



Rui Pedro Alface Santos

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Ensaio Não Destrutivo para Compósitos
Produzidos por Manufatura Aditiva: Avaliação de
Termografia Ativa Pulsada e Ultra-sons Sem Contacto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor Doutor, FCT

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado

Vogais: Prof. Doutora Marta Isabel Pimenta Verdete da
Silva Carvalho

Doutor Miguel Araújo Machado

Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Ensaio Não Destrutivo para Compósitos Produzidos por Manufatura Aditiva:
Avaliação de Termografia Ativa Pulsada e Ultra-sons Sem Contacto

Copyright © 2019 Rui Pedro Alface Santos

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

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

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação bem como o desenvolvimento do meu percurso académico não seria possível sem o apoio, carinho e orientação dos meus pais, e porque o sucesso de um filho é também o sucesso dos seus pais, a eles dedico este trabalho.

Quero agradecer ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos, não só pela orientação e constante acompanhamento desta dissertação, mas também pelo exemplo de rigor e entusiasmo pelo trabalho científico que me transmitiu.

Um profundo agradecimento ao Eng^o Patrick Inácio e ao Eng^o Valdemar Duarte pelo conhecimento que comigo partilharam, e ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães pelo apoio técnico que prestaram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço o apoio e amizade dos meus caros colegas Tiago Rodrigues, David Negrão, Tiago Tavares e José Figueira.

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.



Processos híbridos baseados em Fabrico Aditivo de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Cofinanciado por:

COMPETE
2020

PORTUGAL
2020

 **UNIÃO EUROPEIA**
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Lisb@20²⁰

RESUMO

A utilização de materiais compósitos em aplicações de responsabilidade tem aumentado nas últimas décadas, sobretudo em aplicações onde o peso dos componentes tem um forte impacto económico, como é o caso da indústria aeronáutica e automóvel. Porém com a introdução de novos processos de produção e novos materiais surgem novos defeitos.

A presente dissertação pretende avaliar a utilização de técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END) por Termografia Ativa Pulsada (TAP) e Air Coupled Ultrasound (ACUS) para compósitos de matriz termoplástica produzidos por Manufatura Aditiva (MA). Para reproduzir os defeitos identificados nestes materiais foram produzidos por *Fused Deposition Modeling* (FDM) provetes em poliacido láctico (PLA) e poliamida (PA) com delaminações paralelas e perpendiculares ao plano da superfície. Foram também produzidos provetes com várias interfaces e espessuras para avaliar os efeitos da descontinuidade e espessura do material nos resultados obtidos pelos testes de ACUS, bem como provetes para avaliar a possibilidade de deteção de defeitos por difração dos ultra-sons. Desenvolveu-se ainda um protótipo para END, bem como um sistema automatizado para inspeção de superfícies curvas.

Dos ensaios realizados conclui-se que a TAP em modo reflexão, quando comparada como o modo transmissão, permite uma melhor identificação de delaminações paralelas ao plano da superfície, desalinhamentos e falta de adesão das fibras de reforço; e que ACUS em modo transmissão permite identificar delaminações paralelas e perpendiculares ao plano da superfície.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio Não Destrutivo (END)

Termografia Ativa Pulsada (TAP)

Ultra-sons Com Acoplamento de Ar (ACUS)

Manufatura Aditiva (MA)

Delaminações

ABSTRACT

The use of composite materials in applications of responsibility has increased in the last decades, especially in applications where the components weight has a strong economic impact, as is the case of the aeronautics and automobile industries. However, with the introduction of new production processes and new materials, new defects arise.

The present dissertation intends to evaluate the use of Non-Destructive Testing (NDT) by Pulsed Thermography (PT) and Air Coupling Ultrasonic (ACUS) for thermoplastic matrix composites produced by Additive Manufacturing (MA). In order to reproduce the defects identified in these materials, test samples were produced by Fused Deposition Modelling (FDM) polyester lactic acid (PLA) and polyamide (PA) with parallel and perpendicular delaminations to the surface plane. Test pieces with various interfaces and thicknesses were also produced to evaluate the effects of the discontinuity and thickness of the material on the results obtained by the ACUS tests, as well as test pieces to evaluate the possibility of detecting defects by ultrasonic diffraction. A prototype for NDT was developed as well as an automated system for inspection of curved surfaces.

From the tests carried out, it was concluded that the PT in reflection mode, when compared to the transmission mode, allows a better identification of delaminations parallel to the plane of the surface, misalignments and lack of adhesion of the reinforcing fibers; and that ACUS in transmission mode allows the identification of parallel and perpendicular delaminations to the plane of the surface.

KEY-WORDS

Non-Destructive Testing, (NDT)

Pulse Thermography, (PT)

Air Coupled Ultrasound, (ACUS)

Additive Manufacturing, (AM)

Delaminations

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 – Objetivos	2
1.3 – Trabalho desenvolvido	2
1.4 – Estrutura da Dissertação	3
1.5 – Resultados e conclusões.....	3
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Produção de Compósitos por <i>Fused Deposition Modeling</i>	6
2.2.1 Defeitos comuns em materiais compósitos.....	9
2.3 – Técnicas de Ensaio Não Destrutivos	10
2.3.1 Ultra-sons com acoplamento de ar	10
2.3.2 Termografia	16
Termografia Ativa Pulsada (TAP).....	19
3 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E PRODUÇÃO DE PROVETES.....	29
3.1 – INTRODUÇÃO	29
3.2 – EQUIPAMENTO DE TERMOGRAFIA	30
3.2.1 – Requisitos Funcionais.....	31
3.2.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento	31
3.3 – Equipamento de Ultra-sons	36
3.3.1 – Requisitos Funcionais.....	36
3.3.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento	36
3.4 – Projeto e produção de provetes.....	39
3.4.1 – Provetes 1	39
3.4.2 – Provetes 2	40
3.4.3 – Provetes 3	41
3.4.4 – Provetes 4	41
3.4.5 – Provetes 5 e 6	42
3.4.6 – Provetes PTFE	43

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
4.1 – Introdução	45
4.2 – Resultados da Termografia	46
4.2.1– Resultados provete 1	46
4.2.2– Resultados provete 2	48
4.2.3– Resultados provete 3	49
4.2.4– Resultados provete 5	50
4.2.5– Resultados provete 6	51
4.3 – Resultados dos Ultra-sons.....	51
4.3.1– Resultados provete 2	51
4.3.2– Resultados provete 3	54
4.3.3– Resultados provete 4	55
4.3.4– Resultados provetes PTFE	57
4.3.5– Resultados provete de fibra de carbono	58
5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59
5.1 – Introdução	59
5.2 – Conclusões.....	59
5.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de impressora 3D fabricada pela <i>Stratasys</i> (Retirado de [14]).....	8
Figura 2.2 Representação de vazios em componentes produzidos por FDM,.....	9
Figura 2.3: Representação física da Equação (2.5)	13
Figura 2.4: Coeficiente de atenuação no ar, em função da frequência da onda (Retirado de [22])......	15
Figura 2.5 – Resultados de vibrotermografia para diferentes posições do transdutor de ultra-sons. Retirado de [6].....	18
Figura 2.6 – Imagens de TAP de placas de compósito de fibra de vidro com inserções de a) alumínio, e b) cortiça. (Adaptado de [5])	19
Figura 2.7 – Representação de ensaio de Termografia Ativa.....	20
Figura 2.8 – Imagens de contraste de fase para frequências de: 3 Hz (a), 1 Hz (b), 0.6 Hz (c), 0.2 Hz (d), 0.1 Hz (e), 0.05 Hz (f), 0.04 Hz (g),	23
Figura 2.9 Sequência de imagens de TAP adquiridas nos instantes:.....	25
Figura 2.10 Imagens de fase de TM a), b), c), d), e); e de TPF f), g), h), i), j) para 16,7 mHz, 33,3 mHz, 50,0 mHz, 66,7 mHz e 83,3 mHz, respectivamente	25
Figura 2.11 Imagens dos componentes da regressão aplicada a dados termográficos de um ensaio de TAP. (Retirado de [30])......	27
Figura 2.12 Imagens termográficas reconstruídas pelo método de PLSR. (Retirado de [30]).	27
Figura 2.13 Imagens termográficas reconstruídas pelo método de PLSR com a subtração do primeiro componente da regressão. (Retirado de [30])......	28
Figura 3.1 – Scanner 3D para END	30
Figura 3.2 – Bancada de ensaios de termografia	32
Figura 3.3 – Vista isométrica frontal do módulo de termografia.....	33
Figura 3.4 – Vista isométrica traseira do módulo de termografia.....	33
Figura 3.5 – Esquema do funcionamento do sistema de inspeção automatizada de termografia	34
Figura 3.6 –Montagem de módulo de termografia sem a câmara termográfica.....	35
Figura 3.7 Módulo de inspeção automatizada de ultra-sons.	37
Figura 3.8 Modelação do pórtico de ultra-sons.	38
Figura 3.9 Montagem de C-scan no pórtico de ultra-sons.....	38
Figura 3.10 – Provete 1.	39

Figura 3.11 – Provete 2.	40
Figura 3.12 – Provete 3.	41
Figura 3.13 – Provete 4.	41
Figura 3.14 – Provetes 5 e 6.....	42
Figura 4.1 – Termografias por reflexão do provete 1 com 20 s de excitação.	46
Figura 4.2 – Termografias por transmissão do provete 1 com 20 s de excitação.....	46
Figura 4.3 –Perfis de temperatura do provete 1 no instante $t= 30$ s em modo reflexão a), e em modo transmissão b).	47
Figura 4.4 – Termografias por reflexão do provete 2 com 30 s de excitação.	48
Figura 4.5 – Termografias por reflexão do provete 4 com 30 s de excitação.	49
Figura 4.6 – Termografias do provete 5 nos instantes $t=0$ s e $t=5$ s após o fim da excitação elétrica de: a1 e a2) 0,8 A durante 20 s; b1 e b2) 1,5 A durante 5 s; c1 e c2) 2 A durante 3 s	50
Figura 4.7 – Termografia do provete 6 no instante $t=5$ s após o fim da excitação elétrica de 2 A durante 5 segundos.....	51
Figura 4.8 – A-Scans do provete 2 com sondas de 50 kHz e 111 dB de ganho.....	52
Figura 4.9 – C-Scans do provete 2 com sondas de 50 kHz a 55 mm de distância e 111 dB de ganho. Scan de 80x80 mm e resolução de 1 mm.	53
Figura 4.10 – C-Scan do provete 2 com sondas de 200 kHz a 30 mm de distância e 111 dB de ganho. Scan de 80 x 80 mm e resolução de 1 mm.	54
Figura 4.11 – A-scans do provete 3 com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 75 dB de ganho. a) A-scan a 30 mm do defeito b) A-scan sobre o defeito.....	55
Figura 4.12 – C-scan do provete 3 com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 75 dB de ganho. Scan de 80x80 mm e 1 mm de resolução.	55
Figura 4.13 – A-scans do provete 4 com sondas de 200 kHz a 30 mm do provete e 95 dB de ganho.	56
Figura 4.14 – C-scan do provete 4 com sondas de 200 kHz a 30 mm do provete e 50 dB de ganho. Scan de 80 x 80 mm e resolução de 1 mm.	56
Figura 4.15 – A-Scans do provete de PTFE com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 111 dB de ganho.....	57
Figura 4.16 – C-scans do provete de fibra de carbono com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e ganho de 60 dB.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Coeficientes e Energia de Transmissão para diferentes materiais com acoplamento de água e ar (Retirado de [21]).....	14
Tabela 2.2. Coeficientes de Transmissão e Energia Transferida para o acoplante em função da camada de emparelhamento de Impedância Acústica no elemento piezoelétrico (Retirado de[21]).	14
Tabela 2.3 – Profundidade de detecção em função da frequência de modulação. (Adaptado de [6])	22
Tabela 3.1 Configurações dos ensaios com provetes de PTFE.	43

NOMENCLATURA

α	Difusividade Térmica [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]
c	Velocidade do som [$\text{m}.\text{s}^{-1}$]
λ	Comprimento de onda [m]
μ	Comprimento de difusão térmica [m]
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade [$\text{kg}.\text{m}^{-3}$]
f	Frequência [Hz]
E	Modulo de Young [Pa]
V_L	Velocidade de propagação das ondas Longitudinais [$\text{m}.\text{s}^{-1}$]
V_T	Velocidade de propagação das ondas Transversais [$\text{m}.\text{s}^{-1}$]
Z	Impedância Acústica [Rayl]
ACUS	<i>Air Coupled Ultrasound</i>
CI	Correntes Induzidas
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EMF	Efeito Memória de Forma
END	Ensaio Não Destrutivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FMTWI	<i>Frequency Modulated Thermal Wave Imaging</i>
MA	Manufatura Aditiva
NI	<i>National Instruments</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PA 6 e 12	Poliámidas 6 e 12
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PCT	<i>Principal Component Thermography</i>
PLSR	<i>Partial Least Squares Regression</i>
PEEK	<i>Polyether Ether Ketone</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa
US	Ultra-sons
TAP	Termografia Ativa Pulsada
TM	Termografia Modulada
TPF	Termografia Pulsada de Fase

WAAM

Wire Arc Additive Manufacturing

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Estado da Arte e Motivação

A utilização de materiais compósitos em aplicações de responsabilidade tem aumentado nas últimas décadas, sobretudo em aplicações onde o peso dos componentes tem um forte impacto monetário, como é o caso da indústria aeronáutica [1] e automóvel. A produção de compósitos com recurso a processos de Manufatura Aditiva (MA) permite combinar as propriedades físicas típicas de materiais compósitos com um processo de produção automatizado. Porém, com a introdução de novos processos de produção e novos materiais surgem também novos defeitos resultantes desses processos, o que leva à necessidade de adaptar ou desenvolver técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END) para estes componentes.

A Termografia é utilizada como END desde a década de 90 [2], e encontra-se exaustivamente estudada a aplicação a compósitos convencionais de técnicas como Termografia Ativa Pulsada (TAP), Termografia Modulada (TM), Termografia Pulsada de Fase (TPF) [3-6].

Os Ultra-sons são utilizados em END desde 1950 [7], contudo apenas nas últimas duas décadas se desenvolveram sondas de Ultra-sons com Acoplamento de Ar (ACUS) [8, 9], que permitem realizar inspeções sem contacto com o componente.

A presente dissertação pretende comparar e avaliar a utilização de técnicas de Termografia e Ultra-sons com Acoplamento de Ar como END para compósitos de matriz termoplástica produzidos por *Fused Deposition Modelling* (FDM).

1.2 – Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação esteve relacionado com um projeto de investigação denominado FIBR3D - Processos híbridos baseados em Fabrico Aditivo de compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibras longas ou contínuas, sendo o Núcleo de Tecnologia Industrial do UNIDEMI responsável pelo desenvolvimento de sistemas de inspeção baseados em END.

