bloco de extrusão, aquando da fusão do filamento da matriz ou, o material de reforço pode encontrar-se já impregnado na matriz e encontrarem-se sobre a forma de filamento, cuja representação se encontra na Figura 2.3, como já é realizado e comercializado por algumas marcas [12].

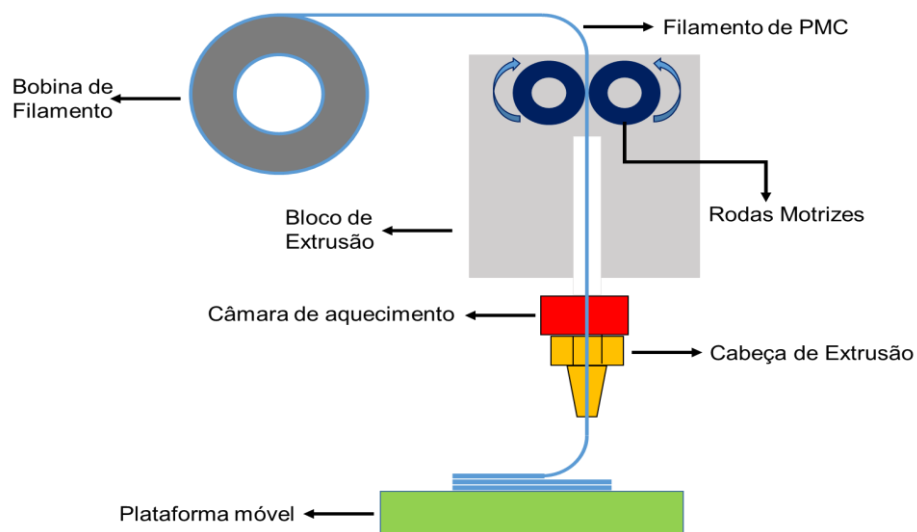


Figura 2.3 - Representação esquemática do processo FDM

A tecnologia FDM utiliza materiais termoplásticos de alto desempenho, que fornecem a base para o alto desempenho de sistemas compósitos, e permite a utilização de uma larga gama de reforços ou de materiais de enchimento, que podem ser partículas, fibras pequenas ou mesmo fibras contínuas [9]. Esta capacidade de incorporar reforços de fibra longos e contínuos melhora a resistência à tração dos compósitos pois, os compósitos reforçados por pequenas fibras ou por partículas são de qualidade [9],[10].

As tecnologias de MA são bem reconhecidas pela sua capacidade de fornecer uma liberdade de projeto incomparável, em relação aos métodos convencionais de produção. A adição de reforços de fibra às peças impressas elevou o seu desempenho a um nível superior, mas este desempenho ainda é limitado pela natureza do processo de camada por camada.

É também uma tecnologia bastante escalável, com sistemas comerciais disponíveis que variam desde as dezenas de centímetros até às dezenas de metros, na sua maior dimensão [10].

Permitindo a um sistema de MA o acesso a materiais com diversidade de propriedades físicas, a possibilidade de fabricar estruturas 3D multi-funcionais torna-se realidade, como por exemplo a criação de objetos que possuam secções flexíveis e rígidas [11].

Dito isto, seja para a utilização em estruturas ou na produção de ferramentas, a MA não vai necessariamente substituir os métodos convencionais de produção de compósitos, nem é essa a intenção. Na maioria dos casos, os melhores resultados podem ser atingidos utilizando a MA de modo a complementar os métodos convencionais, por forma a capitalizar as vantagens de cada um e evitar as suas limitações.

2.3.1 - Parâmetros da tecnologia FDM

Os parâmetros da tecnologia FDM foram estudados por D. Popescu et al. [5], que os dividiu nas seguintes 4 áreas e podem ser observados na Figura 2.4.

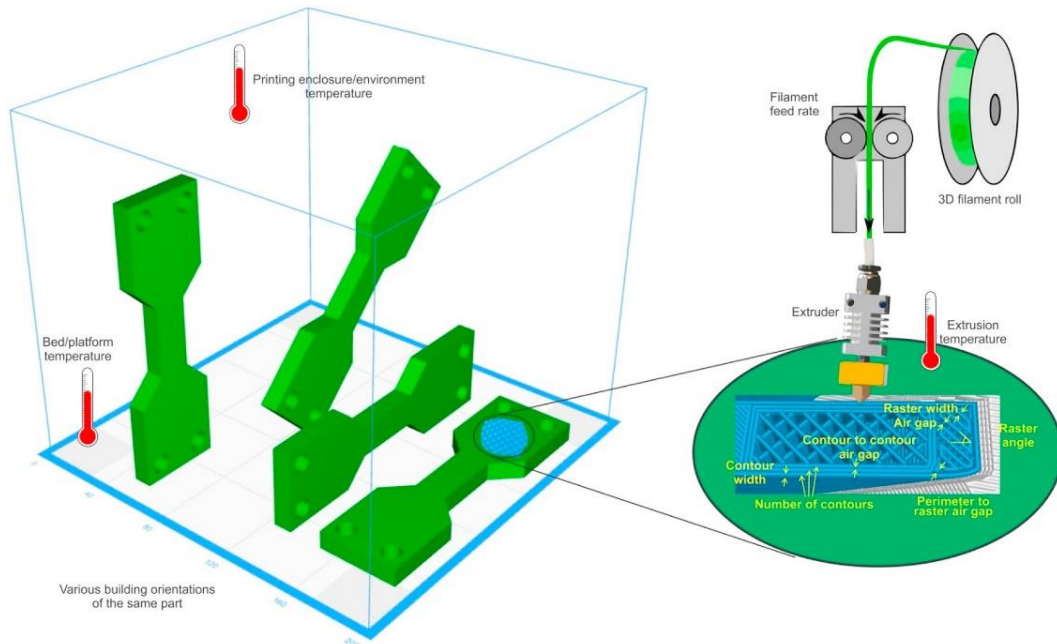


Figura 2.4 - Parâmetros da tecnologia FDM [5]

- **Condições de Temperatura:** São várias as temperaturas que importam para a tecnologia, como a temperatura extrusão (superior à temperatura de fusão do material), a temperatura do meio envolvente e a temperatura da plataforma móvel. Estas duas últimas vão ajudar ao arrefecimento do material depositado.

- **Coefficiente de expansão térmica (CET):** É uma consideração importante para quase todas as aplicações, uma vez que afeta a forma física final (e muitas vezes o desempenho) da estrutura. A tecnologia FDM é capaz de usar materiais com e sem reforço (como fibras) e enchimentos (tais como esferas de vidro, sílica, nanotubos de carbono, e muitos outros). A presença ou a ausência de tais componentes tem um impacto significativo no CET resultante da peça. Os materiais termoplásticos não reforçados tendem a ter um CET relativamente alto, no entanto, mesmo quando estes possuem níveis modestos de fibras de reforço pode-se registar uma redução drástica da sua expansão térmica. Por isso, os projetos podem e normalmente devem ser modificados para compensar as alterações dimensionais relacionadas com a expansão térmica a elevadas temperaturas.

- **Orientação da deposição do material:** Normalmente, as peças são produzidas através da deposição do material com orientação horizontal, vertical ou lateral, mas também podem haver outros tipos de orientação, dependendo dos graus de liberdade que o equipamento consegue satisfazer.

- **Parâmetros da camada:** Espessura de camada, diâmetro da cabeça do extrusor, velocidade de deposição do material, taxa de alimentação do filamento, largura de extrusão, densidade de enchimento, ângulo de enchimento (face ao contorno), padrão do enchimento, etc.

De acordo com D. Popescu et al. [5], todos estes parâmetros afetam de forma diferente as peças produzidas, sendo as alterações mais comuns, a ligação entre camadas e a mudança das propriedades mecânicas. Contudo nem todos os parâmetros do processo têm a mesma importância e segundo os mesmos autores, os parâmetros que resultam em maiores alterações das propriedades mecânicas na peça são: o padrão do enchimento, o ângulo de enchimento, a espessura da camada, a densidade do enchimento e a orientação da deposição da camada.

2.3.2 - Defeitos associados ao processo FDM

Os defeitos mais comuns em peças produzidas por FDM são a existência de vazios e delaminações entre camadas de material depositado. Também a porosidade adicional criada pela tecnologia FDM pode ser bastante elevada, o que pode resultar conseqüentemente em componentes com propriedades mecânicas fracas e anisotrópicas, devido à redução da ligação entre camadas [4].

O comportamento anisotrópico das peças é um dos principais desafios da tecnologia FDM, e da MA no geral, que altera o comportamento mecânico das peças, de acordo com a sua orientação de produção. Devido à natureza da impressão de material, camada por camada, a microestrutura do material dentro de cada camada varia ao longo da sua superfície [4].

2.4 - Termografia

De acordo com R. Yang et al.[13], a técnica de ensaios não destrutivos de Termografia por infra-vermelhos tem grande potencial e possui vantagens sobre as restantes técnicas como, elevadas velocidades de inspeção e melhor contraste, sensibilidade e detetabilidade de defeitos internos, devido à condução de calor na peça a inspecionar.

Esta técnica de ensaios não destrutivos pode ser dividida em duas categorias, Termografia Ativa (TA) e Termografia Passiva (TP).

- **Termografia Passiva:** Avalia variações térmicas do material, utilizando equipamentos de visão infravermelhos sem a necessidade de fontes térmicas externas, pois a amostra a inspecionar encontra-se naturalmente a temperaturas diferentes do meio envolvente.

- Termografia Ativa: Contrariamente à categoria anterior, nesta técnica são utilizadas fontes de calor externas para estimular a amostra a ser inspecionada. Essas fontes de calor podem ser de origem ótica, eletromagnética (correntes induzidas, etc.), mecânica (ultra-sons, etc.) entre outras.

Na realização deste trabalho foram utilizadas as técnicas de Termografia Ativa Pulsada (TAP), que pode ser observada na Figura 2.5, no seu modo de transmissão e com fonte de calor ótica, que consiste na incidência de pulsos térmicos no material e posterior análise da evolução temporal da temperatura da amostra através de uma câmara de infravermelhos, permitindo a identificação de defeitos nas peças inspecionadas. A temperatura do material altera-se rapidamente após a perturbação térmica inicial, devido à condução do calor através da peça. A presença de um defeito altera a condução do calor nesse local do provete, razão pela qual os defeitos aparecem com temperaturas diferentes em relação ao resto da peça.

Neste trabalho foi ainda realizada a técnica de Termografia Ativa por efeito de Joule, para verificar o alinhamento das fibras de reforço de material condutor, que consiste na aplicação de corrente no material condutor presente na peça a inspecionar. Essa passagem de corrente aumenta a temperatura do condutor face ao material envolvente, que o permite destacar através de uma câmara de infravermelhos.

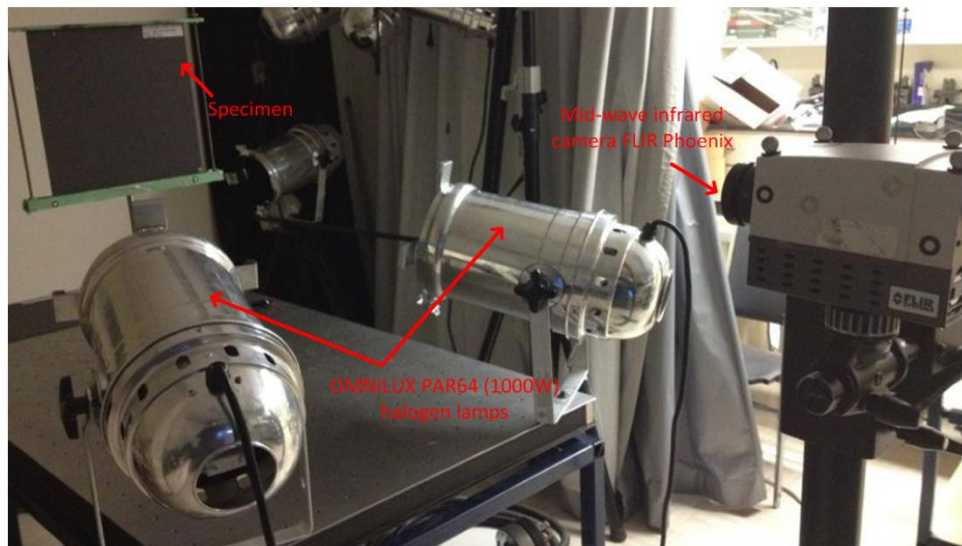


Figura 2.5 - Montagem experimental do ensaio de TAP em modo reflexão [14]

2.4.1 - Estado da Arte

V.Dattoma et al.[15] realizou ensaios de TAP, com 4 lâmpadas de halogéneo com 1000 W de potência, sobre amostras defeituosas de material compósito (polímero reforçado com fibra de

carbono), que é geralmente utilizado na indústria aeronáutica, em forma de placas planas e longarinas em forma de T. Foram inspecionadas placas com 16, 24 e 64 camadas.

A inspeção dos componentes foi realizada variando certos fatores como, a distância entre câmara e provete e entre lâmpadas e provete, o ângulo de incidência da fonte de calor e da câmara com as amostras e ainda o tempo de aquecimento. Foi avaliado ainda a variação do contraste captado pela câmara termográfica entre as zonas com e sem defeito, durante o período de arrefecimento. A influência destes parâmetros foi investigada ao comparar os resultados obtidos experimentalmente e analiticamente, por Tiago Tavares [16].

Na Figura 2.6 e na Figura 2.7, encontram-se representadas as montagens experimentais para inspeção das longarinas e das placas, respetivamente.

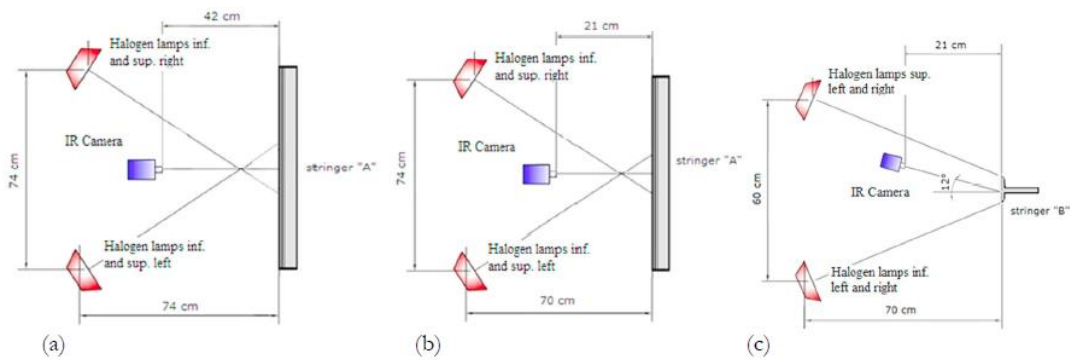


Figura 2.6 - Representação do ensaio de TAP sobre as longarinas com variação de parâmetros [15]
a) e b) Vistas de topo, c) Vista lateral.

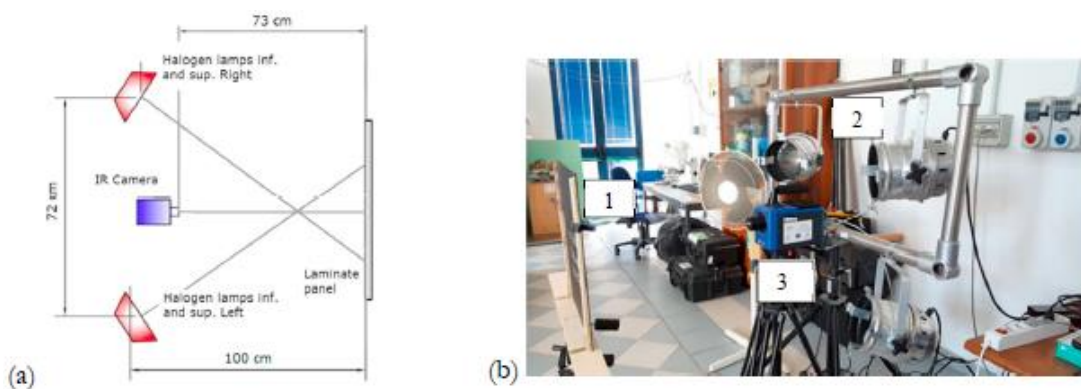


Figura 2.7 - Ensaio de TAP sobre as placas planas [15]
a) Esquema com dimensões da montagem, b) Montagem experimental.
Nomenclatura: placa (1), lâmpada de halogéneo com 1000 W (2), câmara termográfica (3).

Na inspeção das longarinas de Polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) de reduzida espessura, comprovou-se serem necessários apenas 3 segundos de incidência de radiação na peça, para se começar a identificar defeitos. Defeitos esses que ficaram visíveis após 0,6 segundos do fim da excitação.

Na inspeção de placas com 16 camadas foi possível identificar os defeitos situados na zona central da amostra, enquanto na inspeção de placas com 64 camadas o mesmo não foi conseguido. Foi necessário um período de exposição de apenas 1 segundo sobre as placas de 16 camadas para detetar defeitos sub-superficiais. Os resultados, que se encontram na Figura 2.8, demonstraram ainda que a técnica de TAP é adequada para a deteção de porosidades no material, quando encontradas de forma substancial.