Consequentemente o primeiro objetivo, de carácter científico, consiste em compreender, avaliar, e identificar defeitos com recurso a uma técnica de Termografia e uma técnica de ACUS. O segundo objetivo consiste em desenvolver um sistema de inspeção automatizada para as duas técnicas de END estudadas.

1.3 – Trabalho desenvolvido

Tendo em conta os objetivos definidos, desenvolveu-se uma bancada de ensaios de termografia e um pórtilco de ensaios de ACUS com o propósito de realizar ensaios experimentais. Desenvolveram-se também módulos de inspeção automatizada para cada uma das técnicas, sendo estes módulos incorporados num Scanner 3D que permite realizar inspeções em componentes com geometria complexa de forma automatizada. Nos ensaios de termografia foi utilizada a técnica de TAP em modo transmissão e reflexão com recurso a uma câmara termográfica FLUKE 400 TI. Os ensaios de ACUS foram realizados em modo transmissão com recurso a um equipamento de ultra-sons DIO LF 1000 Flaw Detector, bem como sondas de ACUS de 50, 200 e 400 kHz.

Para a realização dos ensaios foram projetados provetes com diferentes orientações e geometrias de defeitos de tipo delaminação e falta de adesão entre reforço e matriz. Estes provetes foram produzidos por FDM com recurso a filamentos de Ácido Poliláctico (PLA) e Poliamida (PA6). Realizaram-se ainda ensaios de ultra-sons num provete de Teflon (PTFE) e numa placa de uma liga de magnésio, com o objetivo de avaliar os efeitos da presença de interfaces e da variação de espessura do material, e avaliar a possibilidade de deteção de defeitos por difração de som.

1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, nos quais se descreve os temas abordados e o trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte dos temas abordados, estando dividido em duas partes distintas, em 2.2 apresenta-se o processo de produção dos compósitos e os defeitos resultantes do processo, em 2.3 apresenta-se o contexto histórico, os fundamentos físicos, as diferentes técnicas e variantes, e resultados obtidos por autores para Ensaio Não Destrutivo de Termografia e Ultra-sons com acoplamento de ar.

No Capítulo 3 é descrita a concepção, projeto e construção de equipamentos laboratoriais e dos provetes sobre os quais incidiu o trabalho experimental.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados, sendo em 4.2 apresentados os resultados dos ensaios de Termografia Ativa Pulsada e em 4.3 os resultados dos Ultra-sons com Acoplamento de Ar.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e propostas para desenvolvimentos futuros.

1.5 – Resultados e conclusões

Nos ensaios de termografia observou-se que a TAP em modo reflexão produz imagens mais nítidas e com melhor contraste térmico, e que a imagem com melhor contraste é obtida durante o arrefecimento num instante que varia com a tipologia do defeito. Conclui-se que a TAP em modo reflexão é uma técnica de END viável para materiais compósitos de matriz polimérica, apresentando ainda a vantagem de se poder automatizar a inspeção de componentes com geometrias complexas tendo acesso a apenas um dos lados do componente.

Nos ensaios de ACUS com sondas de 50 e 200 kHz as delaminações foram detetadas e produziram-se C-scans com boa resolução. Não foi possível obter resultados com as sondas de 400 kHz, devido à elevada atenuação da onda sonora no acoplante e nos materiais poliméricos utilizados. Dos ensaios com o provete de PTFE observou-se uma redução da amplitude do sinal com o aumento da espessura, porém a presença de interfaces no interior do provete provoca uma maior redução da amplitude do sinal, ainda que esta redução seja idêntica para uma ou múltiplas descontinuidades. Com este resultado conclui-se que esta técnica pode ser viável na inspeção de compósitos multicamada. Foi também possível detetar furos e delaminações por

difração da onda sonora, o que permite concluir que é possível detetar defeitos com dimensão inferior ao comprimento de onda utilizado.

2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Introdução

A utilização de materiais compósitos em diversos sectores da indústria tornou-se bastante frequente, contudo a fabricação destes materiais pode ser dispendiosa pois não é automatizada, e está limitada a produzir perfis ou placas.

A produção de compósitos com recurso a processos de Manufatura Aditiva permite combinar as melhores propriedades físicas destes materiais com um processo de produção automatizado. Porém com a introdução de novos processos de produção e novos materiais podem surgir defeitos com novas morfologias resultantes desses processos, o que leva à necessidade de adaptar ou desenvolver técnicas de END, quer para controlo de qualidade como para inspeção dos componentes em serviço. Estes materiais começam a ser utilizados em aplicações de responsabilidade na indústria e, como tal não existe uma base de conhecimento consolidada sobre as técnicas de inspeção mais adequadas. Porém muita informação pode ser retirada do estudo de outros materiais compósitos e dos defeitos produzidos pela tecnologia FDM, razão pela qual neste estudo se analisam técnicas END aplicadas a compósitos tradicionais e se referem também os defeitos identificáveis na tecnologia FDM.

2.2 – Produção de Compósitos por *Fused Deposition Modeling*

As técnicas de END estudadas nesta dissertação foram aplicadas em polímeros, e compósitos constituídos por uma matriz polimérica e fibras de reforço contínuas e unidirecionais. A matriz polimérica dá suporte às fibras de reforço, transmite e distribui as tensões no material pelas fibras, e influencia a resistência à compressão longitudinal e transversal do material e a resistência ao corte. As fibras de reforço influenciam a resistência à tração, a tenacidade, o desempenho à fadiga, resposta ao impacto e propriedades eletromagnéticas.

Uma vez que os componentes alvo deste trabalho são produzidos com recurso à tecnologia FDM, optou-se por utilizar as seguintes matrizes poliméricas por se adequarem à tecnologia.

- Nylon (PA6 e PA12)

Estas poliamidas são polímeros termoplásticos semi-cristalinos que apresentam boa resistência à abrasão, mas absorvem água e degradam-se na presença de lubrificantes, pelo que são utilizados em casquilhos para aplicações de funcionamento a seco.

- PLA

O Ácido Poliláctico é um termoplástico bastante comum na impressão 3D por FDM [10] por ter um ponto de fusão (175 °C) inferior a outros termoplásticos. Apresenta, porém, uma temperatura máxima de funcionamento de 52 °C, o que limita bastante a sua utilização em aplicações de engenharia.

- PEEK

Poliéter Éter Cetona é um termoplástico que apresenta boa resistência mecânica, resistência à abrasão, estabilidade química e uma temperatura de funcionamento de 260 °C em contínuo. A facto de ter um ponto de fusão de 343 °C pode ser uma vantagem, mas dificulta o processo de impressão e exige atmosferas com temperatura controlada. Este polímero é sobretudo utilizado em selantes de máquinas [11] e em aplicações biomédicas [12], estando, porém, a ser estudada a sua utilização em componentes estruturais para a indústria aeronáutica.

Fibras/Fios de reforço:

- Fibra de carbono

Material bastante utilizado na indústria aeronáutica e automóvel por apresentar uma elevada resistência mecânica específica. O seu elevado custo condiciona uma utilização mais generalizada. O facto de ser um condutor elétrico com resistividade elevada possibilita a utilização de END por Correntes Induzidas e Termografia com excitação elétrica.

- Fibra de Vidro

Material bastante utilizado nos compósitos convencionais e laminados por apresentar boa adesão a matriz poliméricas, baixo custo, e facilidade de utilização tanto na forma de têxtil como na forma de fibras dispersas.

- Arame de NiTi

Liga de níquel titânio com propriedades como efeito memória de forma (EMF), e superelasticidade (SE), o que desperta interesse na sua utilização como atuador mecânico inserido em materiais compósitos. O facto de ser um condutor elétrico com resistividade elevada possibilita a utilização de END por Correntes Induzidas e Termografia com excitação elétrica.

Os processos de produção denominados de Manufatura Aditiva são já comuns na indústria, sobretudo na produção de séries reduzidas de componentes com geometrias complexas. Apesar de processos como *Selective LASER Melting* (SLM) ou *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) [13] serem já utilizados na produção de componentes de responsabilidade, a tecnologia *Fused Deposition Modeling* é empregue quase exclusivamente como técnica de prototipagem rápida. Porém, a substituição de ligas metálicas por materiais compósitos em certas aplicações de engenharia possibilita uma maior relevância da tecnologia FDM na produção de compósitos de matriz polimérica.

A tecnologia FDM consiste na deposição linear de várias camadas de material fundido numa mesa XYZ através de um bocal cónico aquecido. O material é alimentado na forma de filamento por engrenagens, passando por uma câmara de aquecimento onde atinge o ponto de fusão. A extrusão do material no bocal é realizada pela compressão resultante do avanço do filamento ainda no estado sólido. Este processo é exemplificado na Figura 2.1.

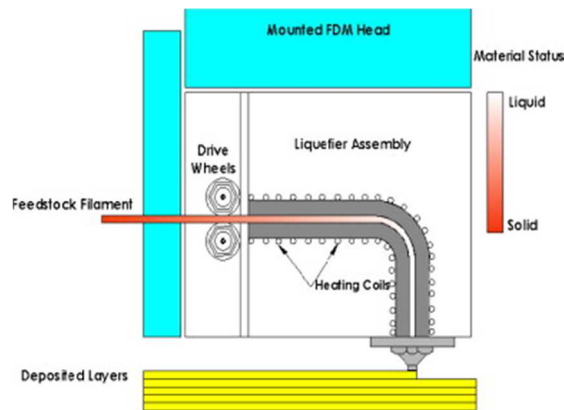


Figura 2.1 Esquema de impressora 3D fabricada pela *Stratasys* (Retirado de [14]).

A estratégia de adaptação da tecnologia FDM para produzir compósitos consiste em duas variantes: produzir filamentos que incorporem fibras de reforço, quer sejam contínuas ou descontínuas; ou desenvolver cabeças de extrusão que permitam a alimentação diferenciada do filamento e das fibras [15]. É de salientar que existem impressoras 3D que permitem a extrusão de vários filamentos de forma diferenciada utilizando apenas uma cabeça de extrusão.

A trajetória de deposição do material e parâmetros como a percentagem de enchimento, velocidade e temperatura de deposição podem originar defeitos que afetam criticamente o componente [16]. A deteção destes defeitos permite não só realizar controlo de qualidade aos componentes produzidos, mas também perceber quais os parâmetros do processo de produção que devem ser ajustados ou se o processo se adequa à produção de um determinado componente, geometria ou material.

2.2.1 Defeitos comuns em materiais compósitos

Alguns tipos de defeitos podem surgir no decorrer da produção de peças de materiais compósitos produzidas por MA, nomeadamente:

- Vazios

Falta de material causada pela dimensão do nozzle e pelas trajetórias de deposição, que ocorre sobretudo nos vértices e interceções de trajetórias na mesma camada ou nos limites dos cordões depositados em camadas contíguas. Na Figura 2.2 evidencia-se a ocorrência destes defeitos.

- Falta de adesão

Defeitos de ligação química entre a matriz e o reforço que diminuem a capacidade de distribuir tensões pelo componente.

- Desalinhamento dos reforços

Produzidos por erros do processo ou mau ajuste de parâmetros, e pode afetar a resistência mecânica, geometria ou originar outros defeitos.

- Delaminações

Defeitos planares, nos limites interlaminares das camadas depositadas, que resultam sobretudo do mau ajuste de parâmetros de impressão, tais como altura de camada e temperatura de extrusão, e durante a maquinação do componente.

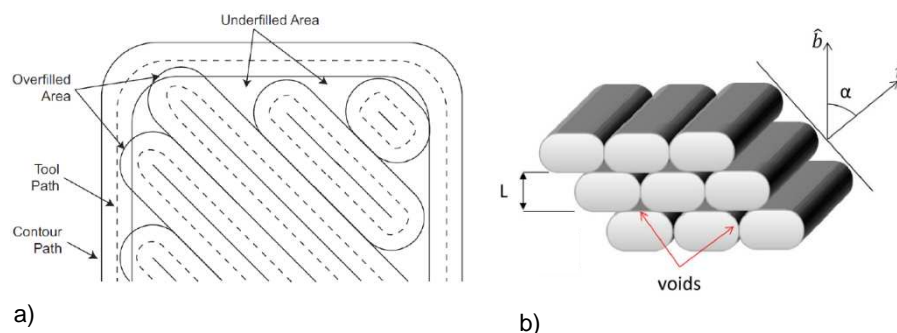


Figura 2.2 Representação de vazios em componentes produzidos por FDM, a) resultantes da trajetória de deposição (adaptado de [17]), b) resultantes da geometria dos cordões.(adaptado de [18]).

2.3 – Técnicas de Ensaios Não Destrutivos

2.3.1 Ultra-sons com acoplamento de ar

Contexto Histórico

Apesar de o efeito piezoelétrico ter sido descoberto pelos irmãos Pierre e Jaques Curie em 1880, só em 1950 [7] foram utilizados pela primeira vez transdutores piezoelétricos com base em cristais como o quartzo para inspeção de componentes, sendo que os derivados de material cerâmico foram introduzidos posteriormente.

S. Y. Sokolov [7] foi o primeiro a sugerir e a realizar o projeto de um transdutor para geração e detecção de ultra-sons em 1935. A tecnologia foi desenvolvida daí em diante em diversas direções e modalidades de aplicação, acoplamento sólido, líquido, sem acoplamento com contacto direto do transdutor com o componente inspecionado.

Mitrajyoti Deka [8] apresentou em 1989 uma alteração dos piezoelétricos convencionais que, em vez das camadas líquidas de compatibilização de impedâncias acústicas já propostas anteriormente, propunha a presença de um disco de silicone de baixa impedância que realizava a transição entre o piezoelétrico e o ar, realizando assim uma transição de impedâncias menos abrupta.

Mais tarde, em 1997, Mahesh C. Bhardwaj [19, 20] testou e apresentou uma alteração às sondas de ensaios não destrutivos por ultra-sons com acoplamento de ar que permitia inspecionar materiais com densidades mais elevadas, como aços e cerâmicos de elevada densidade.

Fundamentos Físicos

A variante de ultra-sons com acoplamento de ar, ou *Air Coupled Ultra Sound (ACUS)*, baseia-se nos mesmos princípios físicos dos ultra-sons convencionais, sendo que nesta variante o som é transmitido através de um acoplante gasoso (o ar) com uma impedância acústica baixa e um coeficiente de atenuação acústica elevado.

O movimento oscilatório de partículas traduz-se em ondas de pressão, que se caracterizam por zonas de compressão e zonas de descompressão, sendo que a velocidade de propagação, $c [m.s^{-1}]$, dessas ondas no material é constante e diretamente proporcional ao comprimento de onda, $\lambda [m]$, e à frequência de oscilação $f [Hz]$, e é calculada através da Equação (2.1).

$$c = \lambda f [m.s^{-1}] \quad (2.1)$$

Existem 7 modos de propagação de ondas com velocidades distintas.