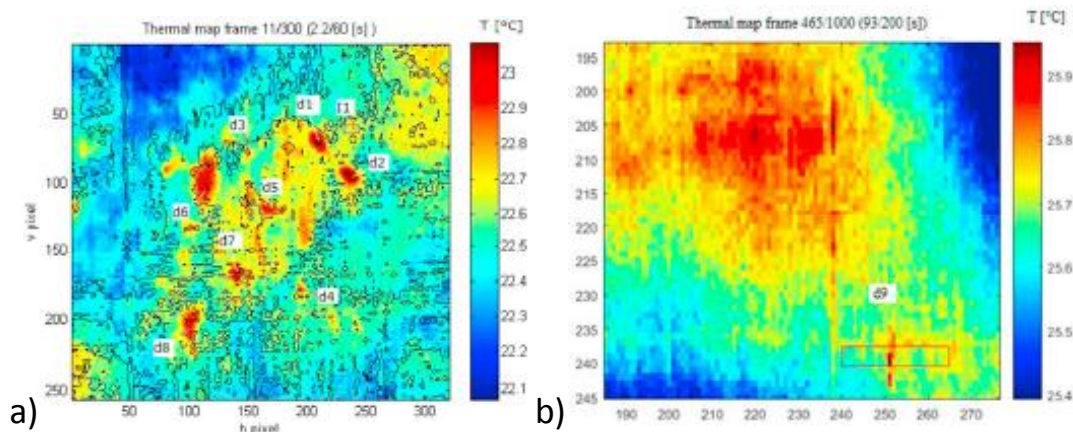


Figura 2.8 - Resultado da inspeção das placas por TAP (adaptado de [15])

- a) Placa com 16 camadas, 0,8 s após a excitação, que demorou 1 s, b) Placa com 24 camadas, 72,4 s após a excitação, que demorou 20 s.
Nomenclatura: defeitos (d1 a d9).

Concluiu-se, de acordo com os autores V.Dattoma et al.[15], que o aumentar do tempo de aquecimento provoca as seguintes respostas:

- Aumento do contraste, entre zonas com e sem defeito,
- Redução do tempo de observação dos defeitos.

2.5 - Ultra-Sons sem contacto

Esta técnica baseia-se na transmissão de ondas sonoras de baixas frequências (entre 0,02 e 1 MHz) sobre a peça a inspecionar. A utilização de duas sondas (uma emissora e outra recetora) durante o varrimento de uma peça, permite a examinação e a obtenção de uma imagem 2D do seu interior, através da variação da amplitude do sinal. Esta técnica pode ser utilizada para deteção e dimensionamento de defeitos, medição de espessuras e determinação de

características físicas de materiais. A detecção de defeitos de uma peça de material compósito por este método segue também o conceito de limiar de detecção de defeitos que pode ser explicado através da Equação 2.1.

$\begin{cases} \text{Se } \lambda \leq l_{\text{defeito}} \Rightarrow \text{Reflexão} \\ \text{Se } \lambda \geq l_{\text{defeito}} \Rightarrow \text{Transmissão} \end{cases}$	2.1
---	-----

Assim, para identificar defeitos de menor dimensão é necessário reduzir o comprimento de onda, ou seja, aumentar a frequência das ondas provocadas pelo piezoeletrico, para que ocorra reflexão do sinal e este não consiga chegar à sonda recetora.

2.5.1 - Campo Próximo

Um dos principais fatores que afeta a detetabilidade de defeitos é o Campo Próximo (N) que consequentemente influencia a escolha de frequência das sondas. A vibração dos piezoeletricos no interior das sondas produz feixes compostos por duas zonas, uma zona convergente – de focagem – e uma zona divergente. A forma do feixe de ultra-sons, incluindo o comprimento de N e o ângulo de divergência, influenciam a escolha de sondas. No campo próximo ocorrem variações na pressão dos ultra-sons (ruído), o que torna a detecção de falhas dentro desta zona bastante difícil, como está representado na Figura 2.9 [17].

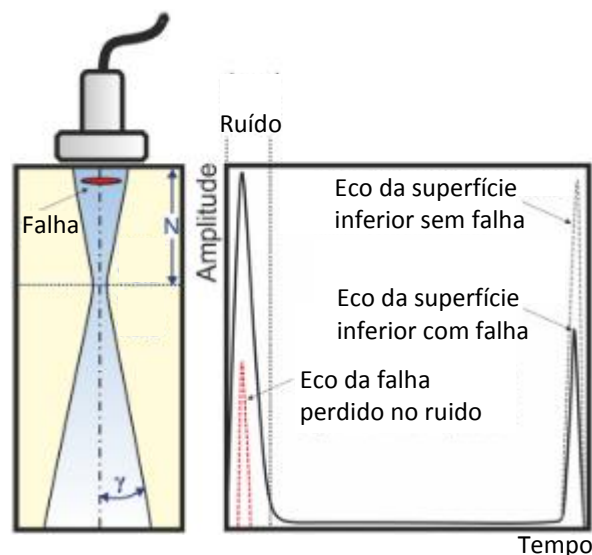


Figura 2.9 – Consequências do campo próximo (adaptado de [17])

O valor do campo próximo depende da frequência do piezoeletrico f [Hz], variando de acordo com a Equação 2.2, onde D [mm] corresponde ao diâmetro do piezoeletrico e c [m/s] é

a velocidade do som num certo meio. No entanto, este valor pode ser calculado em ordem ao comprimento de onda λ [mm], de acordo com a Equação 2.3.

$N = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}$	2.2
$\lambda = \frac{c}{f}$	2.3

2.5.2 - Atenuação Acústica

Ao propagar-se ao longo de um meio, a intensidade de uma onda sonora diminui com a distância percorrida. Isto deve-se a dois fatores, às reflexões provocadas pelas heterogeneidades de um meio (Dispersão) e à transformação da energia sonora em calor, absorvido pelo meio (Absorção).

O decaimento da atenuação acústica pode ser descrito através da Equação 2.4, onde A_0 [N.m⁻²] corresponde ao valor da amplitude máxima da onda, α [dB.m⁻¹] é o coeficiente de atenuação do meio e d [m] é a distância percorrida pela onda sonora, nesse meio. A representação gráfica desta equação encontra-se na Figura 2.10.

$A = A_0 e^{-\alpha d}$	2.4
-------------------------	-----

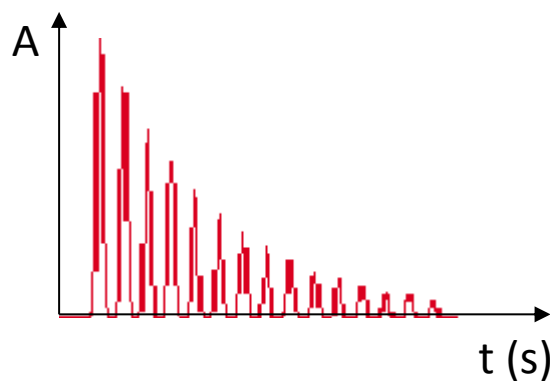


Figura 2.10 - Gráfico da atenuação acústica (adaptado de [18])

O coeficiente de atenuação acústica de um material é influenciado pela frequência das ondas, pela temperatura ambiente, pelo tipo de ondas (Longitudinais, Transversais, Superficiais ou de Placa) e pelo modo de produção do material.

Esse coeficiente pode também ser determinado através dos múltiplos picos de onda que podem ser vistas num típico A-Scan. A variação de dB entre dois picos consecutivos é dividido pelo tempo percorrido, o que resulta num coeficiente de atenuação por unidade de tempo U_t . Este coeficiente pode ser convertido para a unidade do coeficiente de atenuação mais utilizada [nepers.m⁻¹] através da Equação 2.5 [18].

$\alpha = \frac{0,1151}{c} U_t$	2.5
---------------------------------	-----

2.5.3 - Estado da Arte

A técnica Ultra-sons sem contacto torna o procedimento bastante mais rápido e simples, visto que certos fluidos podem deteriorar os materiais. Um dos grandes desafios desta técnica é o de encontrar um material piezoelétrico sólido com impedância acústica que seja mais próxima da do ar, algo que não é necessário quando existe acoplamento com água ou outro fluido mais comum [19]. No entanto, esta técnica possui outro tipo de problemas, como é o baixo valor da velocidade do som no ar (343 m/s), inferior ao valor da água (1485 m/s), por exemplo, e muito inferior ao dos elementos sólidos como os polímeros, cujos valores foram estudados em [20], [21] e encontram-se na Tabela 2.1. Esta diferença bastante significativa provoca uma refração muito grande do som, quando ele muda de meio, daí que as sondas devem-se encontrar perpendicularmente à peça e nunca ultrapassar os 20 ° em relação à direção normal do provete [19].

Tabela 2.1 - Propriedades dos polímeros mais utilizados em FDM (adaptado de [16])

Material	ρ (kg.m ⁻³)	c (m.s ⁻¹)
ABS	1050	2250
PLA	1240	2220
PMMA	2690	1191
PLA-Air-PLA	398	944

Juerg Neuenschwander et al. [22] realizou ensaios de USSC em transmissão, com um par de sondas com 200 kHz de frequência (uma com 25 e outra com 13 mm de diâmetro), apontadas uma à outra e colocadas a uma distância fixa foram utilizadas para fazer o varrimento de peças defeituosas e, cuja montagem se pode observar na Figura 2.11.

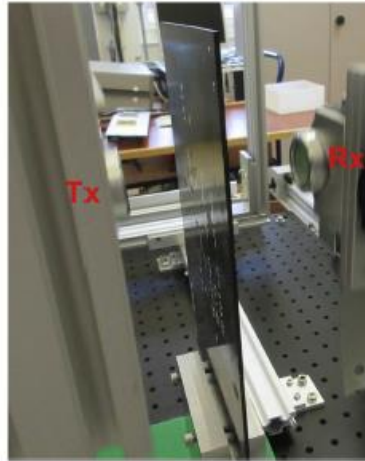


Figura 2.11 - Ensaio C-Scan da técnica de USSC com as sondas emissora (Tx) e recetora (Rx) em lados diferentes da amostra [22]

A presença de defeitos na peça, como delaminações, resulta em descontinuidades de impedância, o que leva à atenuação do sinal transmitido, razão pela qual é possível identificar a existência deste tipo de defeitos. Uma placa de CFRP com dois defeitos de impacto com energias diferentes foi inspecionada (como se encontra representada na Figura 2.11), revelando a presença de duas delaminações na peça. Como pode ser visto na Figura 2.12, o defeito produzido com maior energia de impacto é claramente visível, do lado esquerdo da peça, como uma região de reduzida amplitude, enquanto o outro defeito provocou um aumento de amplitude do sinal. Segundo os autores, este facto pode ser explicado devido à transmissão direta da onda através de uma fenda localizada sobre o defeito mais à direita, e que é visível num dos lados da amostra.

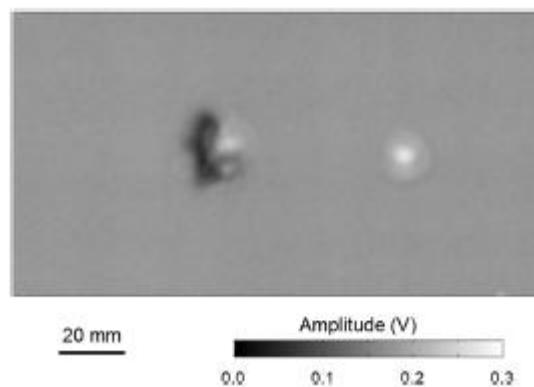


Figura 2.12 - Identificação de duas delaminações através do ensaio C-Scan do método USSC [22]

Também a variação da espessura de uma peça pode ser calculada por este método, sendo que os resultados se obtém através da Equação 2.6 onde, a espessura e [m], pode ser calculada pelo quociente entre a velocidade do som no material, c [m/s] e o dobro da frequência da onda f [Hz].

$e = \frac{c}{2f}$	2.6
--------------------	-----

Uma placa de acrílico com 6 mm de espessura foi inspecionada por Juerg Neuenschwander et al. [22]. Os resultados permitiram identificar uma variação de espessura na peça de aproximadamente 0,3 mm como se comprova na Figura 2.13.

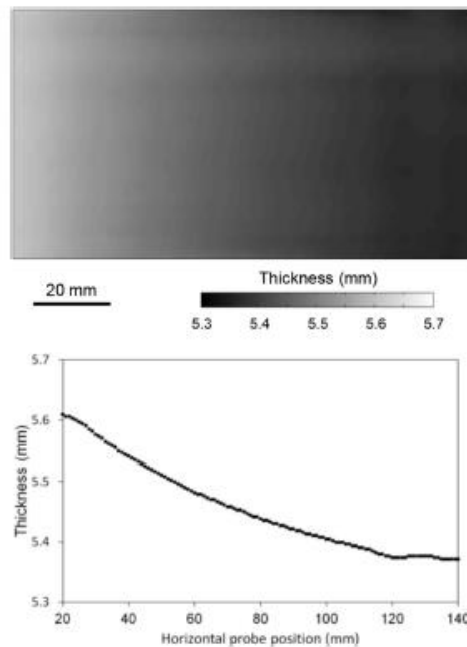


Figura 2.13 - Resultado do ensaio C-San de uma peça com variação de espessura [22]

3 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA INSPEÇÃO

3.1 – Introdução

Neste capítulo descreve-se o trabalho realizado para a implementação das técnicas de ensaios não destrutivos: Termografia Ativa Pulsada e Ultra-Sons Sem Contacto. Descreve-se ainda os objetivos da produção de cada um dos provetes por FDM e enquadra-se o material utilizado nos mesmos.

3.2 – Termografia

Para a realização de ensaios com esta técnica de END, foram utilizadas duas câmaras termográficas a IRS336 da Automation Technology [23] e a Ti400 da Fluke [24], no entanto, os resultados apresentados neste documento foram todos obtidos através da utilização da segunda. Como fontes de calor foram utilizadas lâmpadas infra vermelhas com uma potência de 175 W e uma matriz de 16 lâmpadas de halogéneo com uma potência de 20 W cada. Foi também utilizada uma fonte de tensão para realizar a técnica de Termografia por efeito Joule.

3.2.1 – Requisitos Funcionais

Na Tabela 3.1 são indicados os requisitos funcionais do equipamento de Termografia e as respectivas soluções construtivas.

Tabela 3.1 - Requisitos funcionais do equipamento para Termografia

Requisito Funcional	Solução construtiva
Bancada de ensaios estável	Chassis de perfil Bosch 30x30 mm com respetivos elementos de ligação.
Fixação dos provetes	Os provetes foram colocados entre duas vigas de perfil Bosch 30x30 mm, que impedem o seu movimento, durante a inspeção.
Fixação das câmaras termográficas	As câmaras foram assentes em perfil Bosch 30x30 mm, com um elemento de ligação rotacional, que permite realizar o ensaio em modo reflexão.
Posicionamento das lâmpadas de 175 W, como fonte de calor	Os casquilhos foram colocados a correr num perfil Bosch 30x30 mm, paralelo à base da bancada.
Posicionamento da fonte elétrica, como fonte de calor	A fonte foi colocada sobre os tampos inferiores à bancada de trabalho.
Visualização dos resultados do ensaio	Monitor fixo a um perfil Bosch 30x30 mm, numa das extremidades da bancada e à altura de, aproximadamente, 1600 mm.
Variação das distâncias entre lâmpadas e provete e entre câmara e provete	Patins fixos aos perfis Bosch 30x30 mm que suportam cada um dos componentes e que correm longitudinalmente ao longo das vigas de maior comprimento.
Painel matricial de lâmpadas para aquecimento mais uniforme das peças a inspecionar	As lâmpadas foram colocada entre duas placas, que foram aparafusadas uma à outra.

3.2.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento

A solução concebida consiste numa bancada constituída a partir de um chassis de perfil Bosch 30x30 mm e ligadas entre si por cantos, que garantem a estabilidade da estrutura.

Foram projetadas, a diferentes alturas, dois níveis de trabalho nos quais foram colocados tampos de madeira. Estes tampos encontram-se apoiados em chapas de alumínio que se encontram aparafusadas aos perfis de maior comprimento. A uma altura inferior, encontra-se uma zona de arrumação e de apoio aos ensaios e, no nível superior a zona de realização dos ensaios.

No nível superior são dispostos perpendicularmente às vigas de maior comprimento (segundo o eixo Z), os perfis Bosch que suportam as lâmpadas, as câmaras termográficas e os

provetes. Estes perfis correm sobre as vigas de maior comprimento em cima de patins (segundo o eixo X), que foram produzidos por FDM. O projeto desta bancada de ensaios, realizado no *software SolidWorks*, encontra-se representado na Figura 3.1.

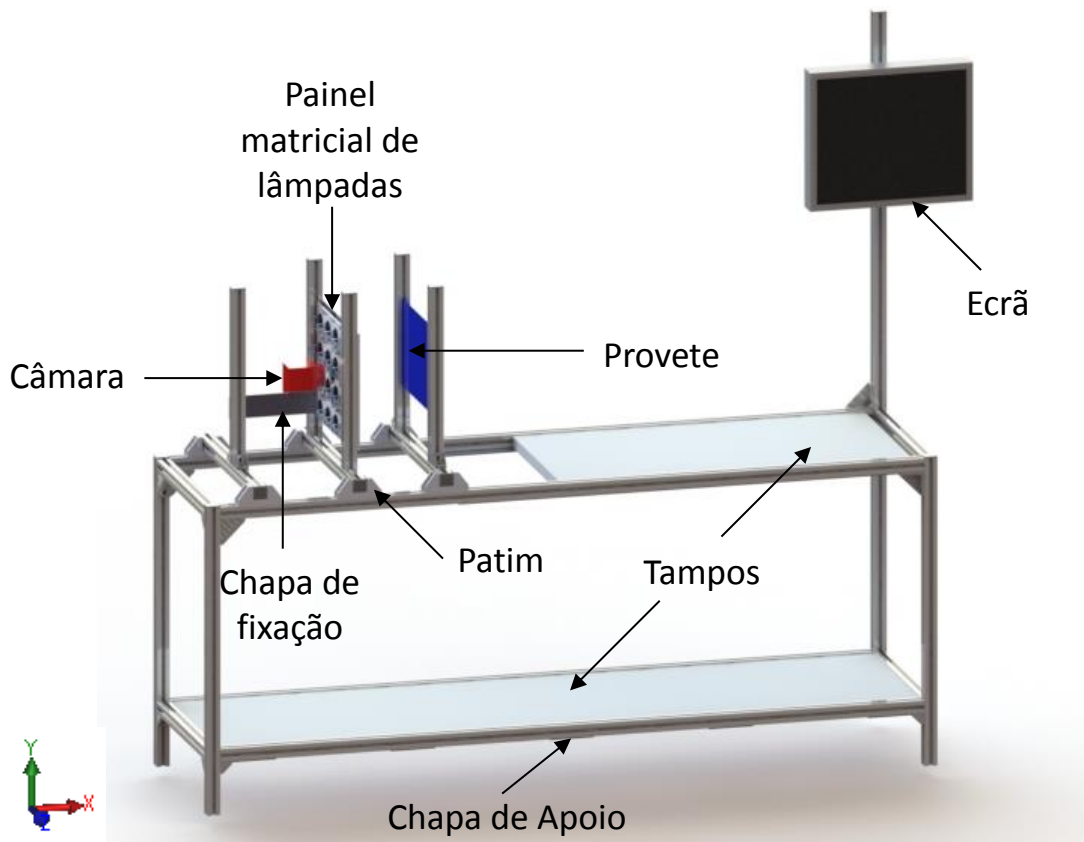


Figura 3.1 - Projeto da bancada de ensaios para TAP

De modo a garantir um aquecimento mais uniforme sobre toda a superfície das amostras a inspecionar, foi concebida uma estrutura simétrica produzida por FDM, que garante a fixação de uma matriz de 4 x 4 lâmpadas de halogéneo com 20 W de potência. As peças constituintes deste painel matricial encontram-se ilustradas na Figura 3.2, enquanto o resultado final está representado na Figura 3.3.