- Ondas Corpóreas
 - Ondas Longitudinais ou de Compressão, paralelas à direção da onda de propagação.
 - Ondas Transversais ou de Cisalhamento, perpendiculares à direção da onda de propagação.
- Ondas de Placa
 - Ondas de Lamb, componente perpendicular à superfície
 - Ondas Love, Paralelas ao plano, perpendiculares à direção de propagação da onda)
- Ondas Superficiais
 - Ondas de Rayleigh, orbita elíptica, convertem-se em ondas Lamb se o comprimento de onda for menor que a espessura.
 - Ondas Stonely, onda existente na interface entre dois meios, Rayleigh de fuga.
 - Ondas Creeping, ondas de compressão paralelas à superfície, que resultam da refração de uma onda Longitudinal numa fronteira com ângulo de incidência próximo do primeiro ângulo crítico

Qualquer modo de propagação que envolva movimentos de cisalhamento não é transmissível nos gases e líquidos devido à inexistência ou muito baixo módulo de cisalhamento. No entanto, na interface fluido-sólido pode ocorrer uma conversão de modo, possibilitando a existência destes modos mesmo nos ultra-sons com acoplamento de ar.

Cada modo tem associado a si uma velocidade de propagação característica. As Equações (2.2) e (2.3) permitem calcular as velocidades de ondas Longitudinais e Transversais, respetivamente.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.2)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

Onde:

V_L [m.s⁻¹] = Velocidade de propagação de ondas longitudinais

V_T [m.s⁻¹] = Velocidade de propagação de ondas transversais

E [Pa]= Módulo de Young

ρ [kg.m⁻³] = Densidade do material

ν = Coeficiente de Poisson

As velocidades dos outros modos implicam equações mais complexas e estão fora do âmbito deste trabalho.

Conhecendo a velocidade de propagação, c [m.s⁻¹], e o tempo t [s] que a onda demora a sair do emissor e atingir o recetor, obtém-se a espessura de material h [m] pela Equação (2.4)

$$h = ct \text{ [m]} \quad (2.4)$$

Com esta relação obtém-se a espessura do componente ou a profundidade da descontinuidade, para uma medição em modo transmissão.

De acordo com a 1ª Lei da termodinâmica a energia num sistema fechado é conservada, portanto a energia incidente no componente é a soma entre a energia refletida, transmitida e absorvida, como exemplifica na Figura 2.3. A Equação (2.6) permite calcular o índice de transmissibilidade, τ , em função do índice de refletividade, ρ , e do índice de atenuação, α .

$$i = \rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.5)$$

$$\tau = 1 - \alpha - \rho \quad (2.6)$$

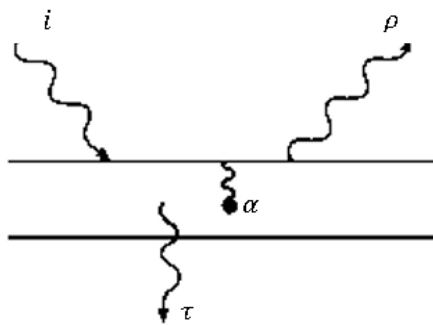


Figura 2.3: Representação física da Equação (2.5)

A parcela de energia acústica refletida depende da diferença de impedâncias acústicas entre meios, como se indica na Equação (2.7)

$$\rho = \frac{E^p}{E^i} = 1 - (\tau + \alpha) = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (2.7)$$

Na Tabela 2.1 apresentam-se coeficientes e energia de transmissão para diferentes materiais, sendo possível constatar que a técnica de ACUS é mais adequada para inspeção de materiais com baixa impedância acústica.

Tabela 2.1: Coeficientes e Energia de Transmissão para diferentes materiais com acoplamento de água e ar (Retirado de [21]).

Material Z_m (Mrayl)	Interface (Fig. 1)	Transmission Coefficient [Eq. (1)]		Energy Transfer [Eq. (4)] (dB)		Total Energy Loss at Interfaces $\alpha + b$ (dB)	
		In Air	In Water	In Air	In Water	In Air	In Water
Steel	Air – steel, a	0.000034	0.11	-89	-19	178	38
51.0	Steel – air, b	0.000034	0.11	-89	-19		
Aluminum	Air – aluminum, a	0.0001	0.3	-79	-10	158	20
17.0	Aluminum – air, b	0.0001	0.3	-79	-10		
Acrylic	Air – acrylic, a	0.0005	0.84	-66	-1.5	132	3
3.5	Acrylic – air, b	0.0005	0.84	-66	-1.5		
Silicone	Air – rubber, a	0.018	0.96	-35	-0.35	70	<1
rubber	Rubber – air, b	0.018	0.96	-35	-0.35		
1.0							

Uma vez que entre a emissão e recepção uma onda tem de transpor pelo menos duas interfaces, sonda/acoplante e acoplante/componente, a diferença de impedâncias acústicas entre a superfície da sonda e o acoplante também deve ser acautelada. No caso dos ultra-sons com acoplamento de ar existe a particularidade de a impedância do acoplamento ser muito inferior à do transdutor, o que provoca elevadas perdas de energia. Estas perdas de energia podem ser mitigadas com a utilização de camadas de emparelhamento de impedância acústica. Na Tabela 2.2 apresentam-se valores de coeficientes e energias de transmissão para camadas de diferentes materiais.

Tabela 2.2. Coeficientes de Transmissão e Energia Transferida para o acoplante em função da camada de emparelhamento de Impedância Acústica no elemento piezoelétrico (Retirado de[21]).

Final Layer on Piezoelectric Element Z (Mrayl)	Transmission Coefficient, T		Energy Transferred, $20 \log T$ (dB)	
	In Air	In Water	In Air	In Water
Bare piezoelectric, PZT, 31.0	0.00006	0.17	-85	-15
Hard epoxy, 4.0	0.0004	0.79	-68	-2
Silicone rubber, 1.0	0.001	0.92	-58	-0.7
Porous rubber, 0.9	0.002	0.94	-54	-0.5
^a Pressed fiber, 0.1	0.018	-	-35	-

^aWorldwide patents pending and in process.

O método de ACUS é ainda dificultado pela forte atenuação da onda no ar, sendo a relação de decaimento da amplitude da onda num qualquer meio dada pela Equação (2.8).

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

Em que a amplitude da onda, $A(x)$, a uma distância $x[m]$ da fonte emissora decai exponencialmente ao longo do meio de transmissão com um coeficiente de atenuação, $\alpha [dB.m^{-1}]$.

Na Figura 2.4 observa-se a relação entre o coeficiente de atenuação e a frequência da onda. Verifica-se que para frequências superiores a 400 kHz o coeficiente de atenuação toma valores significativos, o que restringe a técnica de ACUS a baixas frequências.

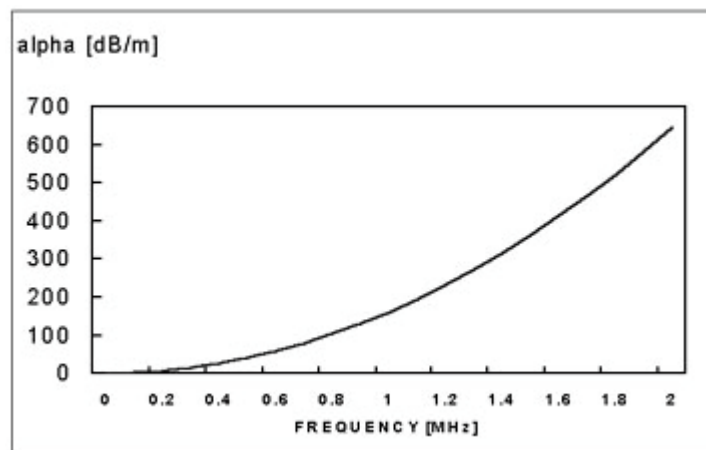


Figura 2.4: Coeficiente de atenuação no ar, em função da frequência da onda (Retirado de [22]).

A aplicação da técnica de ACUS a compósitos de matriz polimérica é bastante recente, como tal, a informação sobre as frequências mais adequadas para a inspeção destes componentes é reduzida.

Post [23] utilizou sondas de 200 kHz para identificação e monitorização de delaminações em compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono sujeitos a processos de cura térmica.

Para avaliar a influência da frequência nos resultados obtidos, e tendo em conta as condicionantes referidas anteriormente, optou-se por utilizar sondas comerciais de 50, 200 e 400 kHz.

2.3.2 Termografia

Contexto Histórico

Em 1829 Niboli inventou o termopar com base no efeito Seebeck descoberto por Sir Thomas Seebeck em 1821. Posteriormente Melloni combinou vários termopares em série numa termopilha sensível a radiação infravermelha, criando assim um dispositivo termosensível sem contacto [2].

Em 1878 o astrónomo americano Samuel Pierpont Langley inventou o bolómetro, que perante uma diferença de temperatura produzia variação de resistência elétrica. A tecnologia foi continuamente desenvolvida durante a 1ª e 2ª Guerra Mundial, tendo as primeiras aplicações comerciais surgido após a Guerra do Vietname.

As câmaras termográficas atuais utilizam matrizes de microbolómetros e semicondutores sensíveis a fotões na gama dos infravermelhos, para captar uma imagem termográfica.

Fundamentos Físicos

As técnicas de termografia recorrem ao fenómeno de emissão de radiação infravermelha de um corpo cuja temperatura é superior ao zero absoluto (-273.15°C). Sabendo a emissividade do corpo e a banda de comprimento de onda da radiação emitida podemos obter a temperatura superficial desse mesmo corpo.

Para que se possam detetar defeitos ou diferentes estruturas internas num componente através de uma imagem termográfica, é necessário que existam variações na condutividade térmica de modo a criar contrastes na resposta térmica em diferentes zonas da superfície do componente.

Nas técnicas de termografia identificam-se dois grupos de variantes, no que diz respeito à fonte de energia térmica, termografia passiva (i) e ativa (ii). As variantes passivas aproveitam o calor resultante do processo de produção ou das condições de funcionamento do componente em serviço, e por isso são utilizadas sobretudo na

monitorização de componentes como motores, placas de circuitos, tubagens. Nas variantes ativas existe uma fonte de energia externa, sendo que essa energia pode ser fornecida na forma de radiação (lâmpadas, LASER), corrente elétrica (Correntes Induzidas) ou vibração mecânica (Vibrotermografia).

Os defeitos identificados em 2.2.1 são detetados pelo contraste da resposta térmica em regime transiente ou estacionário periódico, o que requer controlo activo da fonte de calor. Como tal, neste subcapítulo apenas são analisadas variantes activas.

Todas as fontes de energia referidas para as variantes ativas são passíveis de serem utilizadas em técnicas de inspeção, contudo cada uma apresenta limitações. Na maioria das aplicações são utilizadas lâmpadas por permitirem a excitação de uma maior área superficial, por ser mais fácil alterar a potência, e a sua posição em relação ao componente, e por permitirem modular a energia entregue.

Os LASER têm a desvantagem de terem uma área de incidência muito reduzida e custos de aquisição mais elevados. Porém a sua utilização pode ser vantajosa em inspeções automatizadas, pois a elevada entrega térmica permite velocidades de inspeção mais elevadas. As correntes induzidas estão restringidas a compósitos com materiais de reforço condutores.

Os Ultra-sons produzem bons resultados na conversão de energia mecânica em energia térmica. Porém a intensidade da onda sonora diminui quando nos afastamos do centro do feixe sonoro, que dificulta a excitação uniforme de uma grande área do componente e produz resultados pouco nítidos, como se apresenta na Figura 2.5.

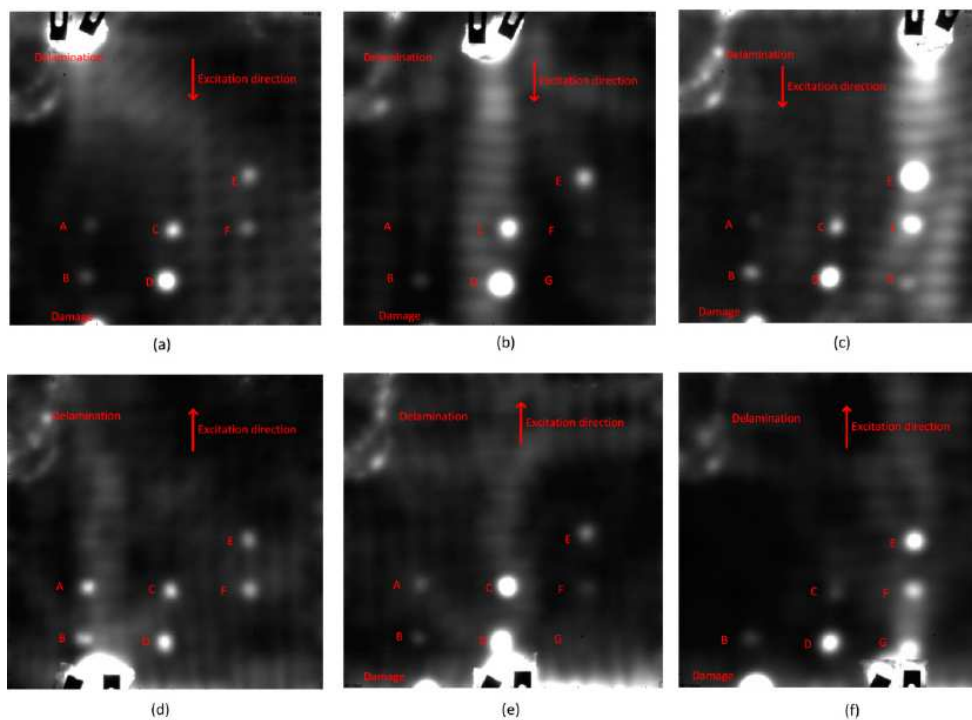


Figura 2.5 – Resultados de vibrotermografia para diferentes posições do transdutor de ultra-sons. Retirado de [6]

Termografia Ativa Pulsada (TAP)

Esta variante de Termografia Ativa tira partido dos gradientes de condutividade térmica resultantes de delaminações, vazios, descolagens, e ausência de fibra. A presença destes defeitos altera condução do calor na direção da espessura do componente, originando gradientes de temperatura na superfície. Contudo estes gradientes podem resultar também de variações de emissividade na superfície ou de aquecimento não uniforme.