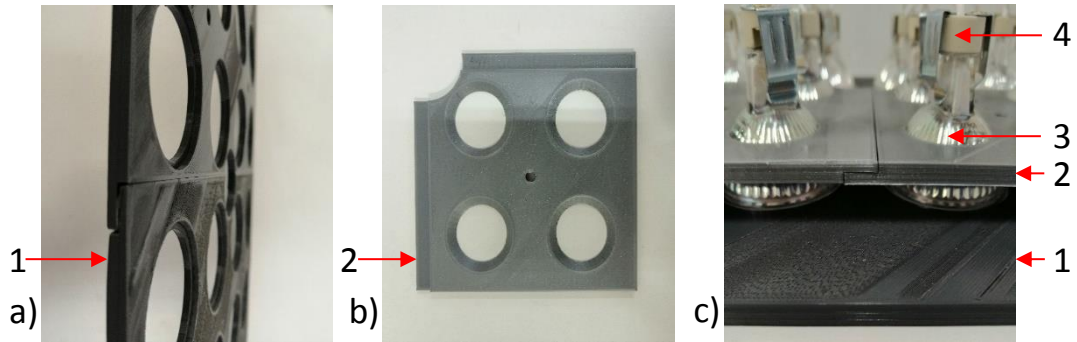


Figura 3.2 – Peças constituintes do painel matricial de lâmpadas de 20 W
a) Vista de pormenor da placa frontal, b) Vista de pormenor de uma das 4 peças que constituem a placa posterior, c) Vista de pormenor do sistema de suporte das lâmpadas.
Nomenclatura: placa frontal (1), peça da placa posterior (2), lâmpada 20 W (3), casquilho (4).

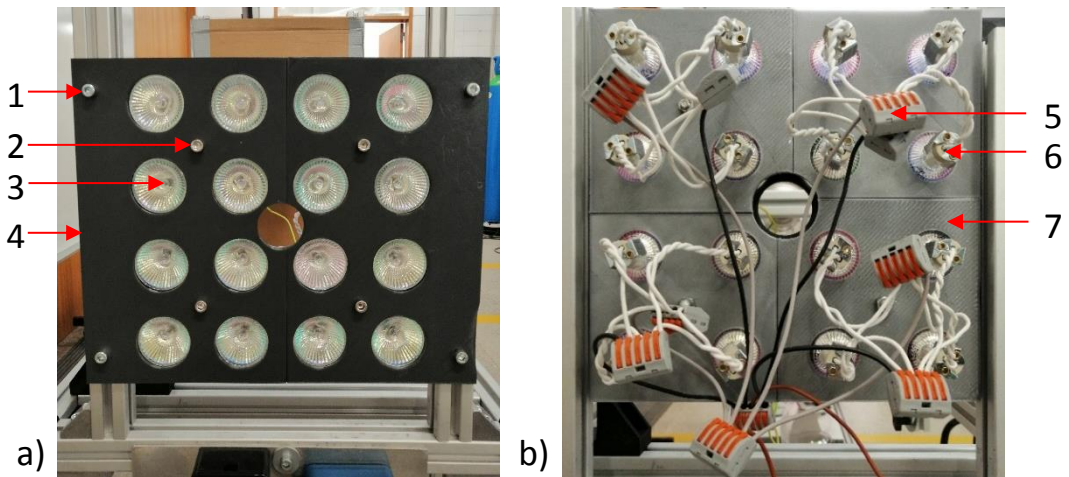


Figura 3.3- Resultado final do painel matricial de lâmpadas de 20 W
a) Vista frontal do esquadro, b) Vista posterior do esquadro.
Nomenclatura: parafuso de fixação do esquadro ao perfil Bosch (1), parafuso de fixação entre placas (2), lâmpada 20 W (3), placa frontal (4), ligador rápido de 5 condutores (5), casquilho (6), placa posterior (7).

3.3 – Ultra-Sons

Para a realização de ensaios com esta técnica de END foram utilizados cinco pares de sondas de frequências diferentes: 50, 75, 120, 200 e 400 kHz. Para a inspeção das amostras com as sondas foi utilizado um aparelho de inspeção de ultra-sons sem contato, DIO 1000 LF Flaw Detector da Starmans [25], específico para frequências entre os 50 e os 500 kHz, que permite a extração dos valores de amplitude e de tempo de pico do sinal e possibilita a realização de A-Scans, B-Scans e C-Scans.

Para a realização dos ensaios C-Scan, foram utilizados dois *softwares*, o *Repetior-Host* que permite a movimentação da mesa XYZ e, conseqüentemente, realizar o varrimento sobre as amostras e o *LabVIEW* que permite a aquisição de dados através de uma placa da *National Instruments*, que são posteriormente tratados.

3.3.1 – Requisitos Funcionais

Na Tabela 3.2 são indicados os requisitos funcionais do equipamento de Ultra-sons e as respectivas soluções construtivas.

Tabela 3.2 - Requisitos funcionais do equipamento para Ultra-Sons

Requisito Funcional	Solução construtiva
Bancada de ensaios estável e de espaço reduzido	Chassis de perfil Bosch 40x40 mm, com respectivos elementos de ligação.
Suporte e posicionamento dos provetes	Os provetes foram colocados entre dois apoios que correm num perfil Bosch 20x20 mm paralelo à bancada de ensaios, para ajustar às dimensões dos provetes e fixarem estes. Esse perfil encontra-se ligado a um rolamento linear de esferas, que permite o provete deslocar-se perpendicularmente à direção das ondas de US.
Suporte e posicionamento das sondas	As sondas foram colocados sobre apoios, que correm num perfil Bosch 40x40 mm, o que permite variar as distâncias entre elas e entre elas e o provete a inspecionar.
Arrumação das sondas	Quando não utilizadas, as sondas colocam-se nos suportes destinados a cada um dos pares.
Suporte para C-Scan das sondas de 75kHz	Acessório que agarra as sondas e garante a sua imobilização durante a inspeção dos provetes, no ensaio C-Scan.
Suporte para os provetes no ensaio C-Scan	Os provetes são apoiados por 4 pinças que correm em perfis Bosch 20x20 mm e estes, por sua vez estão aparafusados à consola da mesa XYZ.

3.3.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento

A solução concebida para os ensaios A-Scan de USSC, consiste num chassis de perfil Bosch 40x40 mm, ligado por cantos, que garantem a rigidez necessária.

No perfil frontal foram acoplados os apoios das sondas, que correm sobre ele (na direção do eixo X) para variar as distâncias entre sondas e entre sondas e provete. O suporte do provete, constituído por um perfil Bosch 20x20 m e por dois apoios que correm sobre este, foi ligado ao

perfil frontal através do acoplamento com um rolamento linear de esferas, que permite o deslocamento perpendicular aos apoios das sondas (na direção do eixo Z), estando fixo no eixo X.

Os suportes de cada um dos pares de sondas foram aparafusados ao perfil posterior que se encontra mais elevado, para facilitar a troca de sondas a utilizar para a inspeção dos provetes. O projeto da solução para a realização dos ensaios A-Scan, realizado no *software SolidWorks*, encontra-se representado na Figura 3.4.

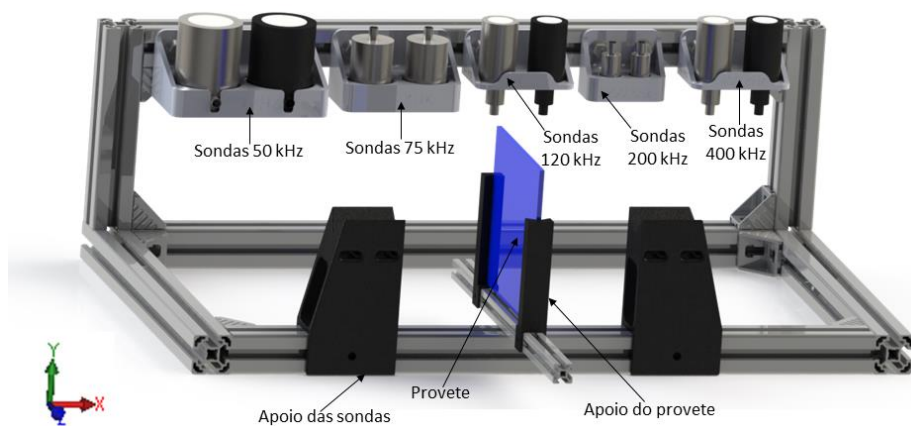


Figura 3.4 - Projeto da bancada para a realização de ensaios A-Scan da técnica de USSC.

A estrutura que apoia os provetes no ensaio C-Scan, consiste num chassis com 4 perfis Bosch 20x20 mm, dois deles fixos e com uma distância entre eles, igual ao comprimento da consola da mesa XYZ e os outros dois móveis, que permitem ajustar de acordo com dimensões de cada um dos provetes. Os provetes encontram-se apoiados por pinças que correm nos perfis móveis. A montagem pode ser vista na Figura 3.5.

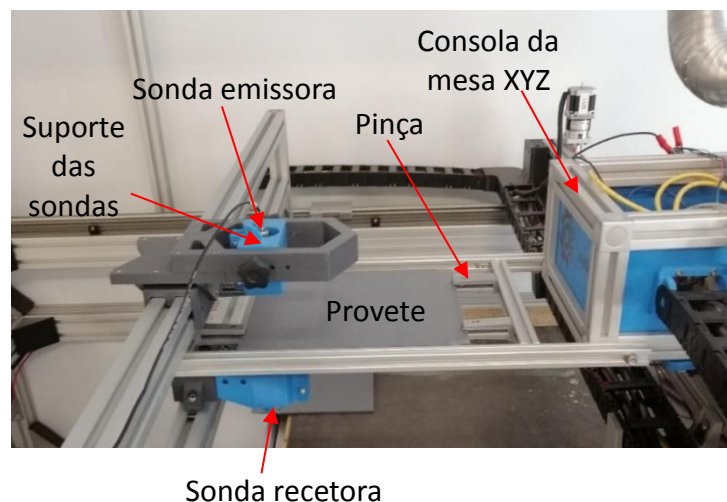


Figura 3.5 - Montagem para realização do ensaio C-Scan da técnica USSC.

Os suportes das sondas de 75 kHz foram produzidos por forma a ficarem encaixados nos suportes já existentes das sondas de 50 kHz, de maiores dimensões. As sondas são colocadas nos suportes que possuem um aperto suficiente para garantir a imobilização destas.

3.4 - Material utilizado na produção dos provetes

Neste trabalho, o material utilizado na produção dos provetes como matriz, foi o *Polylactic Acid* (PLA), que é um polímero termoplástico bastante utilizado no processo de impressão 3D por FDM por ter um ponto de fusão baixo de 173 °C e por ser bastante maleável no estado viscoso, mas quando no estado sólido ter uma tensão de rotura de 37 MPa, superior a outros polímeros como o ABS (27 MPa). No entanto, o PLA tem uma temperatura de funcionamento relativamente baixa de 60 °C (105 °C no caso do ABS).

Como fibras de reforço foram inseridos nos provetes os seguintes materiais:

➤ **Arame de NiTi**

- Liga de Níquel-Titânio com características estruturais bastante interessantes como a memória de forma e a superelasticidade, o que o distingue dos restantes metais pois possui elasticidade 10 a 30 vezes superior a certos metais e tem a possibilidade de voltar à sua forma inicial, depois de deformado.
-

➤ **Arame de Cobre**

- É um metal dúctil de baixo custo que devido à sua boa condutibilidade elétrica (apenas inferior à Prata) é bastante utilizado em circuitos elétricos. Possui também boa condutibilidade térmica, que é aproveitada para sistemas de aquecimento e/ou refrigeração.
-

➤ **Fibra de Kevlar®**

- É uma fibra sintética de aramida muito resistente e leve, marca registada da empresa DuPont™, que é bastante resistente ao calor e cerca de cinco vezes mais resistente do que o aço, por unidade de peso. É bastante utilizada em artigos de vestuário, acessórios e equipamentos seguros e resistentes a cortes e balas.

Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas propriedades destes materiais utilizados como fibras de reforço.

Tabela 3.3 - Algumas propriedades dos materiais de reforço

Material	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Rotura (MPa)	Temperatura de Serviço (°C)	Resistividade Elétrica (Ω.m)	Condutividade Térmica (W/m.K)
NiTi	6,45	28	754 até 960		7,6 x 10 ⁻⁵	10
Cobre	8,93	110	210		1,7 x 10 ⁻⁶	385
Kevlar	1,47	179	3450	-200 até 425		

3.5 - Projeto e produção dos provetes

3.5.1 - Provette com 3 diferentes espessuras

Este provete foi projetado para ter 3 seções com diferentes áreas ao longo do seu comprimento, sendo que a espessura é a única dimensão que varia entre seções, e toma os valores de 4, 5 e 6 mm, o que pode ser visto na Figura 3.6. Pretendeu-se com este provete estudar a variação da amplitude e do tempo de pico do sinal das ondas de ultra-sons, com a alteração da espessura de uma peça de PLA produzida por FDM com enchimento de 100 %. A peça foi inspecionada na horizontal, tendo sido colocada a uma distância fixa entre sondas, de modo a verificar as alterações na interface entre seções com espessura diferente.

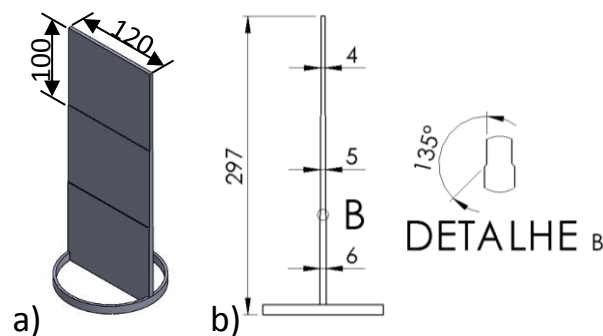


Figura 3.6 - Provette com 3 espessuras diferentes

- a) Representação da modelação geométrica do provete, b) Representação das dimensões do provete.

Devido às restrições do espaço de produção da impressora, o provete foi impresso ao alto, como se pode ver na Figura 3.6 a), com uma coroa circular à volta da base para garantir a sua estabilidade durante a impressão.

3.5.2 - Provete plano com 3 delaminações

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, com as dimensões 223x250x5 mm e está representado na Figura 3.7. Na camada intermédia foram introduzidas no desenho CAD do provete, 3 delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes formas geométricas, estando dispostas conforme ilustrado na Figura 3.7 a). Este provete foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a deteção de delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes geometrias, usados para simular defeitos encontrados no interior de peças produzidas por MA.

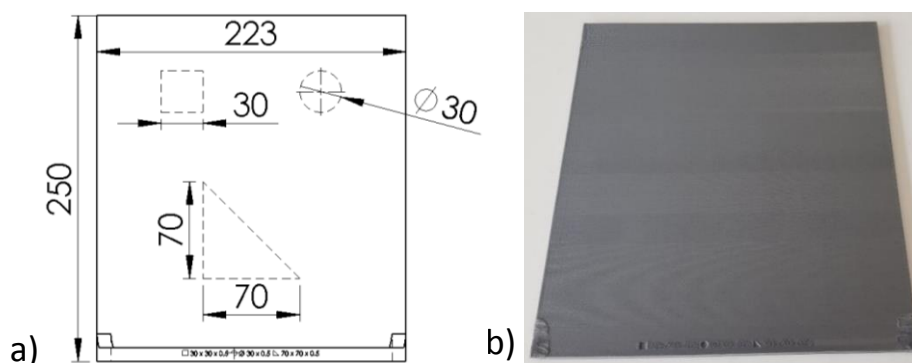


Figura 3.7 - Provete plano com 3 delaminações

- a) Modelação geométrica e representação das dimensões do provete, b) Resultado final da impressão.

Tal como explicado em 3.5.1, realizou-se a impressão do provete em altura e com uma coroa circular à volta da base, o que se deveu a restrições do espaço de impressão.

3.5.3 - Provete curvo com 3 delaminações

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.8. Com 240 mm de altura, um raio de curvatura menor de 120 mm e 5 mm de espessura, na camada intermédia foram introduzidas no desenho CAD do provete, 3 delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes formas geométricas. Esses defeitos são um quadrado com 30x30 mm, um círculo com 30 mm de diâmetro e um triângulo retângulo em que os catetos têm 70 mm. Pretendeu-se com este provete, verificar as alterações devido à curvatura do mesmo, dos resultados obtidos por TAP entre este e o provete identificado no capítulo 3.5.2. Na Figura 3.9 é possível identificar a delaminação em forma de triângulo, durante a produção do provete.