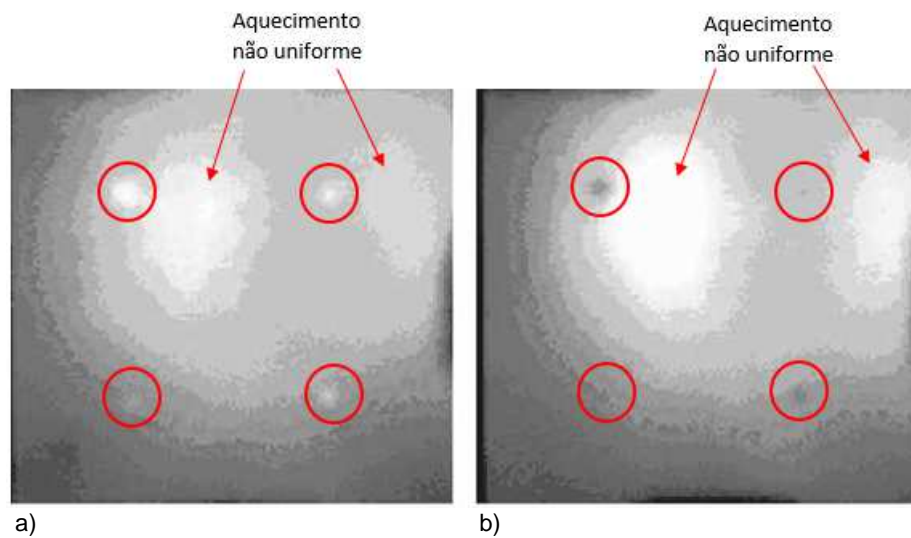


Figura 2.6 – Imagens de TAP de placas de compósito de fibra de vidro com inserções de a) alumínio, e b) cortiça. (Adaptado de [5])

A qualidade dos resultados produzidos por esta técnica depende de fatores como o modo de aquisição, tempo de excitação e potência da fonte de energia, intervalo de tempo entre o fim da excitação e início da aquisição.

O modo como é realizada a aquisição não só determina a interpretação que se faz dos resultados, como também pode afetar a sua qualidade. A Figura 2.7 ilustra uma montagem em modo reflexão e outra em modo transmissão, e as respetivas implicações no sinal obtido.

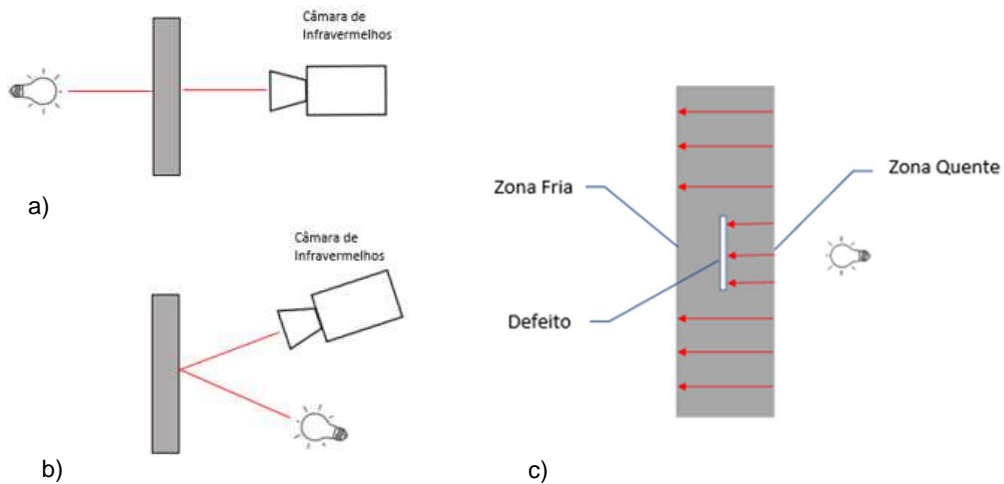


Figura 2.7 – Representação de ensaio de Termografia Ativa.
a) Termografia por transmissão, b) Termografia por reflexão,
c) Propagação da onda térmica num componente com defeito

Em modo reflexão a imagem obtida irá apresentar uma zona com maior temperatura superficial pois o defeito dificulta o escoamento do calor na direção da espessura. No modo transmissão os defeitos podem ser identificados pela presença de zonas com menor temperatura superficial, sendo que neste modo as imagens obtidas apresentam maior nitidez, pois a não uniformidade do aquecimento é dissipada longitudinalmente à medida que a frente térmica se propaga pela espessura do componente. Porém a dissipação do calor na direção longitudinal leva a que o intervalo de tempo entre a excitação e a aquisição seja um parâmetro fulcral, visto que o calor se propaga na direção do gradiente de temperatura, que inicialmente é na direção da espessura, mas após algum tempo os gradientes de temperatura induzidos pelos defeitos provocam a dissipação do calor na direção longitudinal e a consequente diminuição do contraste da temperatura superficial.

A escolha da potência e tempo de excitação do compromisso entre a temperatura máxima admissível para o componente e a qualidade dos resultados. Ainda que teoricamente uma maior entrega térmica durante um período mais reduzido produza maiores contrastes, o seu efeito nos resultados deve ser avaliado através de simulações em programas de elementos finitos, pois os mecanismos de transmissão de calor e as geometrias dos defeitos tornam o problema difícil de analisar com base em simplificações do fenómeno.

Tanto em aparelhos comerciais como em montagens experimentais, é comum utilizar-se lâmpadas de potência entre os 1000 W e os 2000 W. Existe, porém, uma subvariante da TAP, chamada Termografia de Flash, que utiliza lâmpadas com potências entre 15 e os 20 kW e tempos de excitação da ordem dos milissegundos. Esta subvariante exige a utilização de câmaras termográficas mais sensíveis que permitam detetar variações de temperatura mais reduzidas, pois apesar da elevada potência utilizada o aumento de temperatura é reduzido.

Termografia Modulada (Lock-in)

Proposta por Busse [24], a técnica de Termografia Modulada (TM), mais conhecida por Termografia *Lock-in*, permite medir diferenças de fase nas respostas térmicas de diferentes zonas da superfície do componente a ser inspecionado. Esta técnica pretende resolver sobretudo o aquecimento não uniforme e variações de emissividade identificados na TAP, uma vez que não é relevante a amplitude do sinal medido, mas sim a sua evolução temporal, e o desfasamento da onda térmica é causado por diferenças de condutibilidade e não de emissividade.

A excitação, por norma feita através de lâmpadas usando um sinal sinusoidal com frequências muito reduzidas (tipicamente inferiores 1 Hz), ocorre simultaneamente com a aquisição através de uma câmara termográfica. Para medir as diferenças de fase utiliza-se um amplificador *lock-in*, que depois de aplicada uma transformada de Fourier às séries de sinais de cada pixel das imagens obtidas, sincroniza os sinais de excitação e de aquisição. O resultado desta técnica é uma série de imagens, cujo número depende da duração do ensaio e da frequência de captura da câmara termográfica.

Esta técnica permite quantificar a profundidade a que se encontram os defeitos, visto que a penetração da onda térmica está relacionada com a frequência de modulação da onda, f [Hz]. Liu [6] calculou a profundidade máxima de deteção de defeitos, z [m], através da Equação 2.9:

$$z = C_1 \mu \quad (2.9)$$

Sendo que o comprimento de difusão térmica, μ [m], se relaciona com difusividade térmica α , e com a frequência de modulação, f [Hz], através da Equação 2.10.

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (2.10)$$

Na Equação (2.9), a constante empírica C_1 é um factor de correlação de sensibilidade, que depende do material a ser inspecionado, e toma valores diferentes para medições de fase ou de amplitude da resposta térmica. Vários autores [6, 25, 26] indicam para compósitos de fibra de vidro $C_1 = 1$ em medições de amplitude, e $C_1 = 1,8$ em medições de fase. Razão pela qual esta técnica é tida como preferível para detetar defeitos profundos sem ter de se aumentar a potência da excitação.

Na Tabela 2.3 evidencia-se o aumento profundidade de deteção, z , com a diminuição da frequência de modulação, f

Tabela 2.3 – Profundidade de deteção em função da frequência de modulação.
(Adaptado de [6])

Lock-in Frequency (Hz)	Theoretical Detective Depth (mm)
3	0.38
1	0.66
0.6	0.86
0.2	1.48
0.1	2.1
0.05	2.96
0.04	3.31
0.03	3.83
0.02	4.69

. Este efeito é visível na Figura 2.8, onde se observa que com a diminuição da frequência os defeitos mais profundos tornam-se visíveis e os mais superficiais tornam-se menos visíveis, o que permite estimar a localização do defeito.

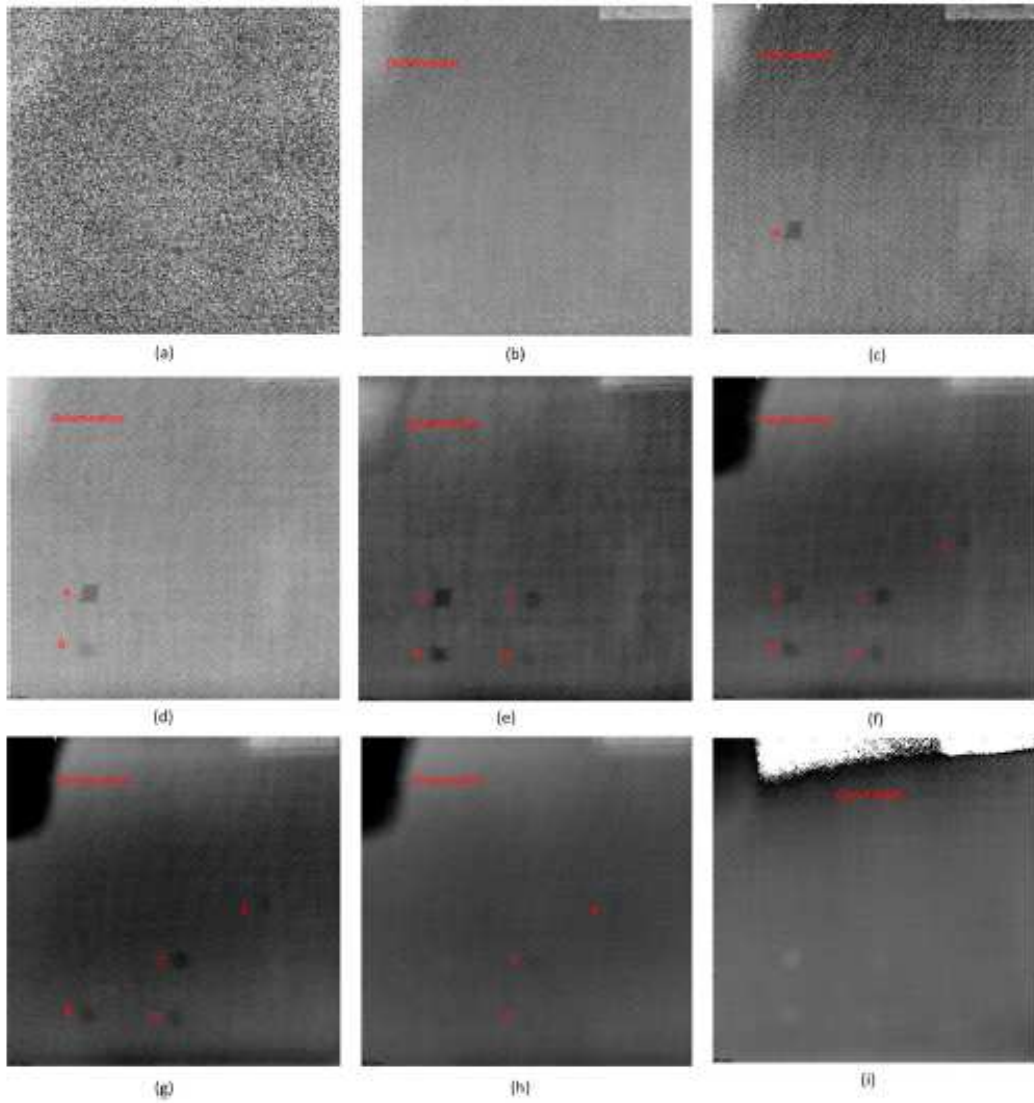


Figura 2.8 – Imagens de contraste de fase para frequências de: 3 Hz (a), 1 Hz (b), 0.6 Hz (c), 0.2 Hz (d), 0.1 Hz (e), 0.05 Hz (f), 0.04 Hz (g), 0.03 Hz (h), 0.02 Hz (i). (Adaptado de [6])

Verifica-se que para se detetarem defeitos mais profundos são necessárias frequências de modulação muito baixas, tornando o processo moroso.

Termografia Pulsada de Fase (TPF)

Proposta por Maldague e Marinetti [27], esta técnica permite obter imagens de contraste de fase, tal como na Termografia Lock-in, mas com a montagem experimental da TAP, ou seja, o sinal de excitação é um único pulso. Esta abordagem torna a técnica mais complexa porque é necessário aplicar uma transformada de Fourier aos valores de temperatura para cada pixel da sequência de imagens obtidas.

Maldague [27] destaca o facto desta técnica permitir utilizar várias frequências de excitação, uma vez que um pulso pode ser decomposto numa soma de harmónicas com frequências diferentes. Este aspeto pode ser relevante porque a frequência de excitação influencia a profundidade a que se conseguem detetar defeitos, o que possibilita que com um só pulso se detetem defeitos a diferentes profundidades sem ter de se conhecer à priori um valor ótimo de frequência ou de repetir a inspeção para várias frequências. Maldague [27] utilizou apenas o maior valor de fase de cada pixel para construir uma única imagem de fase, ou seja, na mesma imagem final a informação de cada pixel pode resultar de frequências diferentes. É também possível obter uma imagem para cada valor de frequência definido.

Outra vantagem desta técnica é o facto de dispensar necessidade do amplificador lock-in pois os sinais de excitação e de aquisição não têm de ser sincronizados e a transformada de Fourier pode ser realizada num computador.

Comparação entre técnicas de termografia

Apesar de cada uma das técnicas analisadas neste trabalho terem vantagens ou características que as podem tornar relevantes para desenvolvimentos futuros, é de ressaltar que para terem relevância como END devem produzir melhorias da eficácia dos ensaios, e também tornar os processos de inspeção mais eficientes. Para se poder comparar as várias técnicas apresentadas definem-se os seguintes critérios, eficácia na deteção de defeitos, fácil interpretação dos resultados e rapidez da inspeção.

Chatterjee [4] realizou um estudo comparativo para a TAP, TM e TPF, também referida como *Frequency Modulated Thermal Wave Imaging* (FMTWI), do qual se retiraram as Figura 2.9 e Figura 2.10.