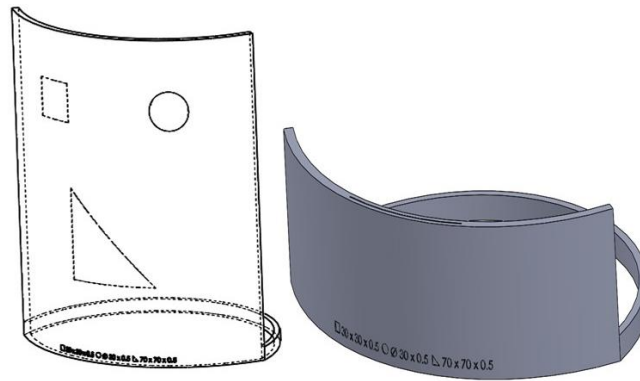


Figura 3.8 - Representação da modelação geométrica, realizada em SolidWorks, para impressão do provete curvo com 3 delaminações



Figura 3.9 - Visualização da delaminação em forma de triângulo, durante a impressão do provete.

Tal como explicado em 3.5.1, a impressão do provete em altura e com uma coroa circular à volta da base, deveu-se a restrições do espaço de impressão.

3.5.4 - Provete plano com 15 delaminações

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.10, com as dimensões 223x250x5 mm. Na camada intermédia foram introduzidas no desenho CAD do provete, uma matriz de 15 delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes formas geométricas e, encontra-se disposta conforme ilustrado na Figura 3.10 a).

Pretendeu-se com este provete, avaliar a deteção e contraste de delaminações com diferentes geometrias e, menores dimensões, face ao provete identificado em 3.5.2, usados para simular defeitos encontrados no interior de peças produzidas por MA

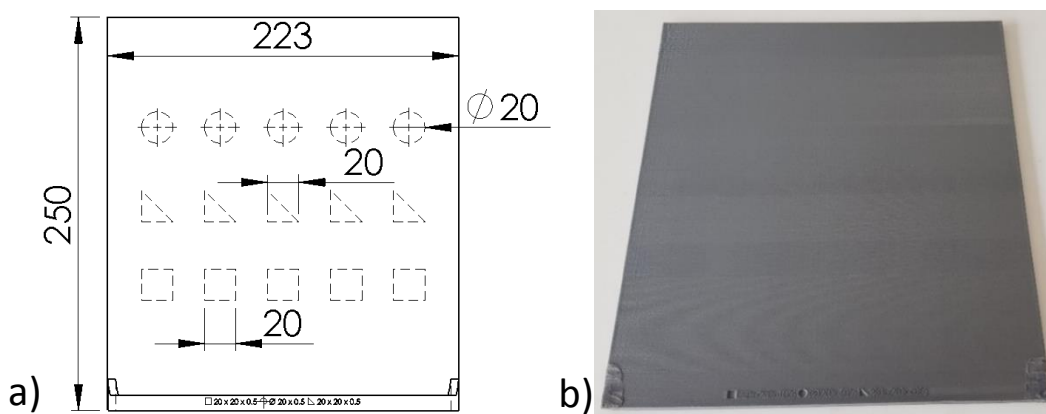


Figura 3.10 - Provete plano com 15 delaminações
 a) Modelação geométrica e representação das dimensões do provete, b) Resultado final da impressão.

Tal como explicado em 3.5.1, a impressão do provete em altura e com uma coroa circular à volta da base, deveu-se a restrições do espaço de impressão.

3.5.5 - Provete curvo com 15 delaminações

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.11, com 240 mm de altura, um raio de curvatura menor de 120 mm e 5 mm de espessura. Na camada intermédia foram introduzidas no desenho CAD do provete, 15 delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes formas geométricas, sendo elas 5 quadrados com 20x20 mm, 5 círculos com 20 mm de diâmetro e 5 triângulos retângulos e isósceles em que os catetos têm 20 mm. A matriz de delaminações foi disposta conforme ilustrada na Figura 3.11. Pretendeu-se com este provete, verificar as alterações devido à curvatura do mesmo, dos resultados obtidos por TAP entre este e o provete identificado em 3.5.4.

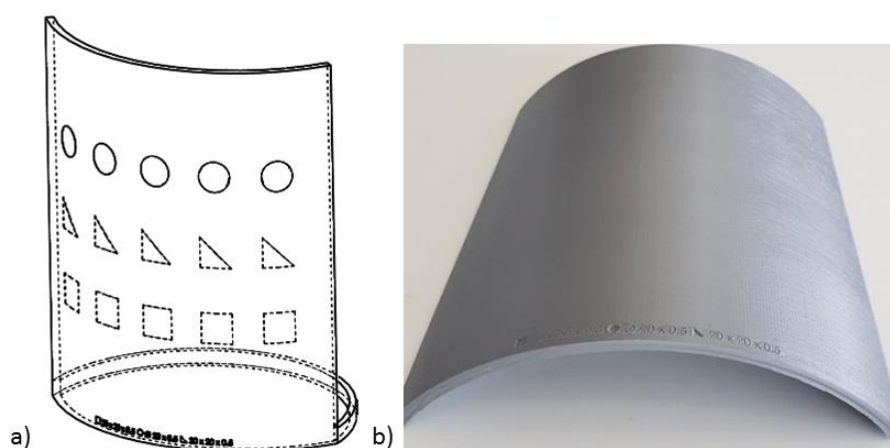


Figura 3.11 - Provete curvo com 15 delaminações.
 a) Modelação geométrica, realizada no SolidWorks, b) Resultado final da impressão.

Tal como explicado em 3.5.1, a impressão do provete em altura e com uma coroa circular à volta da base, deveu-se a restrições do espaço de impressão.

3.5.6 - Provete reforçado com dois arames de NiTi

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.12, com as dimensões 160x160x5 mm, possuindo 14 camadas no total. Dois arames de NiTi foram incorporados entre camadas do material base durante a produção do provete. Os arames têm um diâmetro de 0,1 mm e 0,25 mm, estando situados entre as camadas 8 e 9 e as camadas 9 e 10, respetivamente. Pretendeu-se com a produção deste provete, verificar o alinhamento das fibras reforço metálico, através dos END realizados.

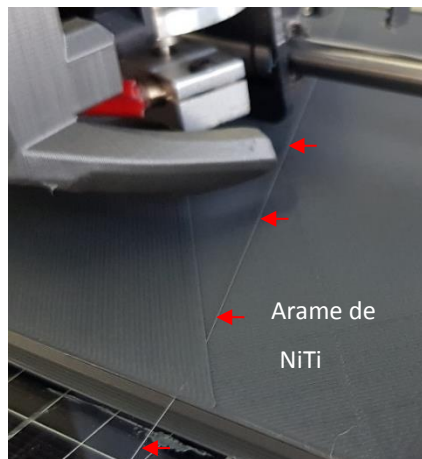


Figura 3.12 - Impressão do provete reforçado com dois arames de NiTi

3.5.7 - Provete com delaminação, reforçado com uma fibra de Kevlar e dois arames de Cu

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.13, com as dimensões 160x160x5 mm, possuindo 14 camadas no total. Dois arames de Cu e uma fibra de Kevlar foram incorporados entre camadas do material base durante a sua impressão. Os arames de Cu têm um diâmetro de 0,1 mm e 0,15 , estando situados entre as camadas 6 e 7, enquanto a fibra de Kevlar encontra-se entre as camadas 8 e 9. Foi colocada ainda, durante a impressão, uma tira de Politetrafluoretileno (PTFE) com 0,1 mm de espessura entre as camadas 7 e 8, tendo sido retirada posteriormente, para provocar o aparecimento de uma delaminação.

Pretendeu-se com a produção deste provete, verificar o alinhamento das fibras de reforço metálico e não-metálico, bem como, identificar delaminações com reduzida espessura (0,1 mm), através dos END utilizados.

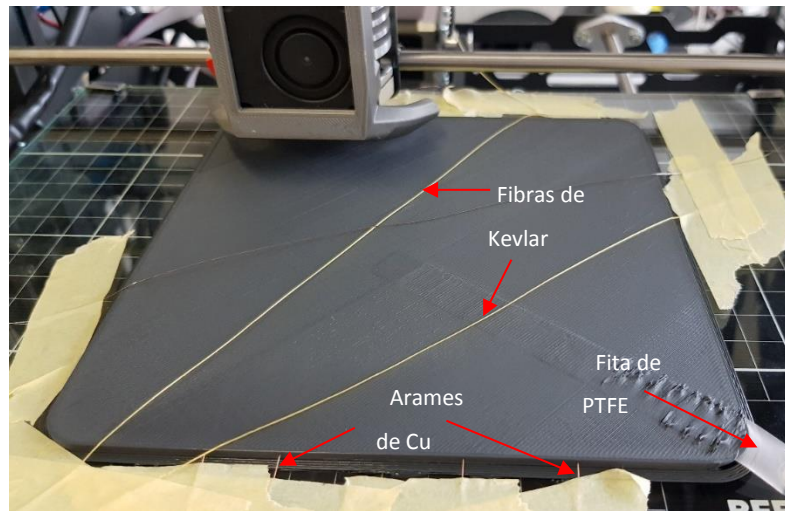


Figura 3.13 - Impressão do provete com inserção de fibras e de uma fita de PTFE

3.5.8 - Provete com 3 fitas de PTFE

Este provete foi produzido por FDM, com enchimento de 100 % e tendo como matriz o PLA, na orientação representada na Figura 3.14, com as dimensões 160x160x5 mm, possuindo 14 camadas no total. Foram introduzidas, durante a impressão, 3 fitas de PTFE com uma espessura 0,1 mm, todas elas perpendiculares a arestas diferentes do provete e em diferentes camadas de material. Uma das fitas foi colocada entre as camadas intermédias do provete e as outras duas, a uma distância da anterior igual a um quarto da espessura do provete, mas inseridas em sentidos opostos.

Pretendeu-se com a produção deste provete, avaliar a detetabilidade de delaminações com reduzida espessura (0,1 mm), diferenciar a localização das fitas em profundidade, bem como comparar os resultados obtidos com e sem as fitas de PTFE, em ambos os ensaios de TAP e USSC.

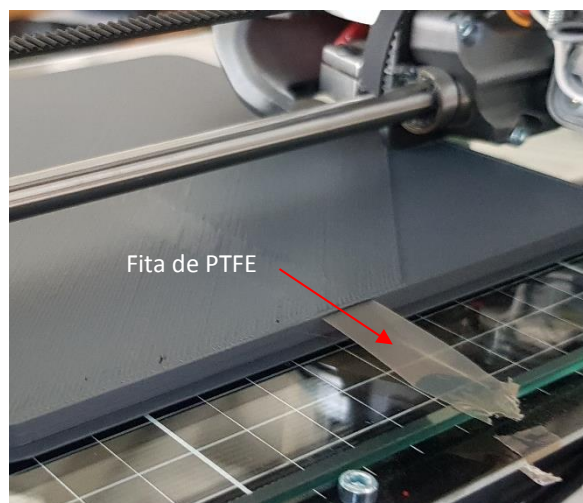


Figura 3.14 - Impressão do provete com inserção de fitas de PTFE

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Introdução

Neste Capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através das diferentes técnicas de END, nos provetes produzidos. Efetuou-se uma teorização do ensaio A-Scan com o procedimento necessário à sua realização. Abordou-se as vantagens e desvantagens da cada uma das técnicas de acordo com os resultados obtidos.

4.2 – Validação Experimental do ensaio de USSC

Para a realização do ensaio de USSC, realizou-se a montagem de uma estrutura que se encontra esquematizada na Figura 4.1.

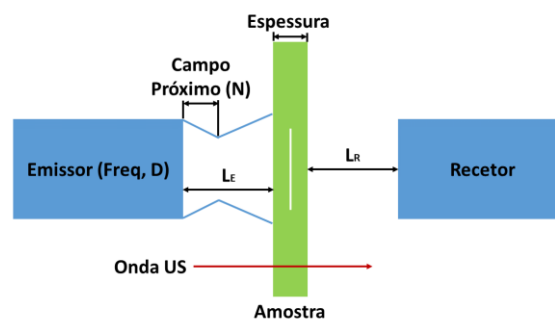


Figura 4.1 - Esquema da montagem para realização dos ensaios de USSC

Para perceber os resultados obtidos no ensaio A-Scan é necessário percorrer certos passos, sendo para isso necessário a utilização do equipamento de ultra-sons e um par de sondas. Colocam-se as sondas nos respetivos apoios a uma certa distância uma da outra, neste caso foram utilizadas as sondas com 50 kHz de frequência.

Verificou-se que, para este par de sondas o valor do campo próximo N [mm] corresponde a aproximadamente 74 mm, pelo que se colocaram as sondas a uma distância de 156 mm, valor relativamente superior ao dobro do valor de N , para o caso de se colocar posteriormente um provete de espessura reduzida (até 8 mm).

Apontando as sondas uma à outra e conectando-as ao equipamento DIO 1000 LF Flaw Detector, deve-se ativar o pulso do sinal, colocando o valor do *delay* a 0.

Para avaliar a precisão do equipamento e da montagem realizada, foram comparados os valores medidos pela máquina e os valores calculados analiticamente, quer da distância percorrida pela onda, quer do tempo demorado entre sondas emissora e recetora.

Os cálculos necessários para obter o valor do tempo t [μ s], que a onda demora a percorrer uma distância L [mm], dependem da velocidade do som no meio c [m/s] em que se encontra, conforme se verifica pelas Equações 4.1 e 4.2. Neste caso não existe amostra entre as sondas, pelo que o meio (ar) é comum para L_E e L_R e apresenta um valor de c à temperatura ambiente de 343,3 m/s.

$t_{L_E} = \frac{\frac{L_E}{1000}}{c_{Material}} \times 10^6$	4.1
$t_{L_R} = \frac{\frac{L_R}{1000}}{c_{Material}} \times 10^6$	4.2

Calculando o valor teórico do tempo total de meio ciclo (Emissor-Recetor) pelas Equações 4.1 e 4.2, obteve-se o valor de 454 μ s.

No equipamento aumentou-se a janela através das definições, ajustando o ganho por forma a obter a representação dos vários picos da onda, tanto no caso da escala espacial (Figura 4.2 a)) como temporal (Figura 4.2 b)), e colocou-se o primeiro pico sobre o zero do eixo das abcissas em ambos os casos.

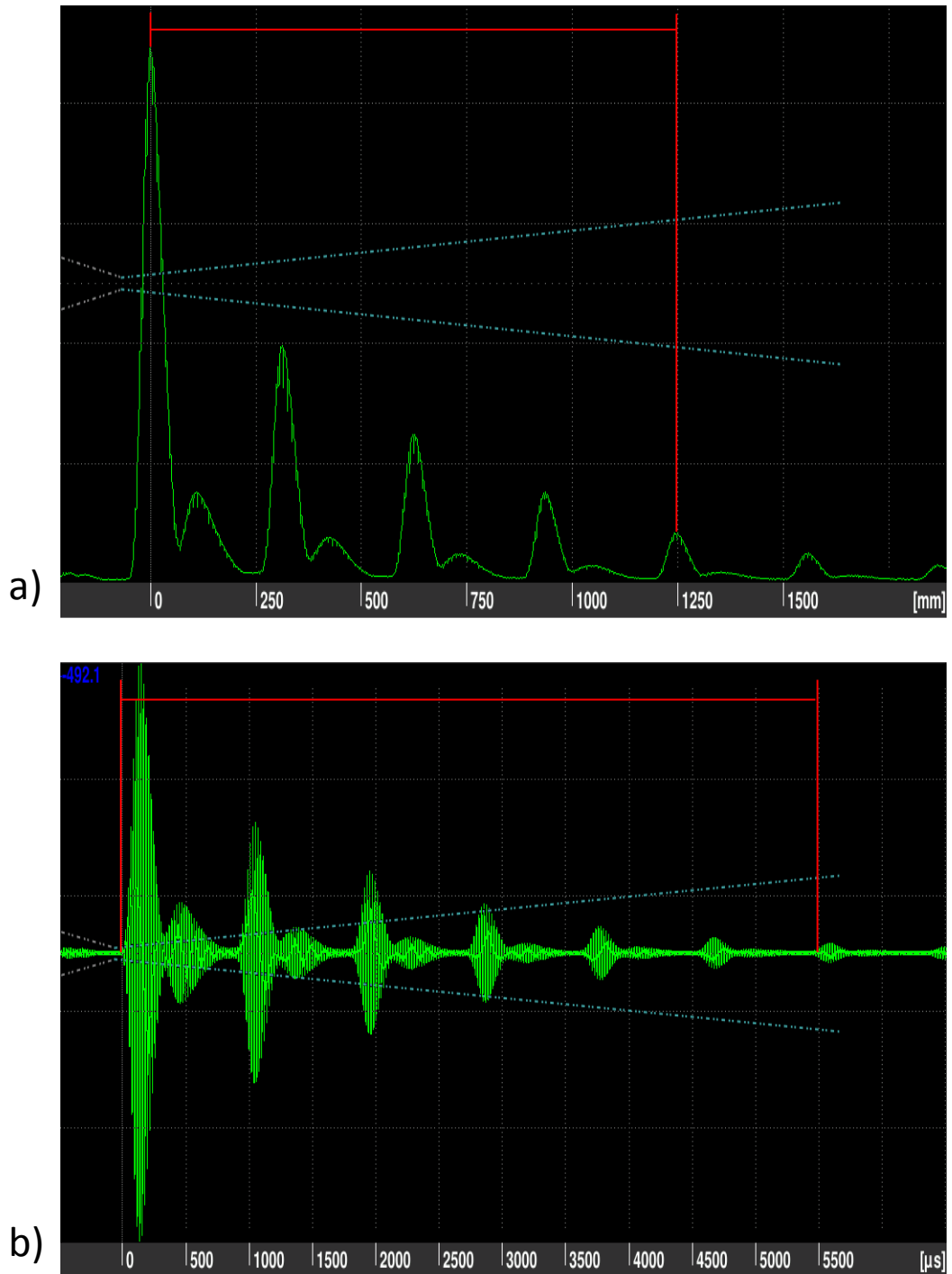


Figura 4.2 - Gráficos A-Scan de vários ciclos do sinal entre sonda emissora e recetora
 a) Escala espacial, b) Escala temporal.