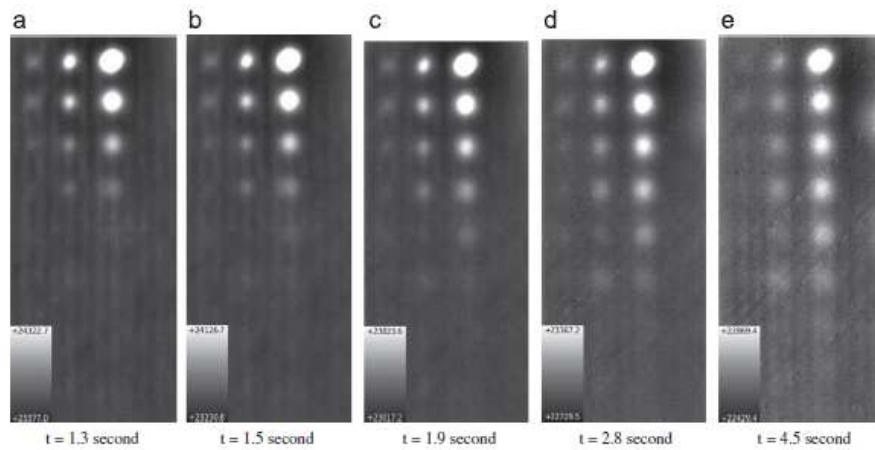


Figura 2.9 Sequência de imagens de TAP adquiridas nos instantes: (a) $t=1.3$ s, (b) $t=1.5$ s, (c) $t=1.9$ s, (d) $t=2.8$ s, (e) $t=4.5$ s. (Adaptado de [4])

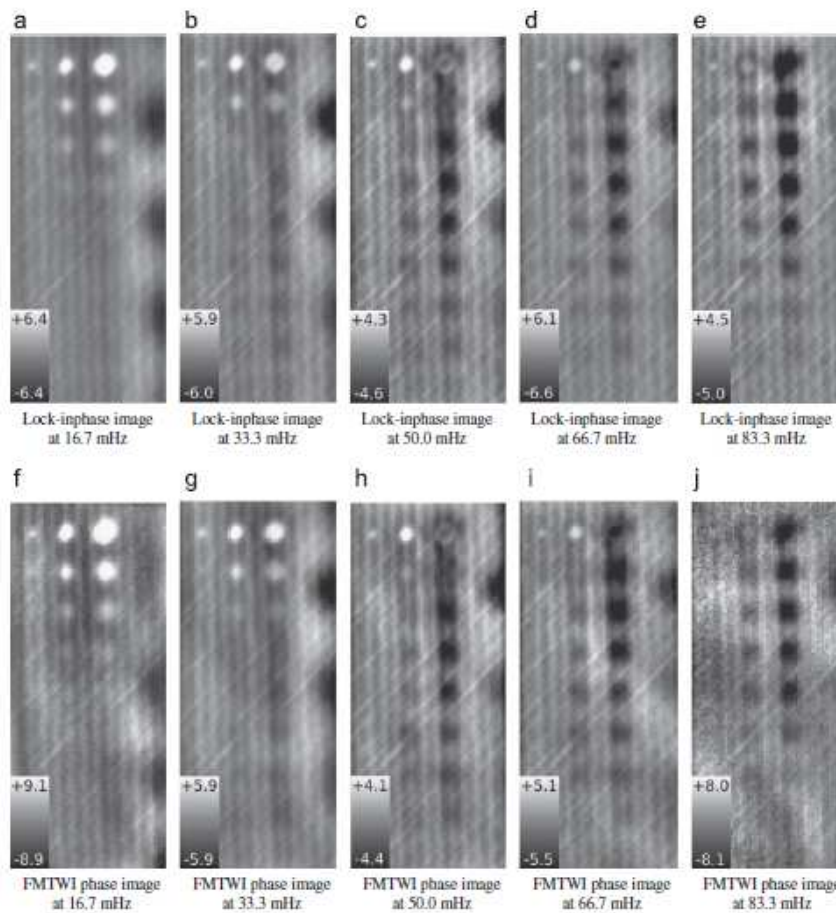


Figura 2.10 Imagens de fase de TM a), b), c), d), e); e de TPF f), g), h), i), j) para 16,7 mHz, 33,3 mHz, 50,0 mHz, 66,7 mHz e 83,3 mHz, respetivamente (Adaptado de [4]).

Na Figura 2.9 e na Figura 2.10 constata-se que a TM e TPF não permitem detetar nenhum defeito que não fosse detetado pela TAP, havendo no entanto uma melhor definição das fibras de reforço. Constata-se também que a TM e a TPF produzem imagens bastante semelhantes. Conforme foi referido anteriormente a TM implica inspeções mais demoradas. Conclui-se, portanto, que o investimento associado à implementação de uma técnica de TM pode não ser justificado, e que pode ser interessante aprofundar estudos sobre a TPF, visto que é tão eficaz na deteção de defeitos como a TAP, com a vantagem de possibilitar melhor definição na visualização de estruturas internas do componente e não implica acréscimo de custos nem aumento dos tempos de inspeção. A Termografia Ativa Pulsada é, portanto, a técnica mais expedita, uma vez que não é necessário proceder a processamento do sinal obtido, razão pela qual se decidiu aplicar esta técnica.

Apesar de a TAP produzir resultados satisfatórios o aquecimento não uniforme e a impossibilidade de estimar a profundidade ou dimensão dos defeitos são desvantagens significantes de técnica. Porém, existem métodos estatísticos de tratamento e processamento do sinal termográfico que permitem melhorar os resultados e estimar profundidade e dimensão dos defeitos., tais como *Principal Component Analysis* (PCA) [28] ou *Principal Component Thermography* (PCT) [29] e *Partial Least Squares Regression* (PLSR) [30].

A aplicação da PLSR a dados termográficos é bastante útil na eliminação dos efeitos de aquecimento não uniforme, uma vez que permite eliminar os componentes da regressão que apresentam maior variância, sendo que é causada sobretudo pelo aquecimento não uniforme e características superficiais. Esta característica é evidenciada na Figura 2.11, onde se observa que o aquecimento não uniforme se manifesta principalmente na imagem do primeiro componente da regressão.

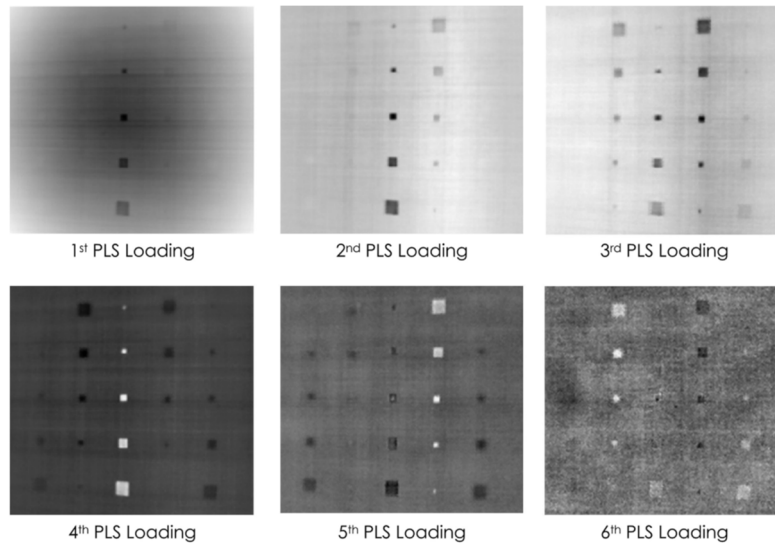


Figura 2.11 Imagens dos componentes da regressão aplicada a dados termográficos de um ensaio de TAP. (Retirado de [30]).

A subtração do primeiro componente na imagem reconstruída pelo método de PLSR melhora substancialmente os resultados obtidos, como se evidencia nas Figura 2.12 e Figura 2.13.

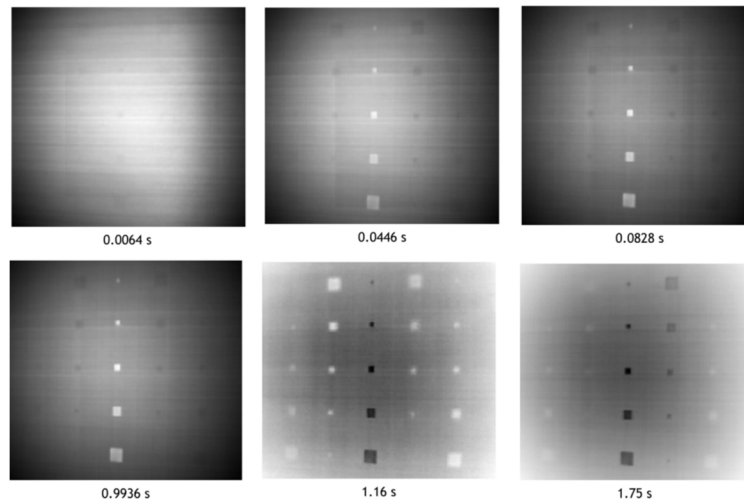


Figura 2.12 Imagens termográficas reconstruídas pelo método de PLSR. (Retirado de [30]).

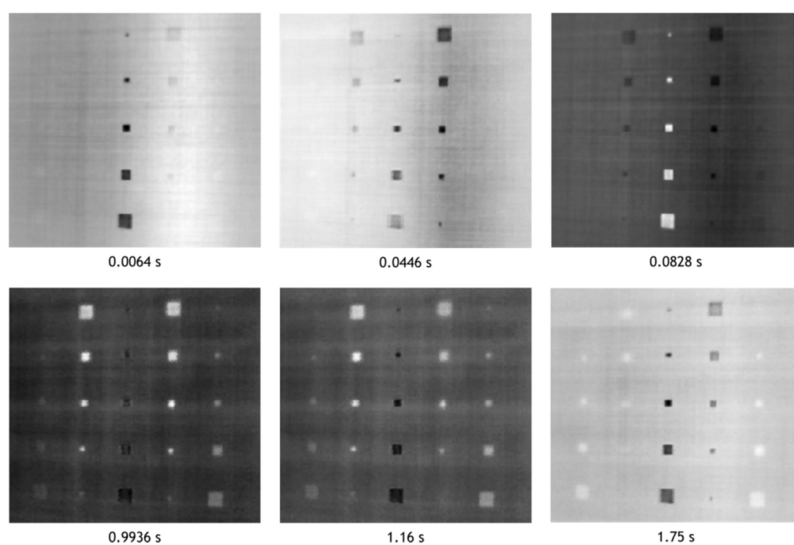


Figura 2.13 Imagens termográficas reconstruídas pelo método de PLSR com a subtração do primeiro componente da regressão. (Retirado de [30]).

3 - DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E PRODUÇÃO DE PROVETES

3.1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de equipamentos incidiu sobre duas vertentes, equipamento para ensaios experimentais e sistemas de inspeção automática. Os resultados e conclusões retiradas dos ensaios experimentais permitiram aferir a viabilidade dos sistemas de inspeção automática.

Para os ensaios de termografia desenvolveu-se uma bancada de ensaios experimentais e um módulo de inspeção automatizada para componentes de grandes dimensões e geometria complexa.

Para os ensaios de ultra-sons desenvolveram-se dois sistemas de inspeção automatizada, nomeadamente, um pórtico com sondas fixas para realizar ensaios experimentais em componentes de geometria plana, e um módulo de inspeção automatizada com sondas móveis para inspecionar componentes com geometria curva.

O pórtico de sondas fixas encontra-se acoplado à base do Scanner 3D indicado na Figura 3.1, enquanto que os módulos de inspeção automatizada de ultra-sons e termografia consistem em módulos adaptáveis a um cabeçote móvel do scanner 3D mantendo assim os componentes inspecionados fixos à base do scanner.

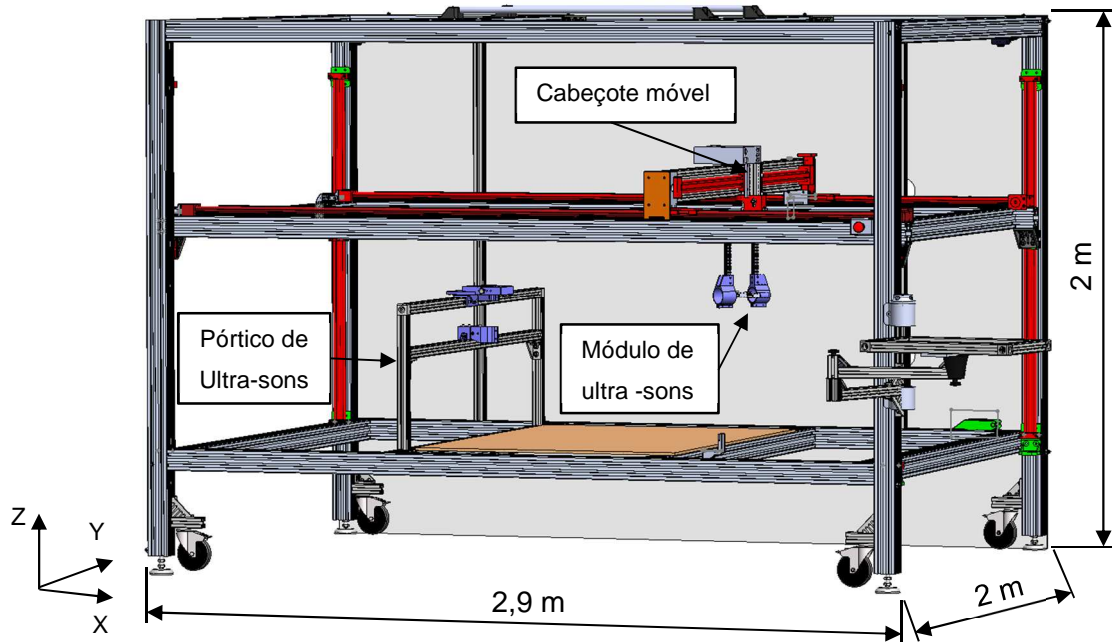


Figura 3.1 – Scanner 3D para END

3.2 – EQUIPAMENTO DE TERMOGRAFIA

3.2.1 – Requisitos Funcionais

- Bancada de Ensaios

A bancada de ensaios foi desenvolvida com o propósito de realizar ensaios de termografia por transmissão e por reflexão, permitindo variar o ângulo e distância entre as lâmpadas e o provete.

- Módulo de Inspeção Automatizada de Termografia

O módulo de inspeção automatizada tem como principais requisitos suportar uma câmara termográfica e uma lâmpada de infravermelhos, e permitir controlar a sua posição em dois eixos de rotação de modo a garantir a perpendicularidade entre o componente a ser inspecionado e a lente da câmara termográfica. A combinação dos três graus de liberdade (X, Y e Z) do scanner 3D com os dois graus de liberdade do módulo de termografia deverá permitir inspecionar componentes com geometrias complexas.

Os ensaios de termografia foram realizados com recurso a uma câmara termográfica TI 400 [31] comercializada pela empresa *Fluke*.

3.2.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento

- Bancada de Ensaios

Foi construída uma estrutura em perfil de alumínio que permite deslocar o provete no eixo X da Figura 3.2. O suporte das lâmpadas gira em torno de um pivot fixo a um suporte, que se desloca ao longo de um barra de perfil de alumínio no eixo Y. Para ajustar a altura das lâmpadas utilizou-se um fuso operado manualmente através de uma manivela.

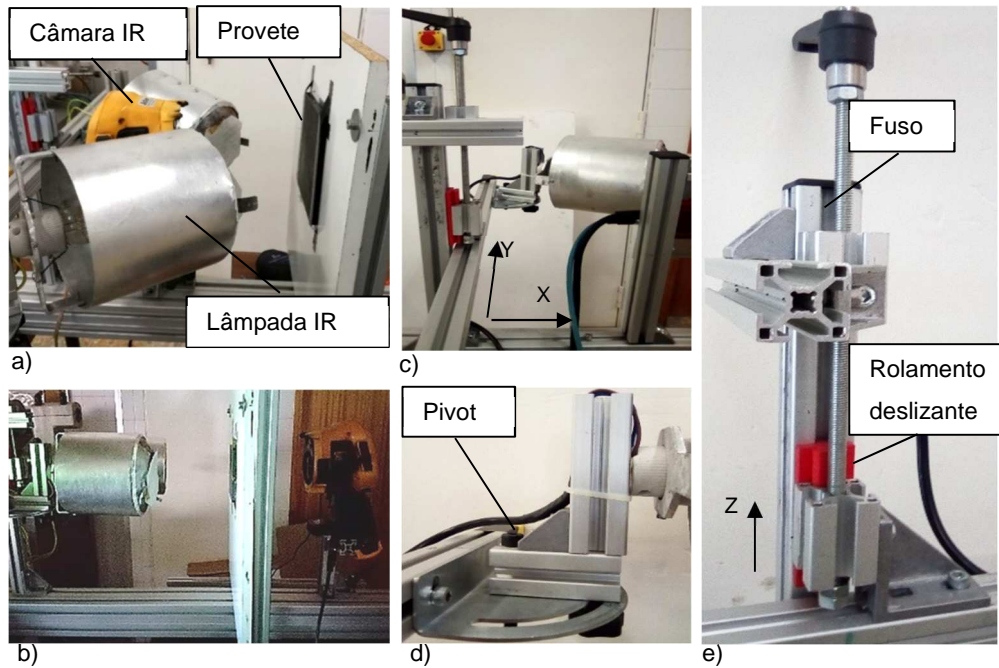


Figura 3.2 – Bancada de ensaios de termografia.

- a) Montagem em modo reflexão, b) Montagem em modo transmissão, c) Sistema de posicionamento das lâmpadas, d) Sistema Pivot, e) Sistema de fuso

- Módulo de Inspeção Automatizada de Termografia

A solução concebida para o módulo de inspeção automatizada consistiu na construção de uma estrutura em perfil de alumínio que suporta a lâmpada IV e a câmara termográfica. Esta estrutura encontra-se por sua vez acoplada a um mecanismo com dois motores passo-a-passo para controlar a rotação do módulo. Considerou-se importante que os dois eixos de rotação se intercetassem no centro da lente da câmara, de modo a simplificar os cálculos necessários para simular e gerar o processo de inspeção automatizada. Caso os eixos não se intercetassem no centro da lente não haveria total independência dos 5 graus de liberdade do sistema, uma vez que um deslocamento angular implicaria sempre um deslocamento da lente em dois outros eixos.

A inspeção automatizada é realizada pelo scanner 3D controlado pelo *software open source*, Repetier Host, a que são dadas instruções em código G. Este código é gerado por um outro *software* partindo da geometria do componente que se queira inspecionar e das variáveis do processo.

Nas Figura 3.3 e Figura 3.4 representam-se a cabeça de inspeção equipada com o módulo de termografia e os dois eixos de rotação referidos anteriormente.

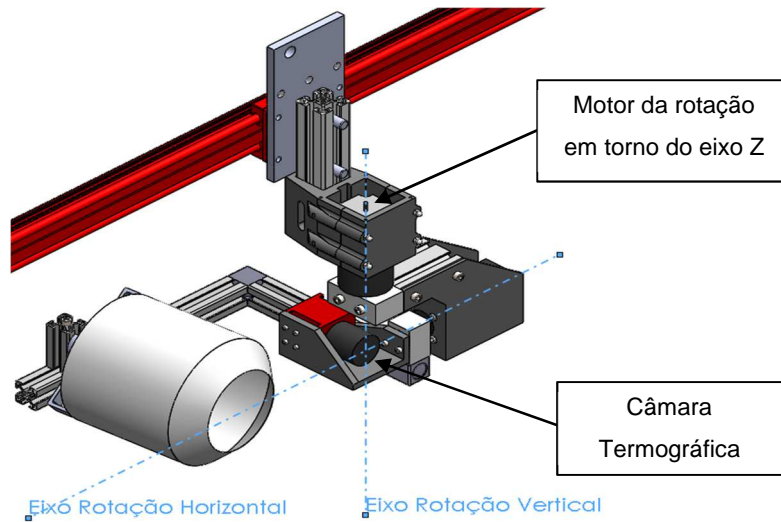


Figura 3.3 – Vista isométrica frontal do módulo de termografia

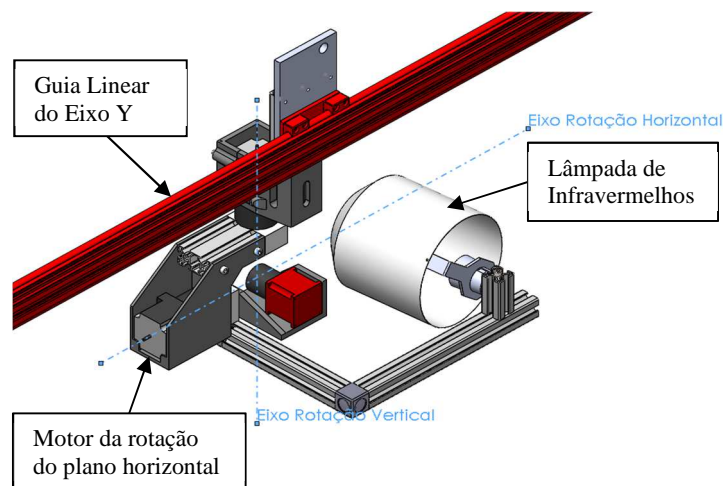


Figura 3.4 – Vista isométrica traseira do módulo de termografia

Na Figura 3.5 representa-se o funcionamento do sistema de inspeção, onde se destaca o facto de as trajetórias de inspeção inverterem o sentido de rotação indicado pelas setas vermelhas. A inversão do sentido de rotação tem como objetivo evitar que as ligações elétricas do motor de rotação do plano horizontal se enrolem em torno do módulo de inspeção.

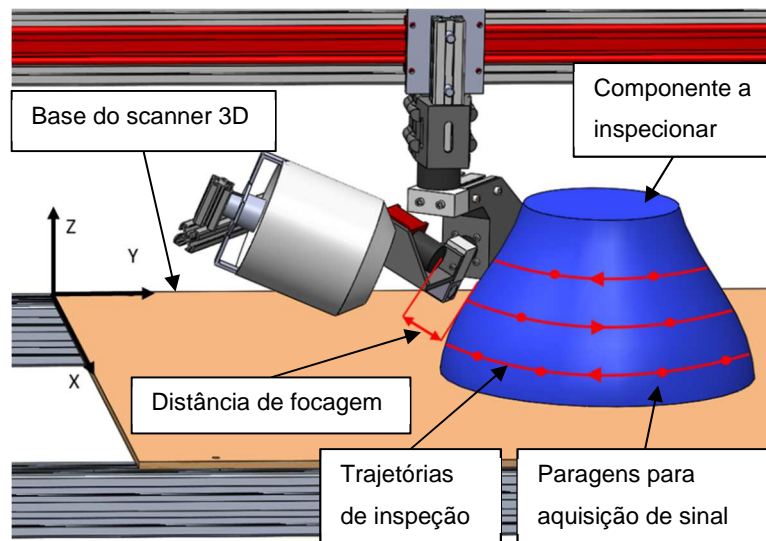


Figura 3.5 – Esquema do funcionamento do sistema de inspeção automatizada de termografia

Um dos parâmetros da inspeção é a distância de focagem, isto é, a distância do dispositivo de inspeção à superfície do componente. Este parâmetro determina a área inspecionada, estando, porém, limitado pela distância mínima de focagem da câmara e também por uma distância mínima de segurança de forma a evitar a colisão do módulo de inspeção com o componente.

As paragens para aquisição de sinal implicam que no código G das trajetórias seja dada uma instrução para acionar o programa de controlo do dispositivo de inspeção e uma outra que retome o andamento após o programa de controlo do dispositivo de inspeção ter terminado.

Na produção dos componentes do modulo de termografia foram utilizados sobretudo processos fresagem e impressão 3D por FDM. Componentes estruturais e de transmissão de potência, tais como os blocos de engate do motor foram produzidos por fresagem enquanto que por impressão 3D se produziu sobretudo peças de encaixe, caixas de proteção com geometrias mais complexas ou componentes em que pretendia reduzir a massa.

A luminária (2) identificada na Figura 3.6 foi desenvolvida com o propósito de restringir a emissão de radiação infravermelha, e permitir fixar um filtro de papel vegetal (3), que se verificou dispersar a radiação emitida, uniformizando assim o aquecimento dos componentes durante os ensaios.

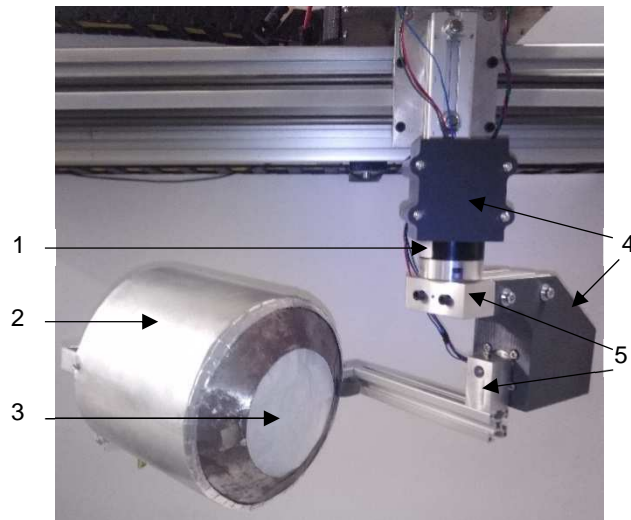


Figura 3.6 –Montagem de módulo de termografia sem a câmara termográfica.
Nomenclatura: Caixa redutora 4:1 (1), Luminária (2), filtro (3), blocos de engate do motor (4), caixas dos motores (5).

3.3 – Equipamento de Ultra-sons

3.3.1 – Requisitos Funcionais

- Módulo de Inspeção Automatizada de Ultra-sons

O módulo de ultra-sons foi desenvolvido com o objetivo de se inspecionar componentes com espessura e perfil constantes e geometria plana ou curva, mantendo a perpendicularidade das sondas de ACUS com a superfície do componente. A distância entre as sondas e a superfície teria de ser ajustável para permitir avaliar a influência deste parâmetro nos resultados obtidos nos ensaios experimentais.

- Pórtico de Ultra-sons

Foi desenvolvido um segundo equipamento de ultra-sons, por se ter verificado que o deslocamento das sondas causava vibração excessiva que poderia comprometer os resultados obtidos. Este segundo equipamento deveria manter as sondas fixas, ainda que permitindo o ajuste da distância e alinhamento entre as mesmas. Uma vez que todos os provetes produzidos apresentam geometria plana, decidiu-se desenvolver este equipamento apenas para inspeção de provetes de geometria plana.

Após avaliação das características técnicas foi adquirido um aparelho de ultra-sons *DIO 1000 LF Flaw Detector* [32] comercializado pela empresa *Starmans*. Este aparelho é específico para ultra-sons de baixas frequências, entre 50 kHz e 1 MHz, e permite extrair dados de amplitude e tempo do sinal obtido em tempo real, o que permite realizar C-scans. É também possível extrair imagens e dados do sinal obtido, funcionalidade útil para comparar A-scans.

3.3.2 – Conceção, Projeto e Produção do Equipamento

- Módulo de Inspeção Automatizada de Ultra-sons

Por forma a evitar a utilização de motores concebeu-se um sistema de pivot com dois rolamentos que em contacto com o componente garantiriam a perpendicularidade das sondas de ACUS com a superfície do componente. Para garantir a perpendicularidade o módulo teria ainda de permitir a rotação em torno do eixo Z enquanto o eixo central do módulo alinhado com a meia espessura do componente,

acompanhava a sua geometria. Esta rotação é garantida pelos rolamentos radiais indicados na Figura 3.7 b). Dado que funcionamento deste módulo é puramente mecânico, o processo de inspeção é simplificado uma vez que as trajetórias de inspeção correspondem ao perfil da linha de meia espessura do componente.

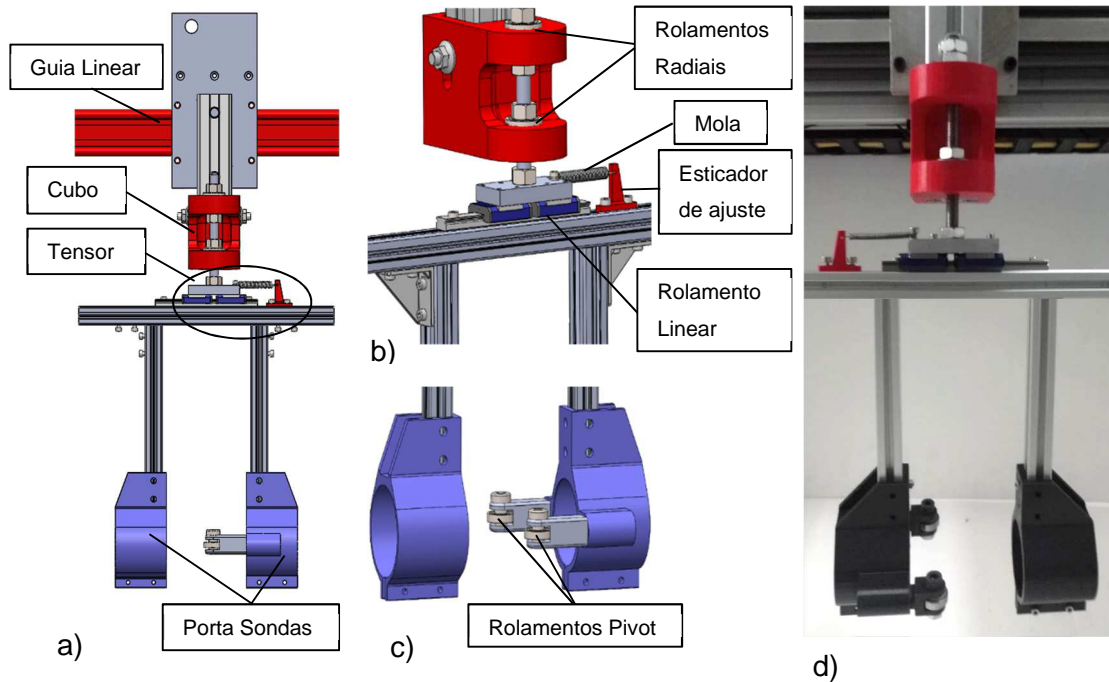


Figura 3.7 Módulo de inspeção automatizada de ultra-sons.
 a) Alçado principal, b) Vista tridimensional do Cubo e Tensor,
 c) Vista tridimensional dos Porta sondas, d) Montagem do módulo

O tensor garante o contacto dos rolamentos pivot com a superfície do componente com recurso a dois rolamentos lineares, uma mola de tração e um esticador de ajuste da força exercida pela mola.