Calculando a média, quer do espaço percorrido, quer do tempo entre picos, verificou-se que esse valor corresponde, aproximadamente, ao dobro dos valores obtidos analiticamente, visto que os picos de onda representados na Figura 4.2 correspondem a um ciclo (Emissor-Recetor-Emissor). Esses cálculos foram efetuados em 4.3 e 4.4.

$\frac{1250 (mm)}{4 (picos)} = 312,5 \frac{mm}{pico} \Rightarrow \frac{312,5}{2} = 156,25$	4.3
$\frac{5500(\mu s)}{6 (picos)} \cong 916,7 \frac{\mu s}{pico} \Rightarrow \frac{916,7}{2} = 458,35$	4.4

Tabela 4.1 - Cálculo do erro entre os valores experimentais e os valores medidos

Dimensão	Valor medido	Valor experimental	Erro (%)
Espaço (mm)	156,25	156	0,16
Tempo (μs)	458,35	454	0,96

Verifica-se, através dos resultados expostos na Tabela 4.1, que houve um erro percentual bastante baixo entre os valores obtidos analiticamente e os valores experimentais, pelo que se comprova a fiabilidade dos cálculos efetuados.

4.3 – Transmissividade de uma onda sonora através de um provete de PLA

Pretendeu-se investigar a percentagem de onda sonora que é de facto transmitida desde a sonda emissora até à sonda recetora, quando no seu trajeto encontra uma peça de PLA. Essa percentagem corresponde ao que é identificado na Figura 4.3 como T2.

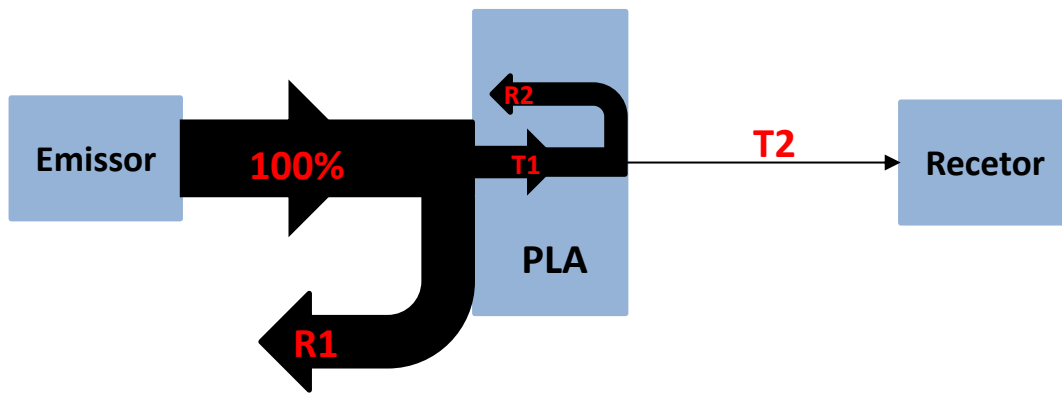


Figura 4.3 - Representação da Transmissividade da onda

Para determinar T2, foi necessário calcular o valor da Impedância acústica Z [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] do ar a temperatura ambiente e do PLA através da Equação 4.5, onde ρ [$kg \cdot m^{-3}$] é a densidade do meio e c [$m \cdot s^{-1}$] é a velocidade do som nesse meio. Os valores da impedância no ar e no PLA encontram-se calculados na Tabela 4.2.

$Z = \rho \times c$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]	4.5
--	-----

Tabela 4.2 - Impedância acústica dos meios envolvidos

Material	$\rho(kg.m^{-3})$	$c(m.s^{-1})$	$Z(kg.m^{-2}.s^{-1})$
ar (20° C)	1,204	343,3	413,3
PLA	1240	2220	2752800

Para se calcular a quantidade de onda que é refletida e transmitida, quando esta incide sobre uma interface que separa dois meios diferentes, foi necessário utilizar as Equações 4.6 e 4.7, que correspondem, respetivamente, aos valores da reflexão R e transmissão da onda T. Os resultados dos cálculos efetuados para se obter o valor das várias incógnitas da Figura 4.3 são apresentados na Tabela 4.3.

$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right)^2$	4.6
$T + R = 1$	4.7

Tabela 4.3 - Valores calculados das diversas reflexões e transmissões da onda

R1 (%)	T1 (%)	R2 (%)	T2 (%)
99,93996	0,06004	0,06001	0,00004

Comprova-se que apenas um ínfima (0,00004 %) parte da onda sonora transmitida pela sonda emissora chega de facto à sonda recetora, o que faz com que seja necessário aumentar bastante o ganho no equipamento, ou mesmo utilizar o amplificador de sinal, para se verificar o comportamento da onda.

4.4 – Provetes com 3 diferentes espessuras

Colocando o provete entre as sondas, pretendeu-se analisar a variação da amplitude do sinal com a variação da quantidade de material PLA entre as sondas. Para isso, isolou-se apenas o primeiro pico e verificou-se as variações da amplitude do pico máximo.

Na Figura 4.4 é possível verificar essas variações, sendo que os gráficos correspondem, às secções do componente com diferentes valores de espessura.

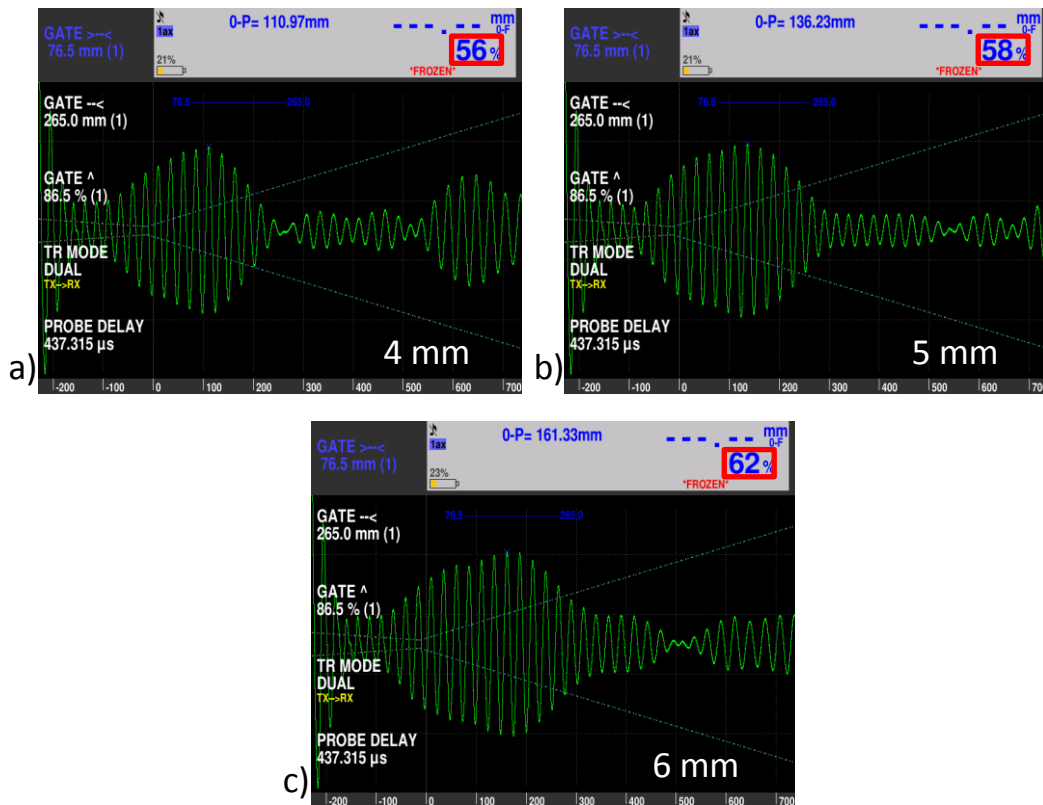


Figura 4.4 - Resultado dos ensaios A-Scan nas diferentes secções do provete
 a) 4 mm de espessura, b) 5 mm de espessura, c) 6 mm de espessura.

O valor dentro da caixa a vermelho, presente em cada um dos gráficos, corresponde à amplitude máxima da onda (valor percentual). É possível verificar que, com a diminuição de espessura de material entre sondas, a amplitude do pico vai reduzindo o que pode ser explicado pelo valor do coeficiente de atenuação do ar ser superior ao do PLA.

4.5 – Provete plano com 3 delaminações

Os defeitos existentes neste provete consistem, como referido em 3.5.2, em três delaminações de formas geométricas diferentes e com uma espessura de 0,5 mm, e encontram-se representadas na Figura 3.7.

4.5.1 – Termografia ativa pulsada

Conforme já estudado por Rui Santos [26], a *frame* com melhor contraste entre defeito e o resto da peça não se obtém logo após o fim da excitação, mas sim alguns segundos depois. Como tal, foram efetuados ensaios em modo reflexão, cuja montagem experimental se encontra na Figura 4.5, e em modo transmissão, no sentido de descobrir qual o momento em que a imagem de identificação dos defeitos apresenta um melhor contraste. Esses ensaios foram realizados tendo como fonte de excitação térmica, duas lâmpadas incandescentes lado a lado, cada uma com uma potência de 175 W (350 W no total), emitindo radiação durante 30 segundos. As

lâmpadas foram colocadas a uma distância de 700 mm do provete e a câmara a uma distância de 460 mm do provete. Na Figura 4.6 e na Figura 4.7 é possível verificar o resultado desses ensaios.

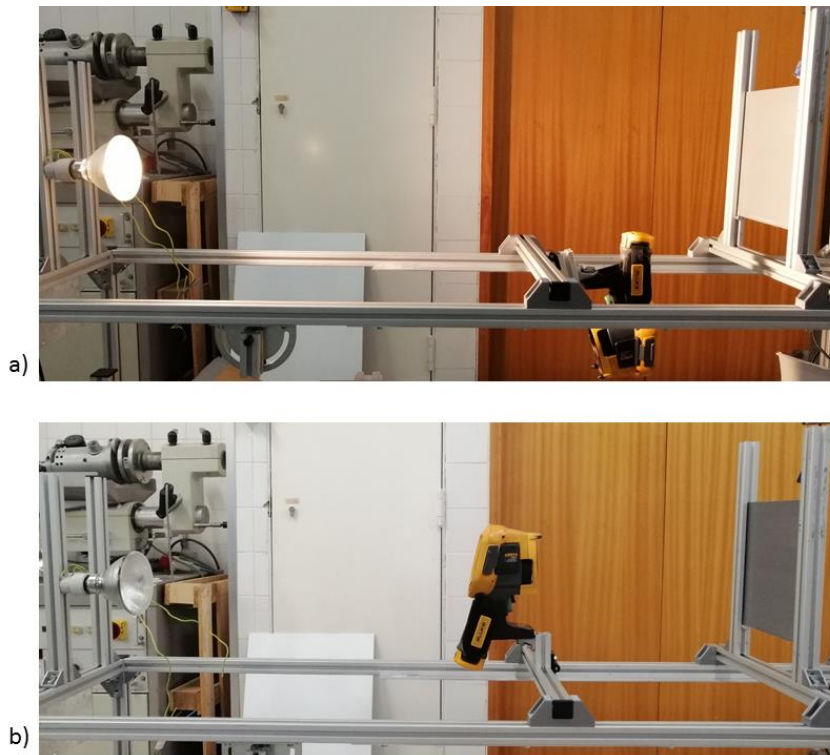


Figura 4.5 - Ensaio de TAP em modo reflexão, com lâmpada infra-vermelha com 175 W
 a) Aquecimento do Provete, b) Medição da variação temporal da temperatura do provete

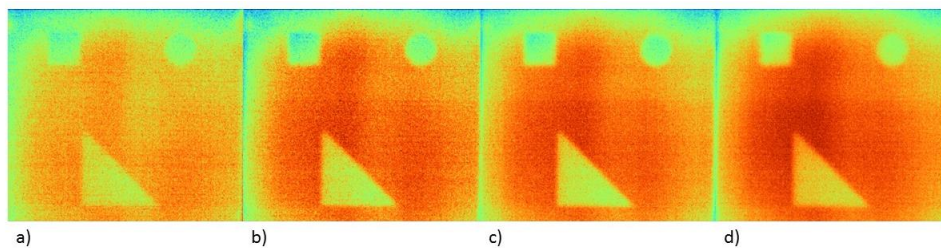


Figura 4.6 - Ensaio de TAP em modo Transmissão com uma fonte de excitação de 350 W durante 30 s
 a) $t = 0$ s, b) $t = 10$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 30$ s

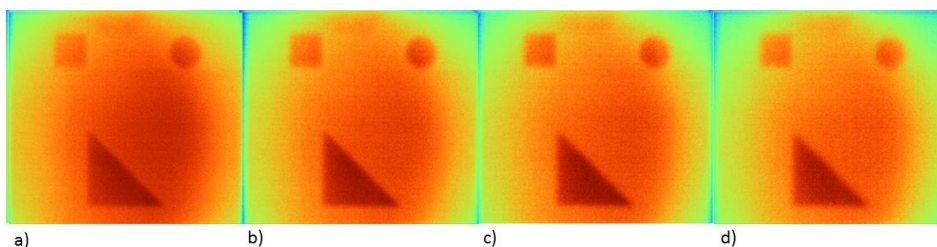


Figura 4.7 - Ensaio de TAP em modo Reflexão com uma fonte de excitação de 350 W, durante 30 s
 a) $t = 10$ s, b) $t = 20$ s, c) $t = 30$ s, d) $t = 40$ s

Em ambos os modos do ensaio é possível verificar que a zona central do provete é a que apresenta um gradiente térmico mais elevado, ao contrário do que acontece nas extremidades do mesmo, isto acontece pelo facto das fontes de radiação térmica estarem centradas com o centro do provete e pelo facto do provete se encontrar em contacto com os perfis Bosch nas suas laterais, o que facilita a transferência de calor.

Apesar de se verificar a identificação dos defeitos em todos os *frames* obtidos, tanto em modo transmissão, como em modo reflexão, verifica-se um melhor contraste das delaminações após os 20 s. Nos restantes ensaios optou-se então por retirar o frame correspondente a esse momento, para avaliação dos resultados.

Em ambos os casos é visível uma interface com grande variação de temperatura, entre zonas com e sem defeito, pois a presença desses defeitos altera a condução do calor nesse local, o que torna mais difícil de escoar o calor.

4.5.2 – Ultra-sons sem contato

Com o propósito de investigar quais as frequências mais indicadas para a identificação de delaminações com 0,5 mm de espessura e diferentes dimensões, assim como verificar quais os valores recomendados das distâncias emissor-provete e recetor-provete, realizaram-se ensaios A-Scan com todos os cinco pares de sondas.

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores das distâncias, de acordo com a legenda da Figura 4.1, utilizados na inspeção com cada par de sondas, por forma a garantir que o primeiro pico de excitação não se mistura com o ruído.

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados no ensaio A-Scan

Freq. Sonda (kHz)	D (mm)	N (mm)	L _E (mm)	L _R (mm)
50	45	73,7	162,5	162,5
75	30	49,2	112,5	112,5
120	19	31,5	37,5	37,5
200	11	17,6	37,5	37,5
400	25	182,1	55	55

É de notar que a colocação do provete a uma distância inferior ao valor campo próximo calculado para as sondas de 400 kHz, não impossibilitou a identificação dos defeitos, apesar do que foi abordado anteriormente. Os resultados obtidos no ensaio A-Scan deste provete com as sondas de 120 kHz encontram-se representados na Figura 4.8.

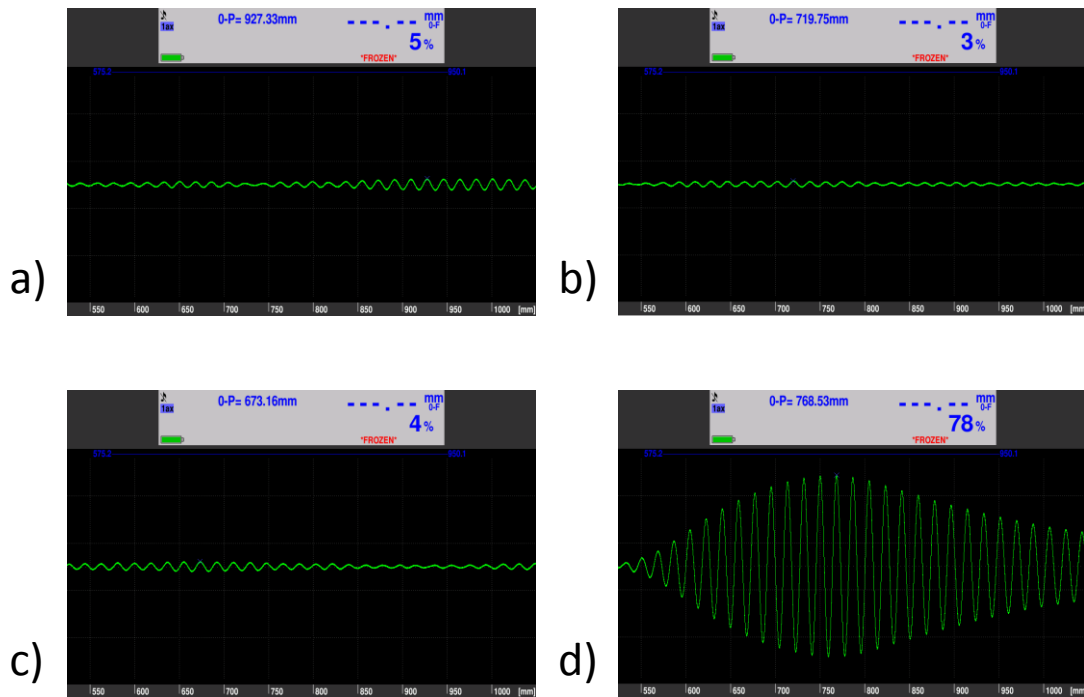


Figura 4.8 – Resultado do ensaio A-Scan com as sondas de 120 kHz nas várias zonas do provete
 a) Delaminação em forma de círculo, b) Delaminação em forma de quadrado, c) Delaminação em forma de triângulo, d) Zona sem defeito.