- Pórtico de Ultra-sons

O pórtico de ultra-sons representado na Figura 3.8 consiste numa estrutura de perfil de alumínio onde se fixou o porta-sondas (1), e um suporte deslizante (4) que se pode deslocar ao longo do perfil de alumínio. O balancé (2) é acoplado ao suporte deslizante e permite o alinhamento das sondas através de dois eixos de rotação.

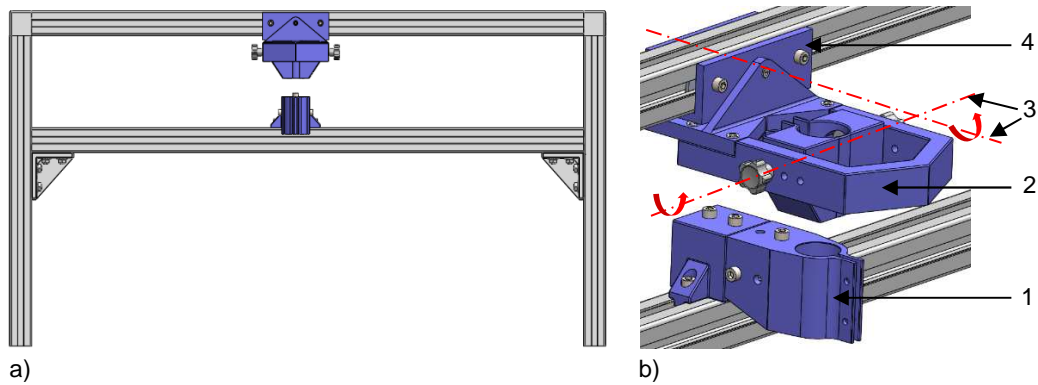


Figura 3.8 Modelação do pórtico de ultra-sons.

a) Vista de conjunto, b) Vista de pormenor do balancé e porta sondas

Nomenclatura: Porta sondas (1), Balancé porta sondas (2), Eixos de rotação do balancé (3), suporte deslizante (4).

Neste equipamento as sondas encontram-se imóveis, sendo o provete fixo a um perfil de alumínio visível na Figura 3.9 b). Este perfil encontra-se acoplado ao cabeçote móvel do Scanner 3D que o permite deslocar em três eixos.

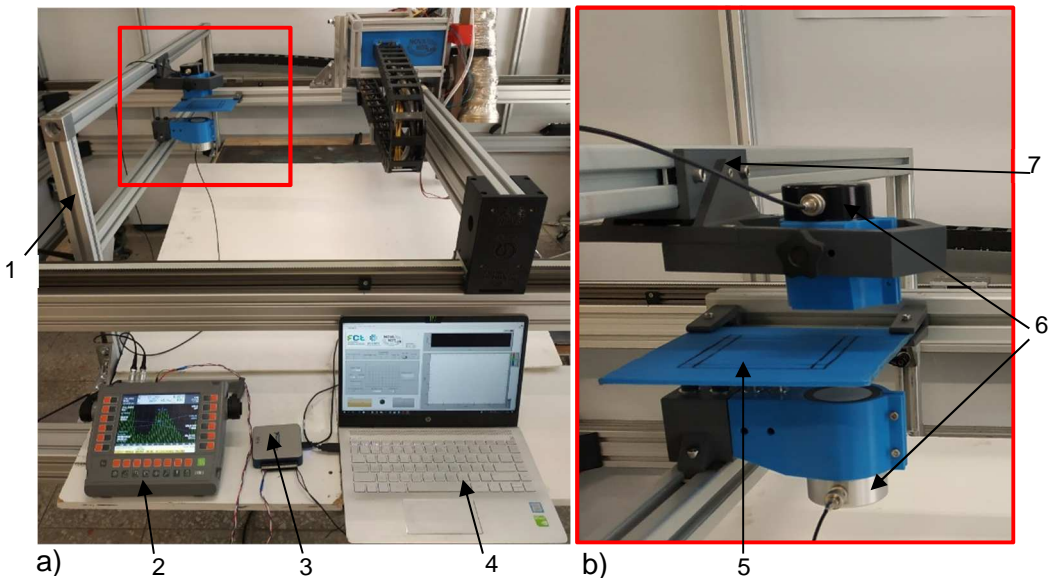


Figura 3.9 Montagem de C-scan no pórtico de ultra-sons.

a) Vista de conjunto, b) Vista de pormenor do balancé.

Nomenclatura: Pórtico de ultra-sons (1), Equipamento de US sem contacto (2), Placa de aquisição de sinal (3), Computador de controlo do scanner (4), Provete (5), Sondas de ACUS (6), Balancé porta sondas (7).

3.4 – Projeto e produção de provetes

Para avaliar as técnicas de TAP e ACUS foram projetados e produzidos seis provetes de PLA e PA6 com defeitos de delaminações, vazios e desalinhamento de fibras de reforço. Foram também utilizadas placas de PTFE com diferentes espessuras para avaliar o fenómeno de atenuação acústica em componentes compostos por várias camadas.

3.4.1 – Provete 1

O provete 1 foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a capacidade de deteção de vazios em peças produzidas por impressão 3D com enchimento de 100 %. Este provete consiste numa placa de poliamida (PA6) produzida por *FDM* com um *nozzle* de 0,4 mm de diâmetro e com enchimento de 100 %. Na Figura 3.10 representa-se o vazio retangular, de dimensões 10 x 10 x 0,5 mm centrado a meia espessura, produzido no provete.

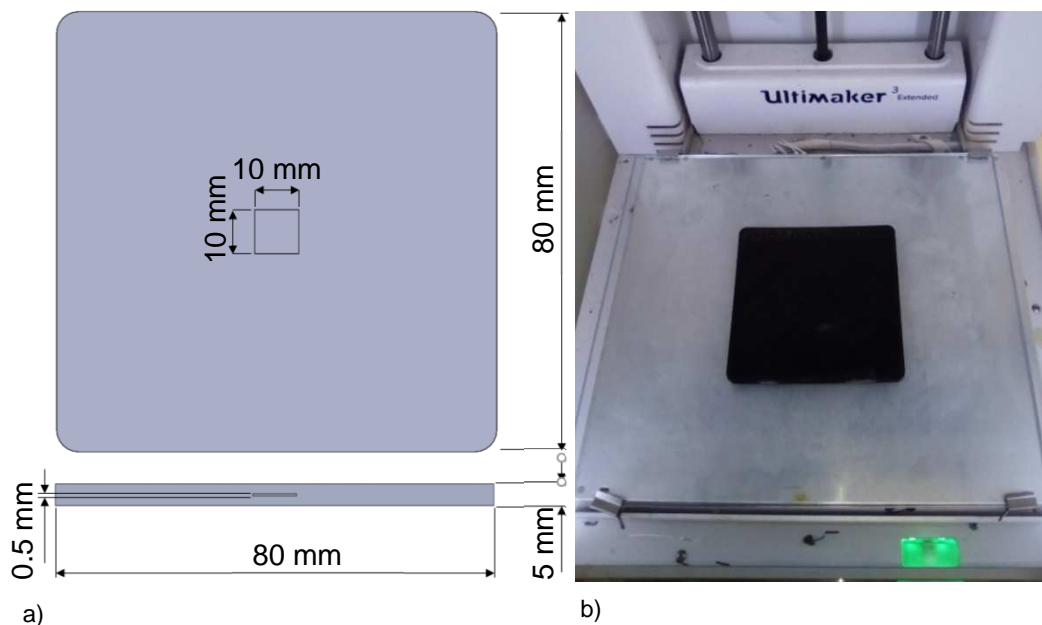


Figura 3.10 – Provete 1.
a) Dimensões do provete 1 e defeito. b) Produção do provete

3.4.2 – Provete 2

O provete 2 foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a capacidade de deteção de delaminações perpendiculares à espessura com recurso às técnicas de TAP e ACUS. Este provete consiste numa placa de PLA de dimensões 180 mm x 160 mm x 4mm, com uma delaminação triangular a meia espessura, tendo sido produzido por *FDM* com um *nozzle* de 2 mm de diâmetro e com enchimento de 100 %. Considerou-se importante que a delaminação fosse produzida de forma similar ao que poderia ocorrer durante a produção de componentes por *FDM*. Como tal gerou-se um desalinhamento nas trajetórias de deposição de PLA, mantendo assim a espessura de material depositado e criando uma delaminação. A Figura 3.11 mostra este efeito numa seção transversal do provete.

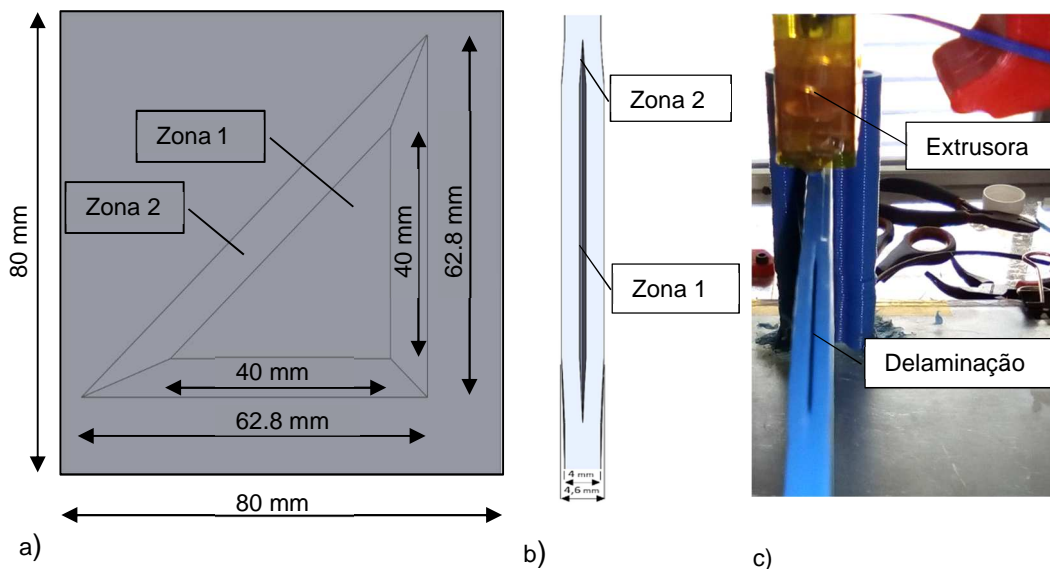


Figura 3.11 – Provete 2.
 a) Dimensões do defeito e da área útil do provete,
 b) Secção transversal do provete,
 c) Produção do Provete por *FDM*

Na Zona 1, o defeito tem uma espessura constante de 0,5 mm, enquanto na Zona 2 a espessura diminui linearmente de 0,5 mm na aresta interna até 0 mm na aresta externa do defeito.

3.4.3 – Provete 3

O provete 3 foi produzido com o objetivo de avaliar a capacidade de deteção de delaminações paralelas à espessura com recurso às técnicas de TAP e ACUS. Este provete consiste numa placa de PLA de dimensões 180 x 160 x 4 mm, produzida por *FDM* com um nozzle de 2 mm de diâmetro e com enchimento de 100 %. Na Figura 3.12 observa-se a delaminação produzida ao longo de toda a espessura com 24 mm de comprimento e 0,4 mm de espessura. Produziu-se a delaminação através da inserção de tiras de fita de Kapton entre duas camadas.



Figura 3.12 – Provete 3.

3.4.4 – Provete 4

O provete 4 foi produzido com o objetivo de confirmar a capacidade da técnica de ACUS detetar defeitos por difração dos ultra-sons. Na Figura 3.13 apresenta-se uma ampliação dos defeitos produzidos no provete, que consiste numa placa de uma liga de magnésio com dois furos passantes de 0,6 mm de diâmetro espaçados de 6,5 mm.

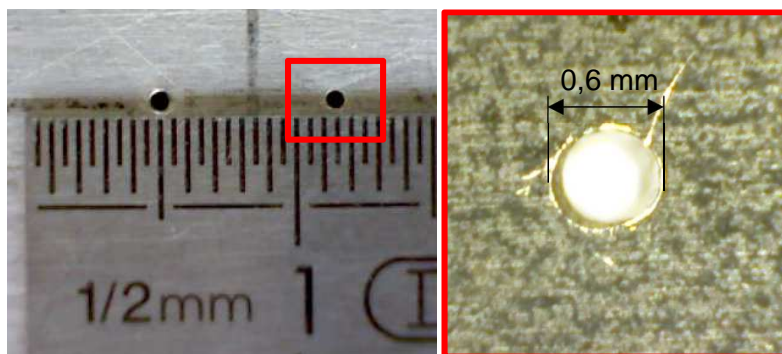


Figura 3.13 – Provete 4.

3.4.5 – Provete 5 e 6

Os provetes 5 e 6 foram produzidos com o propósito de avaliar a capacidade de detetar desalinhamentos e descontinuidades em fibras de reforço. Estes provetes consistem em placas de PLA de 5 mm de espessura, produzidas por FDM, em que se inseriram dois arames de NiTi com 0,8 mm de diâmetro.

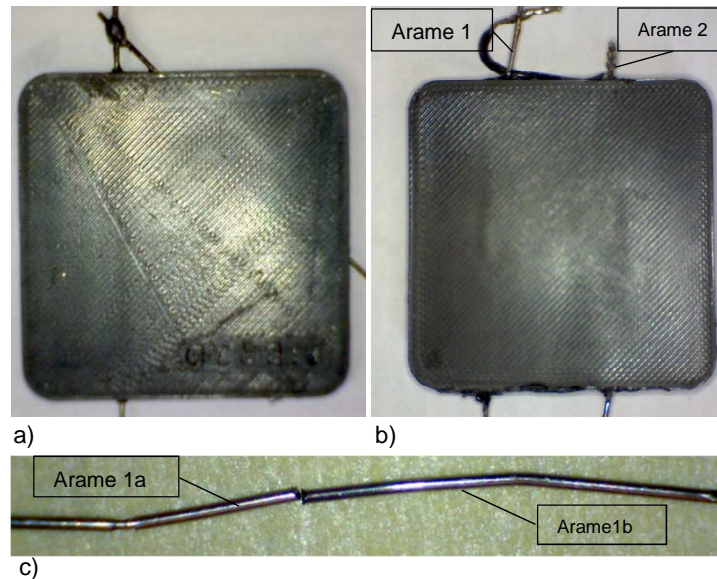


Figura 3.14 – Provete 5 e 6.
a) Provete 5; b) Provete 6; c) Arame 1 inserido no provete 6.

No provete 5 inseriram-se arames de NiTi em dois canais a meia espessura do provete. Este provete não contém defeitos e foi utilizado como referência e para aferir valores de corrente elétrica que permitissem realizar ensaios de termografia sem causar alterações nas propriedades físicas do provete. No provete 6 foram inseridos dois arames de NiTi com o objetivo de reproduzir defeitos de desalinhamento de fibras/fios de reforço. O arame 1 foi cortado em duas metades, 1a e 1b, tendo o arame 1a sido aquecido e inserido sob pressão num canal existente no provete, de forma a simular a impregnação completa do arame. Os arames 1b e 2 foram colocados a meia espessura durante a impressão do provete criando uma falta de adesão com o PLA.