Nos ensaios A-Scan, realizados com todos os pares de sondas sobre este provete, verificou-se a existência dos defeitos, através da variação da amplitude do sinal entre zona defeituosa e zona sem defeito. Isto acontece devido à presença de interfaces, provocadas pela existência de defeitos, que fazem refletir as ondas fazendo com que o sinal se perca entre sonda emissora e sonda recetora.

No entanto, devido à existência de um limiar de deteção de defeitos, explicado anteriormente em 2.5, nem todas as sondas conseguiram distinguir as três delaminações. Isto acontece quando o comprimento de onda é maior do que a dimensão do defeito, o que faz com que a onda se transmita até à onda recetora, o que não ocorre com as restantes sondas, em que a onda reflete e a sua amplitude tende para 0.

Para calcular o comprimento de onda do sinal produzido por cada sonda emissora, utilizou-se a Equação 4.8, tendo em conta o valor da velocidade do som no PLA, já identificado na Tabela 2.1.

$\lambda = \frac{c_{PLA}}{f}$	4.8
-------------------------------	-----

Tabela 4.5 – Propriedades de cada par de sondas

Freq. Sondas (kHz)	Diâmetro (mm)	Comp. Onda (mm)
50	45	44,4
75	30	29,6
120	19	18,5
200	11	11,1
400	25	5,6

No ensaio realizado com as sondas de 50 kHz apenas foi possível identificar a delaminação em forma de triângulo, em que os catetos têm 70 mm, o que pode ser explicado com os valores da

Tabela 4.5. Com as sondas de 75 kHz os defeitos foram identificados mas com menor contraste e, apenas com a utilização de amplificador.

4.6 – Provete curvo com 3 delaminações

Foi proposto realizar a inspeção deste provete através da técnica de TAP, com o objetivo de verificar alterações na identificação das delaminações com diferentes formas geométricas, devido à curvatura da superfície da amostra. Não foi possível realizar o ensaio de USSC devido à dificuldade de realizar um varrimento em arco que mantenha as sondas a uma distância fixa do provete.

4.6.1 – Termografia ativa pulsada

Para este ensaio foi proposto avaliar a detecção das delaminações, variando a distância entre lâmpadas e aquecendo ambas as superfícies, no modo reflexão de TAP. Na Figura 4.9, encontram-se esquematizadas as montagens utilizadas para a inspeção dos provetes em modo reflexão e os respectivos resultados, obtidos 20 segundos após o fim da excitação. Todos os ensaios foram realizados com uma excitação térmica de 350 W de potência, durante 60 segundos, o que perfaz um tempo total do ensaio de 80 segundos. Na Figura 4.10 é possível comparar os resultados.

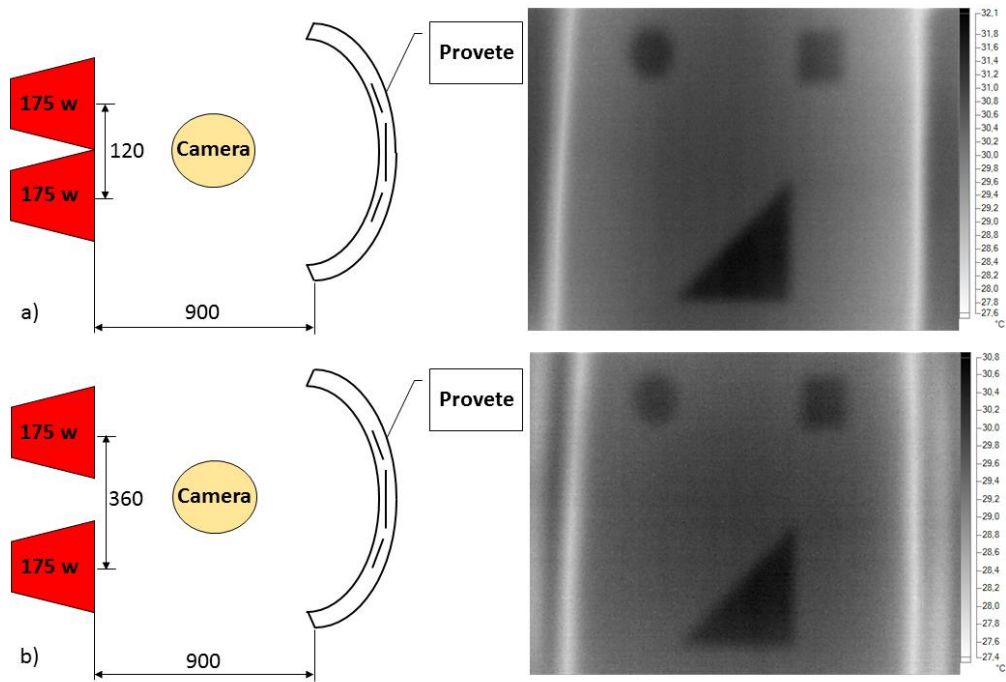


Figura 4.9 - Ensaio de TAP em modo reflexão com aquecimento da superfície côncava.

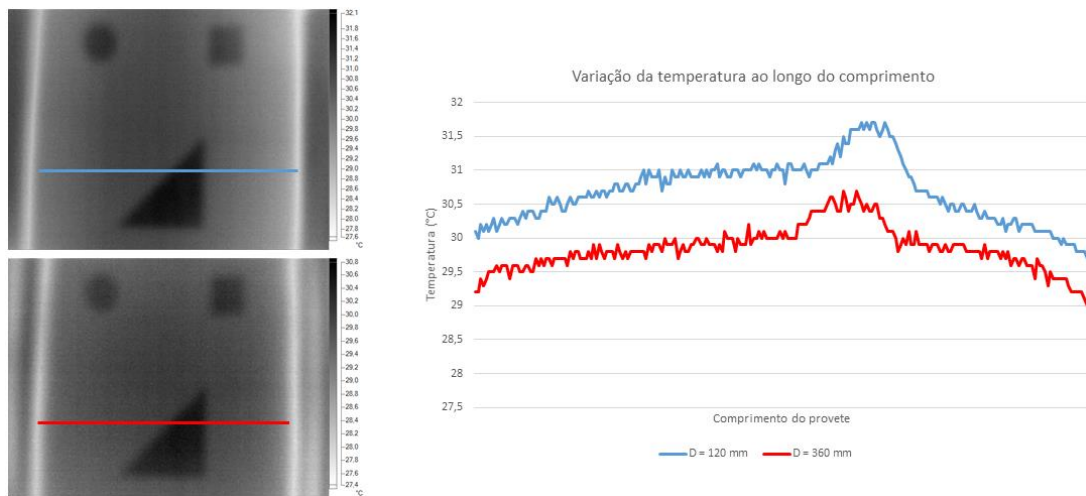


Figura 4.10 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete

Verifica-se uma diferença de temperatura entre a zona do defeito em forma de triângulo e o resto da peça superior quando as fontes de calor se encontram mais próximas. Os restantes defeitos também apresentam melhor contraste no primeiro caso.

Na Figura 4.11, encontram-se esquematizadas as montagens utilizadas para a inspeção dos provetes em modo reflexão e os respetivos resultados, nas mesmas condições da Figura 4.9. Na Figura 4.12 é possível comparar os resultados.

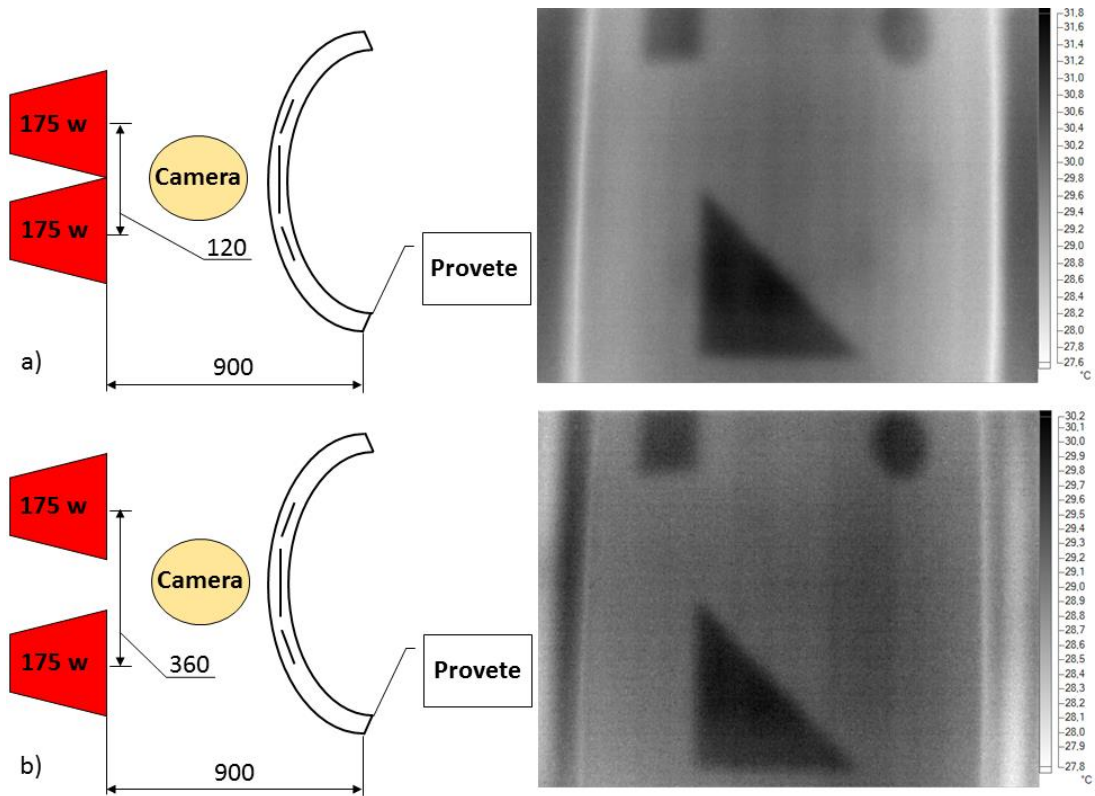


Figura 4.11 - Ensaio de TAP em modo reflexão com aquecimento da superfície convexa.

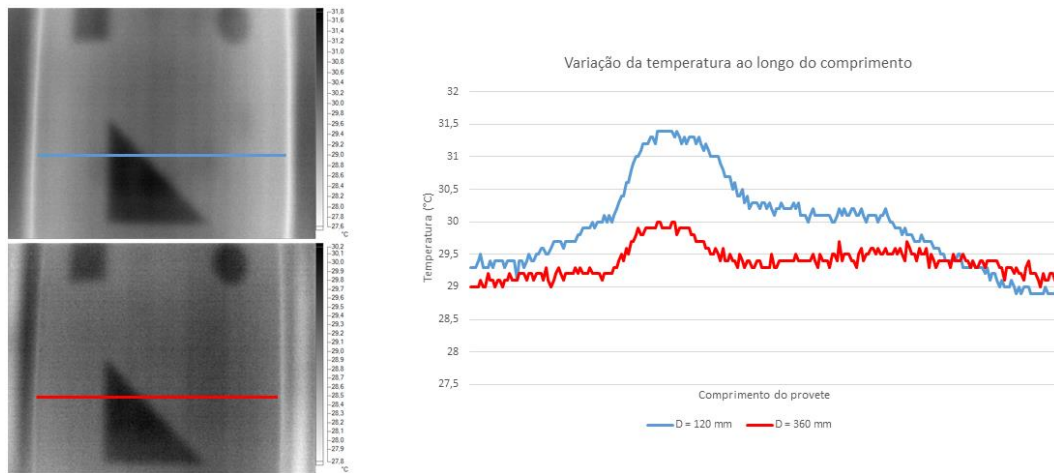


Figura 4.12 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete

Verifica-se claramente uma diferença de temperatura entre a zona do defeito em forma de triângulo e o resto da peça superior quando as fontes de calor se encontram mais próximas. No entanto, os restantes defeitos apresentam melhor contraste no segundo caso, devido à curvatura da peça.

4.7 – Provete plano com 15 delaminações

Pretendeu-se com este provete, avaliar a deteção e contraste de delaminações com diferentes geometrias, utilizadas para simular potenciais defeitos no interior de peças de material compósito, produzidas por FDM.

4.7.1 – Termografia ativa pulsada

Para este ensaio foi proposto avaliar a identificação das delaminações, variando as fontes de excitação, o tempo de excitação, e comparar os resultados obtidos em ambos os modos da técnica de TAP.

Na Figura 4.13 e na Figura 4.14 é possível verificar resultados obtidos por TAP, 20 segundos após o fim da excitação, com fontes com diferentes potências acesas durante 60 segundos (com um tempo total do ensaio de 80 segundos), com uma distância fonte-provete de 565 mm e uma distância câmara-provete de 460 mm.

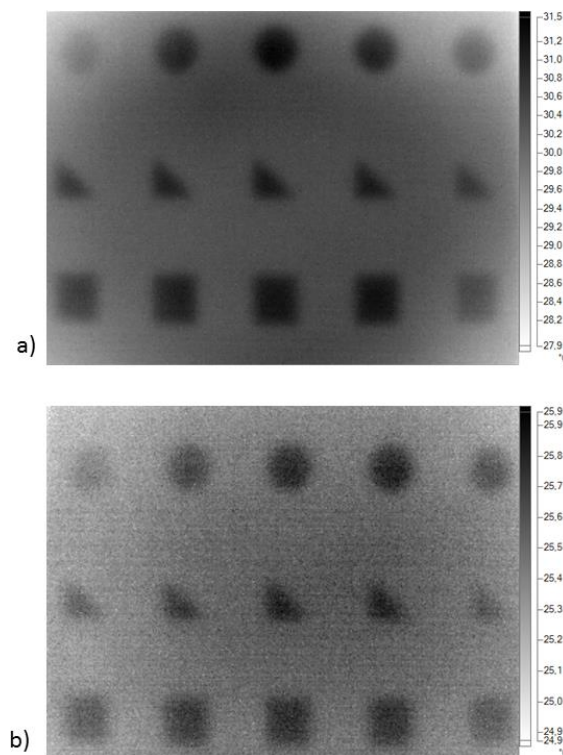


Figura 4.13 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte e provete, com excitação durante 60 s

a) $P = 175 \text{ W}$, b) $P = 320 \text{ W}$

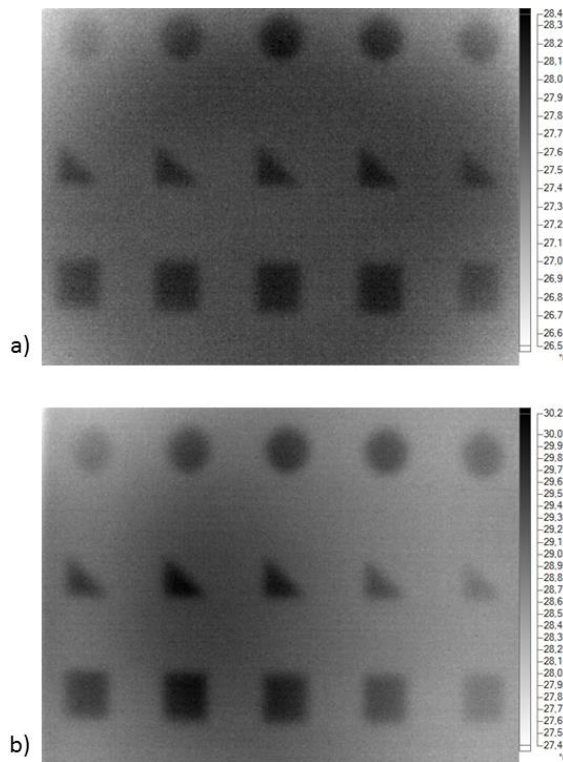


Figura 4.14 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte e provete, com excitação durante 20 s
 a) P = 175 W, b) P = 350 W

É possível verificar que apesar de ter mais potência no seu todo e de aquecer a peça mais uniformemente (diferença de temperaturas máxima de 1° C), a matriz de 16 lâmpadas é a fonte de excitação que produz menor calor, isto porque a sua radiação é mais facilmente dispersa devido à geometria das lâmpadas. Os defeitos foram detetados com bom contraste tanto nos ensaios com apenas uma lâmpada de 175 W como com duas, no entanto, a variação de temperatura entre a zona do defeito e o resto do provete é maior em Figura 4.14 b) (2,8° C), do que em Figura 4.14 a) (1,9° C), pelo que se optou pela potência de 350 W para a realização dos restantes ensaios.

Na Figura 4.15 compara-se os resultados do ensaio de TAP em ambos os modos, obtidos 20 segundos após o fim da excitação, tendo como fonte térmica duas lâmpadas com 175 W de potência lado a lado acesas durante 20 segundos (totalizando 40 segundos de tempo de ensaio), com uma distância fonte-provete de 565 mm e uma distância câmara-provete de 460 mm.

Na Figura 4.16 os valores da temperatura ao longo das retas desenhadas sobre o provete foram passadas para a forma de gráfico, no qual se pode verificar as suas variações ao longo da peça.

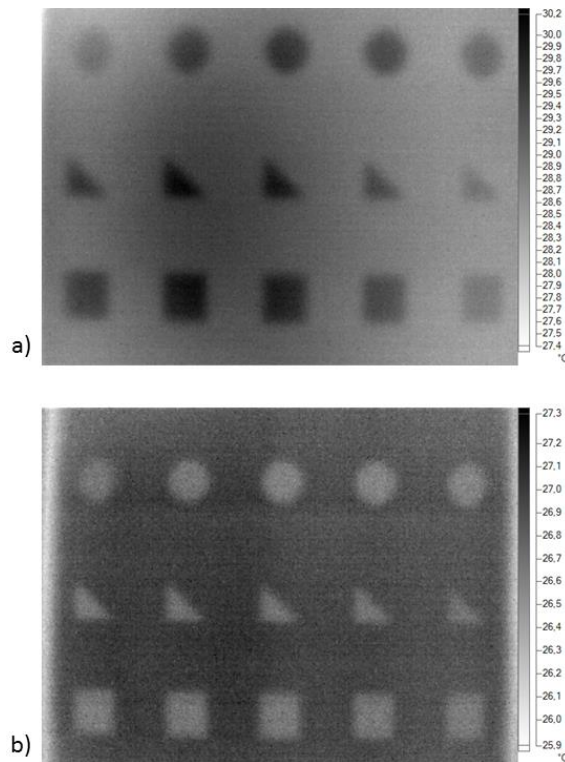


Figura 4.15 - Ensaio de TAP com uma distância de 565 mm, entre fonte com 350 W e provete, com excitação durante 20 s
 a) Reflexão, b) Transmissão.

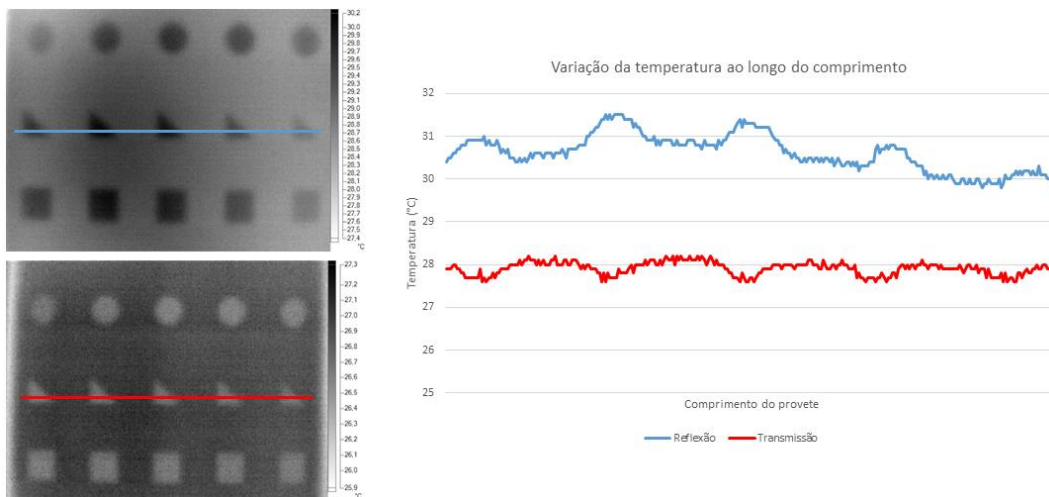


Figura 4.16 - Curvas de temperatura ao longo das linhas desenhadas sobre o provete

É possível verificar todas os defeitos existentes, em ambos os modos do ensaio, no entanto, no modo reflexão os defeitos aparecem com melhor contraste, visto que a temperatura nessas zonas apresenta variações superiores em relação ao material base no modo reflexão do que no modo transmissão, como se pode ver na Figura 4.16.

4.7.2 – Ultra-sons sem contato

Como referido em 4.5.2, as sondas que melhor identificaram as delaminações de menores dimensões com 0,5 mm de espessura foram as três de maior frequência (120, 200 e 400 kHz), como tal essas sondas foram utilizadas para realizar os ensaios C-Scan, cuja montagem se encontra ilustrada na Figura 4.1. Na Figura 4.17 pode-se visualizar o resultado obtido do ensaio C-Scan com 1 mm de resolução, pelas sondas com 200 kHz de frequência e com um piezoelétrico com 11 mm de diâmetro, situadas a uma distância de 75 mm entre elas. Este ensaio demorou cerca de 25 minutos.

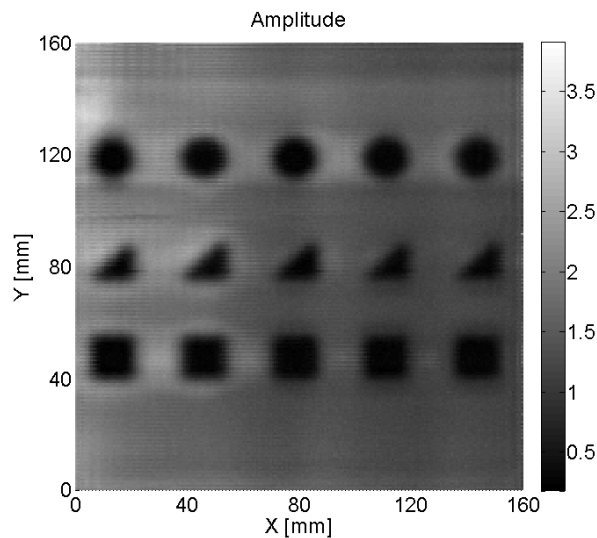


Figura 4.17 – Resultado do ensaio C-Scan com as sondas de 200 kHz

Como se pode comprovar pelo resultado exposto, todos os defeitos foram identificados com um bom contraste, independentemente de se encontrarem mais ao centro ou perto das extremidades do provete, contrariamente ao que acontece no ensaio de TAP.

4.8 – Provete curvo com 15 delaminações

Foi proposto realizar a inspeção deste provete através da técnica de TAP, com o objetivo de verificar alterações na identificação da matriz de defeitos, devido à curvatura da superfície da amostra e comparar os resultados obtidos em ambos os modos do ensaio. Não foi possível realizar o ensaio de USSC devido à dificuldade de realizar um varrimento em arco que mantenha as sondas a uma distância fixa do provete.

4.8.1 – Termografia ativa pulsada

Os ensaios foram realizados com o aquecimento em ambas as superfícies do provete, com duas lâmpadas de infravermelhos, com 175 W de potência (350 W no total), lado a lado e colocadas à altura do centro do provete, e em ambos os modos de reflexão e de transmissão.

Encontram-se na Figura 4.18 e na Figura 4.19, o esquema das montagens utilizadas para esses ensaios e os respectivos resultados, obtidos 20 segundos após o fim da excitação. Todos os ensaios foram realizados com uma fonte de excitação ótica de 350 W de potência, durante 60 segundos, o que perfaz um tempo total do ensaio de 80 segundos.

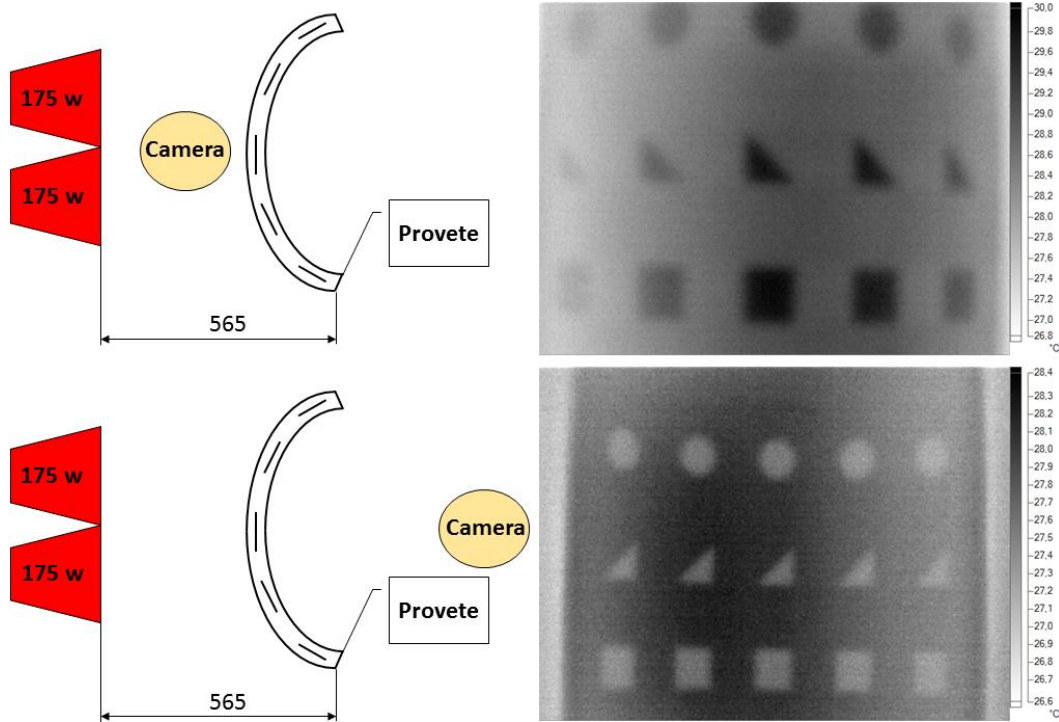


Figura 4.18 - Ensaio de TAP com aquecimento do lado convexo do provete

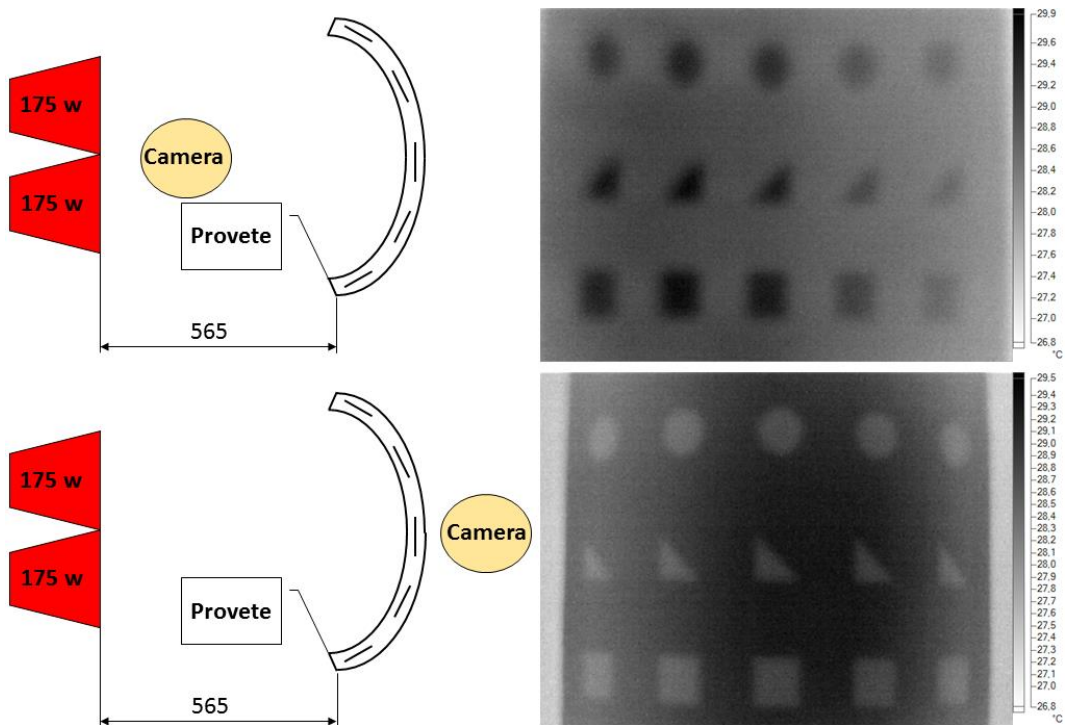


Figura 4.19 - Ensaio de TAP com aquecimento do lado côncavo do provete

É possível verificar que no modo reflexão, devido à curvatura do provete, os defeitos mais próximos das suas extremidades encontram-se com pior contraste. Isto ocorre devido à falta de uniformização da transferência de radiação sobre toda a superfície do provete. No entanto, no modo transmissão o mesmo não ocorre, porque o calor provocado pela radiação transfere-se mais uniformemente ao longo da espessura do provete.

4.9 – Provete reforçado com dois arames de NiTi

Com este provete pretendeu-se identificar o alinhamento das fibras de reforço de NiTi através das técnicas de USSC e de Termografia por efeito Joule no entanto, no primeiro caso não é possível visto que o diâmetro das fibras é bastante reduzido (0,1 e 0,25 mm), pelo que apresenta-se apenas os resultados obtidos pelo ensaio de Termografia.

4.9.1 – Termografia ativa pulsada

Realizaram-se para este provete ensaios de termografia ativa, com excitação térmica por efeito Joule, através da aplicação de uma corrente elétrica em ambos os arames de NiTi, com o objetivo de identificar o alinhamento das fibras de reforço. Foi aplicada uma corrente, alimentada por uma fonte elétrica, de 0,5 A durante 1 segundo nas extremidades de ambos os arames dispostos em série e em paralelo, e cujo resultado pode ser visto na Figura 4.20.

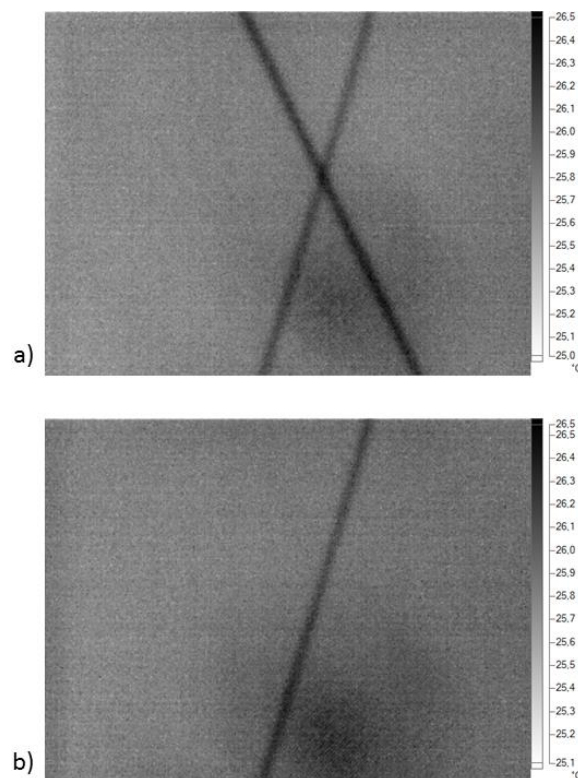


Figura 4.20 - Resultado do ensaio de Termografia por efeito de Joule, alimentado por uma corrente de 0,5 A durante 1 s

a) Arames em série, b) Arame em paralelo

Na Figura 4.20 a) é possível verificar que o arame de menor diâmetro se encontra a uma temperatura superior, isto pode ser explicado pelo efeito Joule visto que ambos se encontram alimentados pela mesma corrente. Quando colocados em paralelo (Figura 4.20 b)), apenas o arame de maior diâmetro é visível pois a corrente passa pelo caminho mais fácil de percorrer, que corresponde ao arame de maior secção.

4.10 – Provete com delaminação, reforçado com uma fibra de Kevlar e dois arames de Cu

Pretendeu-se com este provete, verificar o alinhamento das fibras de reforço metálico e não-metálico, bem como, identificar delaminações com reduzida espessura (0,1 mm), através das técnicas de TAP e USSC.

4.10.1– Termografia ativa pulsada

Foi realizado um ensaio de TAP, em modo reflexão para este provete, com uma lâmpada de 175 W como fonte de calor, acesa durante 20 segundos, com uma distância fonte-provete de 565 mm e com uma distância câmara-provete de 480 mm. O resultado obtido, 20 segundos após o fim da excitação, encontra-se na Figura 4.21, o que perfaz um tempo total do ensaio de 40 segundos.



Figura 4.21 - Resultado do ensaio de TAP com uma distância de 565 mm entre fonte (175 W) e provete, com excitação durante 20 s

Como é possível verificar, com o ensaio de TAP com uma lâmpada como fonte de calor, apenas a delaminação com direção oblíqua foi possível distinguir do material base, ainda que com fraco contraste, ao contrário das fibras de reforço.

4.10.2– Ultra-sons sem contato

Foi realizada a inspeção por USSC com o par de sondas com 200 kHz de frequência e 11 mm de diâmetro do piezoelétrico, colocadas a uma distância entre si de 75 mm e com uma resolução de 1 mm, durante o varrimento da peça que demorou cerca de 15 minutos. O seu resultado encontra-se exposto na Figura 4.22.

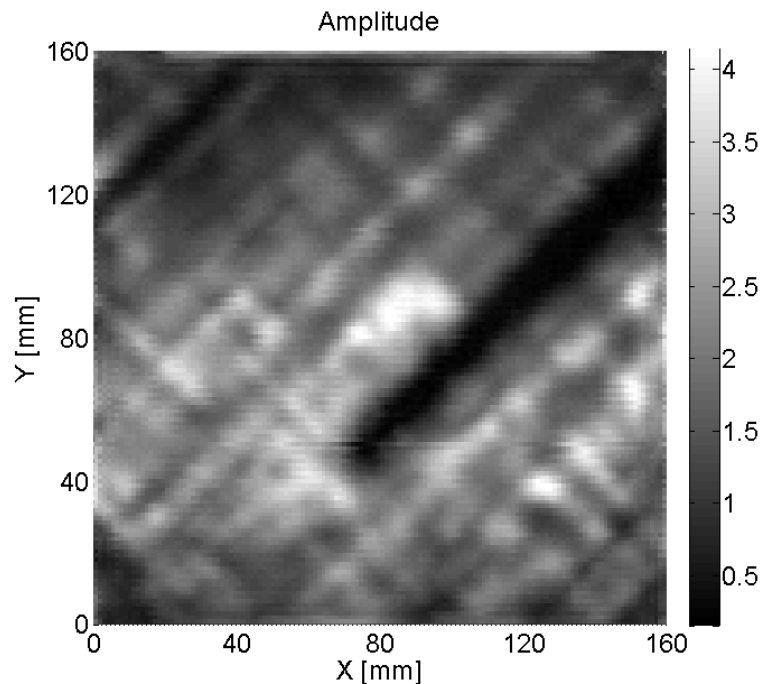


Figura 4.22 - Resultado do ensaio C-Scan

É possível verificar através do resultado apresentado que, tal como ensaio de TAP, não foi possível identificar a existência dos reforços presentes nem o seu alinhamento ao longo do provete, através do ensaio de USSC. No entanto, a delaminação de reduzida espessura foi identificada com um bom contraste, sem ser possível contudo conhecer a que profundidade da amostra se encontra.

4.11 – Provete com 3 fitas de PTFE

Pretendeu-se com a produção deste provete, avaliar a detetabilidade de delaminações com reduzida espessura (0,1 mm), identificar a localização em profundidade das diferentes fitas, bem como comparar os resultados obtidos com e sem as fitas de PTFE, em ambos os ensaios de TAP e USSC.

4.11.1– Termografia ativa pulsada

Através da inspeção do provete com 3 fitas de PTFE, pela técnica de TAP, verificou-se que quando as fitas de PTFE se encontravam inseridas no provete, não foi possível identificar qualquer uma das delaminações. Como tal apresentam-se apenas os resultados do ensaio sem a existência das fitas no interior do provete.

O ensaio foi realizado com uma distância entre lâmpadas (350 W de potência no total) e provete de 565 mm e uma distância entre câmara e provete de 480 mm, com excitação durante 30 segundos. O resultado do ensaio, obtido 20 segundos após o fim da excitação, encontra-se na Figura 4.23.

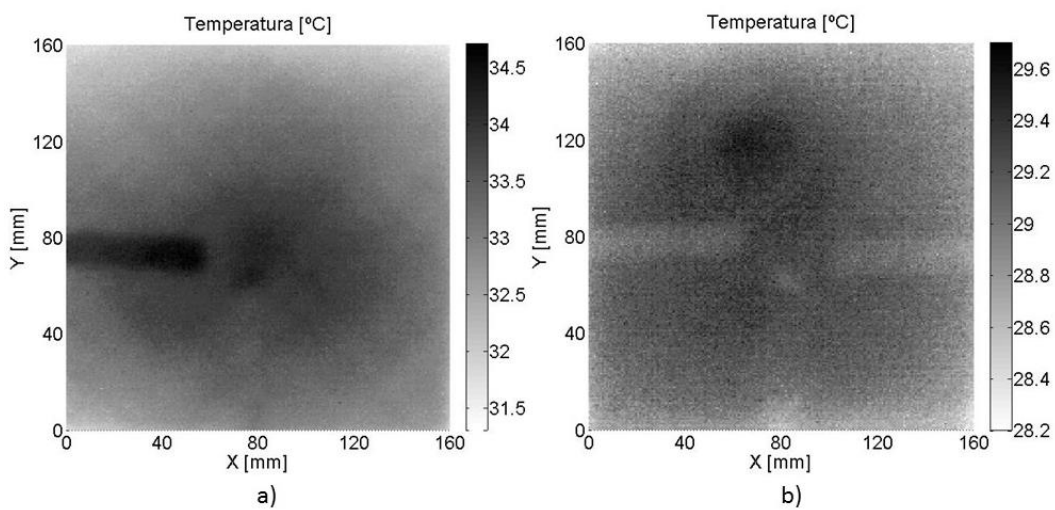


Figura 4.23 - Ensaio de TAP com fonte de excitação de 350 W, durante 30 s
a) Modo Reflexão, b) Modo Transmissão

É possível verificar que no ensaio em modo reflexão é apenas visível de forma explícita, o defeito que se encontra na camada mais próxima da superfície aquecida (lado esquerdo), enquanto o defeito que se encontra a meia espessura do provete (parte de baixo) é dificilmente visível e o mais afastado (lado direito) não é visível de todo. Este fenómeno pode ser explicado devido à grande diferença de temperaturas entre o defeito mais próximo e os restantes, isto porque devido à sua localização sub-superficial, o calor tem mais dificuldade em ser escoado para o resto da peça, enquanto os outros defeitos encontram-se em maior profundidade e por isso há mais quantidade de material para onde o calor pode escoar.

No ensaio em modo transmissão é possível verificar a existência de todos os defeitos, apesar de apresentar pior contraste do que o defeito identificado no modo reflexão, especialmente os que se encontram mais próximo (lado direito) e mais afastado (lado esquerdo) da câmara. A identificação de todos os defeitos deve-se à maior uniformização do calor no modo transmissão.

4.11.2– Ultra-sons sem contato

Foi proposto, tal como no ensaio de TAP, comparar os resultados da inspeção do provete com e sem a inserção das fitas de PTFE, os quais podem ser verificados na Figura 4.24. A inspeção foi realizada com o par de sondas com 200 kHz de frequência e 11 mm de diâmetro do piezoelétrico, colocadas a uma distância entre si de 75 mm e com uma resolução de 1 mm, durante o varrimento da peça que demorou cerca de 15 minutos.

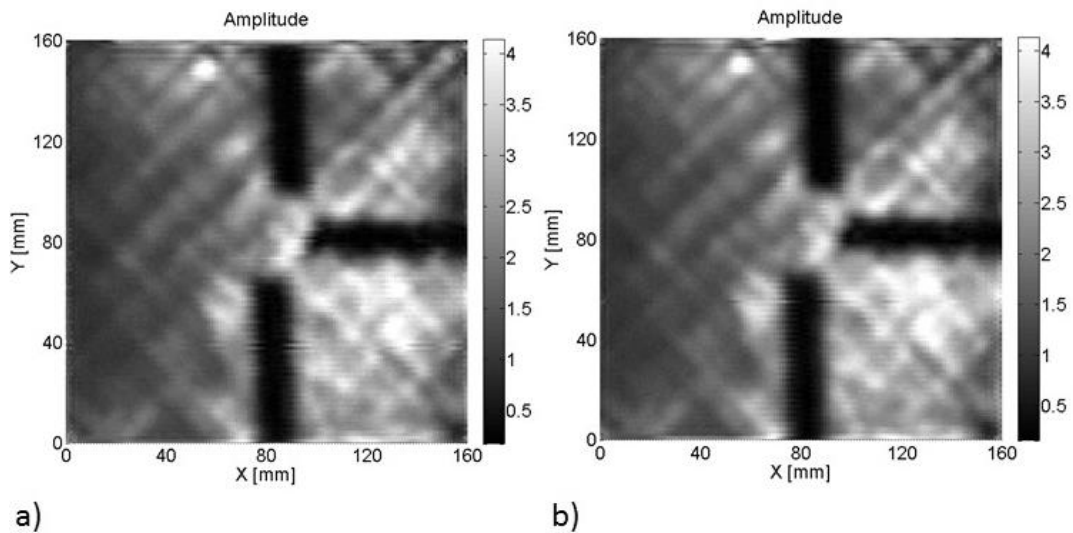


Figura 4.24 - Resultados do ensaio C-Scan com as sondas de 200 kHz a uma distância entre si de 75 mm

a) Provete sem fitas de PTFE, b) Provete com fitas de PTFE.

Como se pode verificar, ao contrário do ensaio de TAP, a existência da fita de PTFE no interior do provete não impossibilita a identificação do descolamento entre camadas, no entanto torna-se impossível distinguir em que plano ao longo da espessura se encontram cada um dos defeitos.

4.12 - Síntese do capítulo

Em suma, cada uma das técnicas de END utilizadas tem as suas vantagens e desvantagens no que toca à identificação de defeitos em compósitos produzidos por FDM com um enchimento de 100 %. Na Tabela 4.6 pode-se verificar uma síntese com as conclusões obtidas ao longo deste capítulo, que prova a complementaridade dos dos ensaios utilizados durante a realização deste trabalho.

Tabela 4.6 – Vantagens e desvantagens das técnicas de TAP e USSC

Técnica END	Vantagens	Desvantagens
Termografia Ativa	Ensaio simples e rápido (Entre 40 e 90 s)	Dificuldade na uniformização do calor nas peças inspecionadas
	Possibilidade de inspecionar peças curvas	Dificuldade de obter bom contraste dos defeitos situados nas extremidades das peças curvas
	Capacidade de distinguir defeitos a profundidades diferentes	Incapacidade de detetar a existência, entre camadas, de fitas de PTFE com 0,1 mm de espessura
	Capacidade de detetar alinhamento de fibras de reforço	Dificuldade de obter contraste uniforme em todos os defeitos de uma peça
	Capacidade de detetar delaminações com 0,5 mm de espessura	Incapacidade de detetar a existência de delaminações com 0,1 mm de espessura
	Dispensa o acesso a dois lados da peça (no modo reflexão)	
Ultra-sons sem contacto	Capacidade de detetar variações de espessura de uma peça	Ensaio complexo e demorado (C-Scan: entre 15 e 25 min)
	Obtenção de imagens de inspeção com um contraste uniforme em toda a superfície da peça	Dificuldade na inspeção de peças curvas
	Capacidade de detetar a existência, entre camadas, de fitas de PTFE com 0,1 mm de espessura	Incapacidade de distinguir defeitos a profundidades diferentes
	Capacidade de detetar delaminações com 0,5 mm de espessura	Incapacidade de detetar o alinhamento de fibras de reforço
	Capacidade de detetar a existência de delaminações com 0,1 mm de espessura	Necessidade de ter acesso a dois lados da peça

5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 – Introdução

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho exposto ao longo do documento, além de propostas para a realização de trabalhos futuros na mesma área em que este se enquadra.

5.2 – Conclusões

Realizaram-se Ensaios não Destrutivos das técnicas de Ultra-sons sem contacto (com acoplamento de ar) e Termografia Ativa Pulsada, com excitação ótica e com excitação elétrica em provetes de material compósito com matriz de PLA com diferentes dimensões e geometrias. Inspeccionaram-se provetes com variação de espessura, provetes com delaminações concebidas durante o desenho em *software* CAD, provetes com delaminações provocadas aquando da sua impressão, com inclusão de fitas de PTFE entre camadas de material e provetes com inserção de fibras de reforço de origem metálica e polimérica, com diferentes diâmetros.

Para a inspeção dos provetes produzidos, através das técnicas de END utilizadas, foram construídos equipamentos que permitem a variar os parâmetros associados a cada uma das técnicas, com o propósito de investigar os valores que garantem o melhor contraste dos defeitos.

Os ensaios por Ultra-sons permitiram confirmar a existência do limiar de deteção de defeitos pois, quando utilizadas as sondas com menor frequência (50 e 75 kHz) e, consequentemente, com maior comprimento de onda, estas não conseguiram detetar as delaminações de menores dimensões. Com os restantes pares de sondas (120, 200, 400 kHz) as delaminações quer com 0,1, quer com 0,5 mm de espessura foram detetadas e com bom contraste. Foi possível verificar a existência de fitas de PTFE entre camadas do material de matriz. O alinhamento da fibras de reforço inseridas nos provetes não foi possível de identificar por este método, devido ao reduzido diâmetro dos arames.

Nos ensaios por USSC comprovou-se que o aumento de material entre duas sondas colocadas a uma distância fixa durante o ensaio A-Scan, levou a um aumento da amplitude do sinal, o que pode ser explicado devido ao coeficiente de atenuação do som ser superior no ar.

Os ensaios de Termografia permitiram concluir que para o caso dos provetes planos, o modo em que se obteve melhor contraste das delaminações com 0,5 mm de espessura foi o modo reflexão. No caso dos provetes curvos, o modo onde se obteve melhor contraste foi no modo transmissão, o que se deve ao facto da curvatura da peça não permitir um aquecimento uniforme, algo que no modo transmissão é facilitado.

Em ambos os modos e, com duas fontes de excitação de 175 W colocadas lado a lado e a uma distância de 700 mm do provete, os resultados que apresentaram melhor contraste entre a zona do defeito e a restante peça, ocorreram 20 s após o cessar do pulso térmico ótico.

Verificou-se que os melhores resultados obtêm-se aquando da utilização de fontes de calor em menor número mas com elevadas potências.

A deteção de delaminações com 0,1 mm de espessura por TAP apresentaram um mau contraste, sendo que no modo reflexão apenas se identificou o defeito mais próximo da superfície aquecida e, no modo transmissão foi possível verificar que as delaminações se encontram entre diferentes camadas de material.

Apenas as fibras de reforço de material condutor inseridas nos provetes foram identificadas, tendo sido para isso, utilizado uma fonte de excitação elétrica. Devido à existência de arames com diferentes diâmetros num mesmo provete, estes apenas foram identificados em simultâneo quando colocados em série.

5.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros

Para desenvolvimentos futuros seria interessante promover novas abordagens como:

- O projeto e conceptualização de um equipamento para a técnica de TAP com fontes de elevada potência, que garanta a uniformização de radiação em toda a superfície a inspecionar.
- O projeto e conceptualização de um equipamento para a técnica de USSC, que consiga inspecionar peças curvas, garantido sempre a perpendicularidade entre a direção da onda e a área do componente inspecionada em cada instante.
- Desenvolver um mecanismo para implementação de ensaios da técnica de USSC em modo reflexão, no qual não é seja aceder a diferentes superfícies de um componente.
- A aplicação de novas técnicas emergentes para a inspeção de materiais compósitos, como é o caso da utilização das ondas na gama micro-ondas ou na gama dos TeraHertz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. Santos, and L. Quintino, "MAPPING OF NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR INSPECTION OF WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING," in *7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, 2017.
- [2] K. Oksman, M. Skrifvars, and J. Selin, "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites," vol. 63, pp. 1317–1324, 2003.
- [3] W. D. Callister and J. Wiley, "Materials Science and Engineering: An Introduction". *John Wiley & Sons, Inc.*, 2007.
- [4] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges," *Compos. Part B*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018.
- [5] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciú, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polym. Test.*, vol. 69, no. April, pp. 157–166, 2018.
- [6] T. Machado, Miguel & L. Inácio, Patrick & Santos, Rui & Gomes, André & Martins, Ana & Carvalho, Marta & Santos, "Inspection of composite parts produced by additive manufacturing: air-coupled ultrasound and thermography." in *58th Annual Conference Testing*, 2019.
- [7] "Composite material - Wikipedia." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material.
- [8] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017.
- [9] R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T. Jeong, H. Asahara, and K. Horiguchi, "Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation," *Scientific Reports*, pp. 4–5, 2016.
- [10] J. P. Lewicki *et al.*, "3D-Printing of Meso-structurally Ordered Carbon Fiber/Polymer Composites with Unprecedented Orthotropic Physical Properties," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. January, pp. 1–14, 2017.
- [11] E. M. and R. B. W. D. A. Roberson, C. M. Shemelya, "Expanding the Applicability of FDM-type Technologies Through Materials Development," *Rapid Prototyping Journal* vol. 21, pp. 137-143, 2015.
- [12] Markforged, "Composite printers," [Online]. Available: <https://markforged.com>.
- [13] R. Yang and Y. He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 75, pp. 26–50, 2016.
- [14] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes, and X. Maldague, "Experimental Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect

- (FOD) in CFRP,” *Sensors*, vol. 16, 2016.
- [15] V. Dattoma, R. Nobile, F. W. Panella, and A. Saponaro, “NDT thermographic techniques on CFRP structural components for aeronautical application,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 8, pp. 452–461, 2018.
- [16] T. Tavares, “Simulação de ensaios não destrutivos por termografia de componentes obtidos por fabrico aditivo,” Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, 2018.
- [17] A. Wronkowicz, K. Dragan, and K. Lis, “Assessment of uncertainty in damage evaluation by ultrasonic testing of composite structures,” *Compos. Struct.*, vol. 203, no. June, pp. 71–84, 2018.
- [18] “Attenuation of Sound Waves,” [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attenuation.htm>.
- [19] D. E. Chimenti, “Review of air-coupled ultrasonic materials characterization,” *Ultrasonics* vol. 54, pp. 1804–1816, 2014.
- [20] D. Tarrazó-serrano, S. Castiñeira-ibáñez, and E. Sánchez-aparisi, “MRI compatible planar material acoustic lenses,” *Applied Sciences*, vol.8, 2018.
- [21] N. Parker, M. L. Mather, S. P. Morgan, and M. J. Povey, “Longitudinal acoustic properties of poly (lactic acid) and poly (lactic-co-glycolic acid),” *Biomedical Materials*, vol.5, 2010.
- [22] J. Neuenschwander, R. Furrer, and A. Roemmeler, “Application of air-coupled ultrasonics for the characterization of polymer and polymer-matrix composite samples,” *Polym. Test.*, vol. 56, pp. 379–386, 2016.
- [23] “IRS-I_ Self-Contained Thermal Imaging Systems,” [Online]. Available: <https://www.automationtechnology.de/cms/en/irsx-i-self-contained-thermal-imaging-systems/>
- [24] “Câmara Infravermelha Fluke Ti400 _ Fluke,” [Online]. Available: <https://www.fluke.com/pt-pt/produto/camaras-de-imagens-termicas/ti400>
- [25] “DIO 1000 LF - STARMANS.” [Online]. Available: <http://www.starmans.net/product/dio-1000-lf/>
- [26] R. Santos, “Ensaio Não Destrutivo para compósitos produzidos por Manufatura Aditiva: Avaliação de Termografia Ativa Pulsada e Ultra-sons sem contacto,” Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, 2019.