3.4.6 – Provetes PTFE

Com o objetivo de estudar o efeito da espessura e da descontinuidade do material na atenuação dos ultra-sons foram utilizadas várias placas de PTFE como provetes. Na

Tabela 3.1 indicam-se as configurações dos ensaios realizados.

Tabela 3.1 Configurações dos ensaios com provetes de PTFE.

Ensaio	Descrição	Configuração
1	1 placa de 1,5 mm	
2	1 placa de 3 mm	
3	2 placas de 1,5 mm	
4	1 placa de 3 mm + 1 placa de 1,5 mm	
5	1 placa de 6 mm	
6	1 placa de 3 mm + 2 placas de 1,5 mm	

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais das técnicas de END por TAP e ACUS.

Para a técnica de TAP realizou-se um estudo comparativo entre o modo reflexão e transmissão em que se utilizou o provete 1, sendo os restantes ensaios de termografia realizados apenas no modo que produziu melhor resultados.

Dos ensaios de ACUS realizados em modo transmissão com recurso a sondas de 50 e 200 kHz, resultaram C-scans que permitem avaliar a detetabilidade dos defeitos, e A-scans que permitem compreender o efeito do aumento da espessura e da descontinuidade do material.

4.2 - Resultados da Termografia

4.2.1 – Resultados provete 1

Os ensaios de termografia realizados com o provete 1 tiveram como objetivo comparar os resultados obtidos pela técnica de TAP em modo reflexão e em modo transmissão, e avaliar a influência do tempo de excitação e do tempo de aquisição nas termografias obtidas.

Nas Figura 4.1 e Figura 4.2 apresentam-se as termografias por reflexão e transmissão do provete 1 realizadas com a câmara termográfica e a lâmpada de infravermelhos a 160 mm de distância.

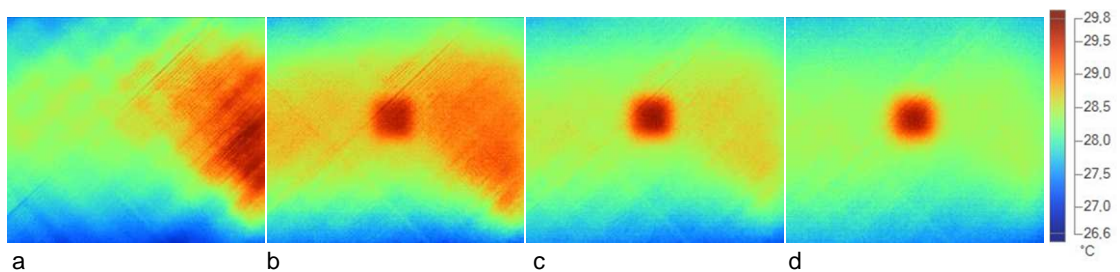


Figura 4.1 – Termografias por reflexão do provete 1 com 20 s de excitação.
a) $t = 0$ s, b) $t = 10$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 30$ s

O aquecimento não uniforme é visível na Figura 4.1 a) e b), porém, 30 segundos após o fim da excitação a superfície do provete apresenta um perfil de temperaturas uniforme fora do defeito. O defeito permanece visível e com boa definição da sua geometria entre os 10 e os 30 segundos após o fim da excitação.

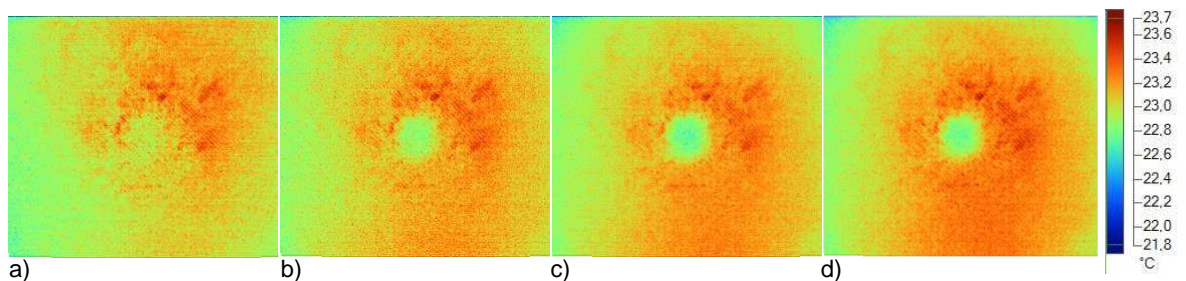


Figura 4.2 – Termografias por transmissão do provete 1 com 20 s de excitação.
a) $t = 0$ s, b) $t = 10$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 30$ s

Nas termografias por transmissão o defeito apresenta uma temperatura inferior à área circundante uma vez que no modo transmissão a excitação térmica e a aquisição da imagem são realizadas em faces opostas, ou seja a presença da delaminação dificulta o escoamento do calor da face em que incidiu a lâmpada para a face em que se adquire a imagem.

Conforme era expectável na termografia por transmissão o efeito de aquecimento não uniforme é menor, ainda que na Figura 4.2 sejam visíveis algumas heterogeneidades causadas por variações da emissividade na superfície do provete. Porém comparando o contraste entre o defeito e o material base na Figura 4.1 e na Figura 4.2 conclui-se que a termografia em modo reflexão produz imagens com melhor contraste e definição da geometria dos defeitos. Esta situação é realçada na Figura 4.3 onde se apresentam os perfis de temperatura de uma linha sobre o defeito das Figura 4.1 d) e Figura 4.2 d).

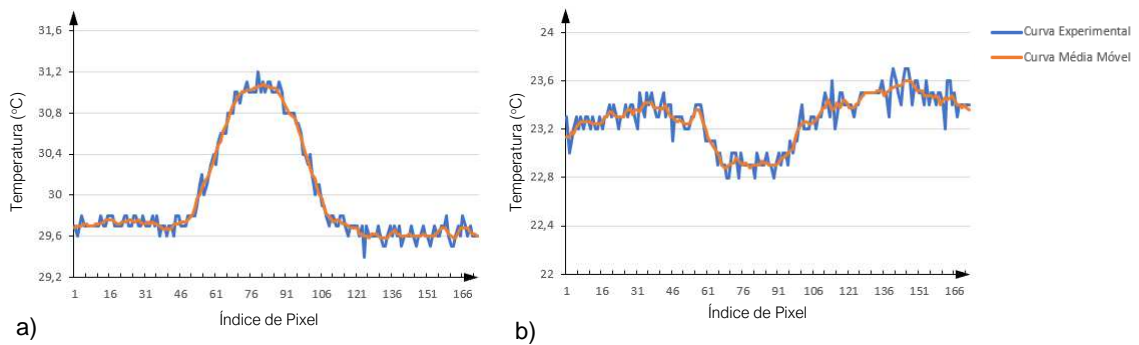


Figura 4.3 –Perfis de temperatura do provete 1 no instante $t= 30$ s em modo reflexão a), e em modo transmissão b).

Verifica-se que a diferença de temperatura entre a zona com defeito e sem defeito é de 1,5 °C em modo reflexão e 0,6 °C em modo transmissão.

4.2.2 – Resultados provete 2

Para realizar os ensaios de termografia ao provete 2 considerou-se as conclusões retiradas dos ensaios de termografia ao provete 1, tendo sido realizados apenas ensaios em modo reflexão nas mesmas condições que anteriormente.

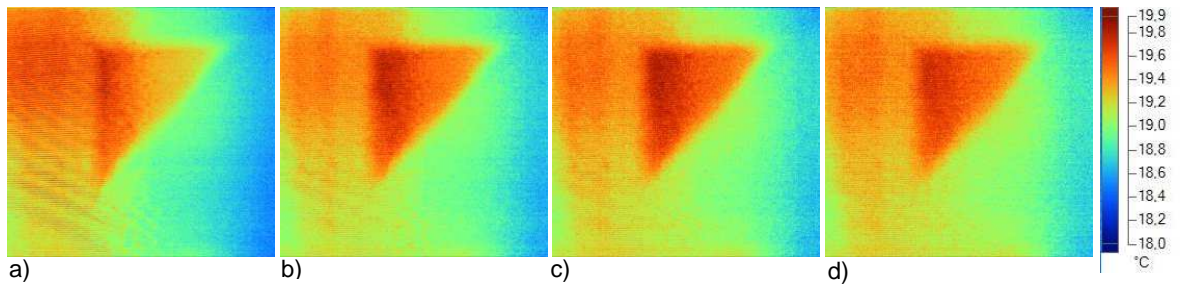


Figura 4.4 – Termografias por reflexão do provete 2 com 30 s de excitação.

a) t = 0 s, b) t = 10 s, c) t = 20 s, d) t = 30 s

Na Figura 4.4 observa-se que a termografia com maior contraste, nitidez e menor influência do aquecimento não uniforme foi adquirida no instante t=30 segundos após o fim da excitação.

Verifica-se também que apesar de o aquecimento ter sido superior no lado esquerdo do provete, em resultado da posição da lâmpada de infravermelhos, a capacidade de detetar o defeito não foi afetada. Este resultado é importante para o desenvolvimento de um sistema automatizado de TAP em modo reflexão, uma vez que o menor aquecimento de uma das extremidades da área inspecionada evita a contaminação dos resultados na inspeção da área seguinte do mesmo componente.

4.2.3 – Resultados provete 3

Os ensaios de termografia do provete 3 foram realizados com o objetivo de avaliar se uma delaminação na superfície do provete poderia ser detetada com a técnica de TAP em modo reflexão. Neste caso a delaminação tem uma dimensão reduzida e como tal não é expectável que provoque alterações na resposta térmica do provete à medida que o calor se propaga entre as duas faces do provete. Porém a presença da delaminação na superfície do provete poderia causar um aumento localizado da temperatura uma vez que a descontinuidade do material dificulta o processo de homogeneização da temperatura na superfície.

Na Figura 4.5 observa-se que imediatamente após o fim da excitação térmica existe um contraste de temperatura entre o centro da delaminação, os seus limites o restante material. O centro da delaminação permanece visível 30 segundos após o fim da excitação térmica, porém o contraste nos seus limites dissipa-se após 10 segundos.

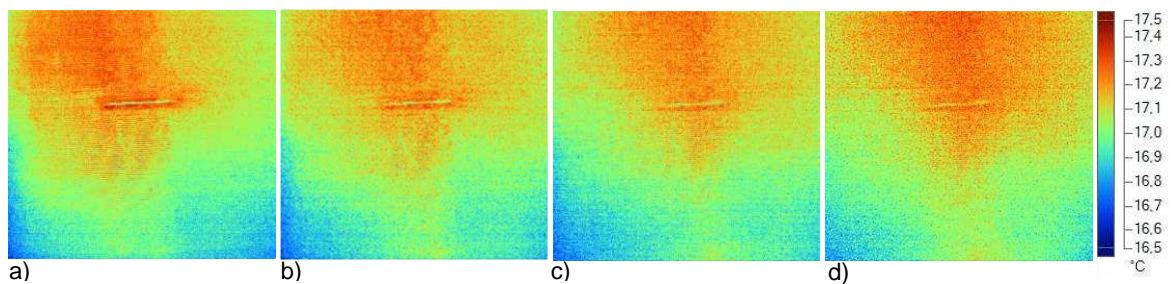


Figura 4.5 – Termografias por reflexão do provete 4 com 30 s de excitação.
a) $t = 0$ s, b) $t = 10$ s, c) $t = 20$ s, d) $t = 30$ s

Conclui-se que para delaminações paralelas à espessura e que propaguem até à superfície o melhor contraste termográfico é obtido imediatamente após o fim da excitação térmica.

4.2.4 – Resultados provete 5

Com o provete 5 realizaram-se ensaios de termografia ativa em que se produziu uma excitação térmica por efeito de Joule resultante da aplicação de uma tensão elétrica nas extremidades dos arames de NiTi com 0,8 mm de espessura. Na Figura 4.6 apresentam-se as termografias dos instantes $t = 0$ s e $t = 5$ s após o fim da excitação elétrica para três combinações de corrente elétrica e tempo de excitação.

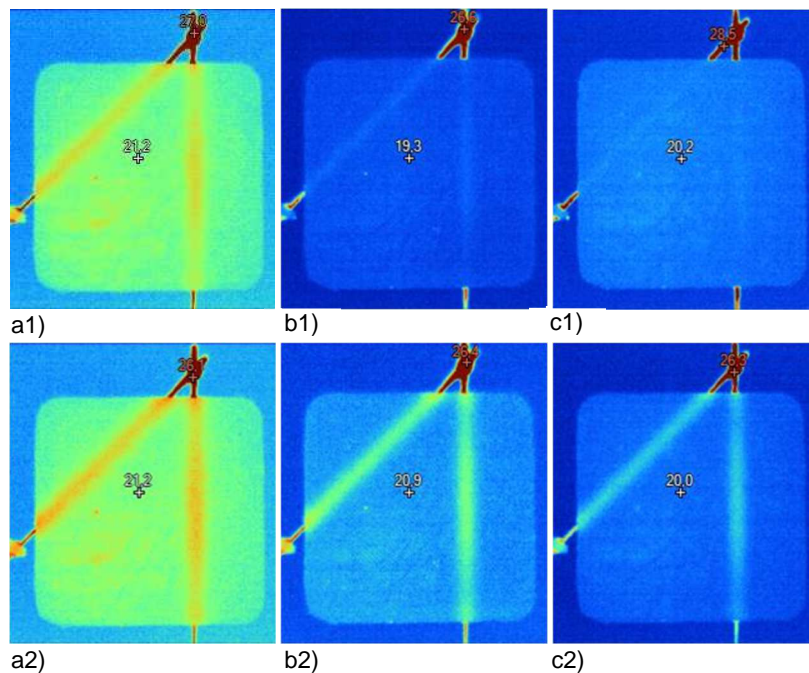


Figura 4.6 – Termografias do provete 5 nos instantes $t=0$ s e $t=5$ s após o fim da excitação elétrica de: a1 e a2) 0,8 A durante 20 s; b1 e b2) 1,5 A durante 5 s; c1 e c2) 2 A durante 3 s

Na Figura 4.6 observa-se que a termografia com melhor contraste e nitidez é obtida com uma corrente de 2 A aplicada durante 3 segundos. Verifica-se também que a temperatura máxima no arame de NiTi foi 28,5 °C, valor inferior a 52 °C, temperatura máxima de funcionamento do PLA.

4.2.5 – Resultados provete 6

Apesar de nos ensaios de termografia realizados ao provete 5 se ter concluído que uma excitação elétrica de 2 A durante 3 segundos produzia bons resultados, realizou-se um ensaio ao provete 6 com excitação elétrica de 2 A durante 5 segundos para melhorar a visibilidade dos arames com falta de adesão.

Na Figura 4.7 é visível o contraste entre os arames com boa e má adesão ao PLA, sendo também visível o desalinhamento do arame 2.

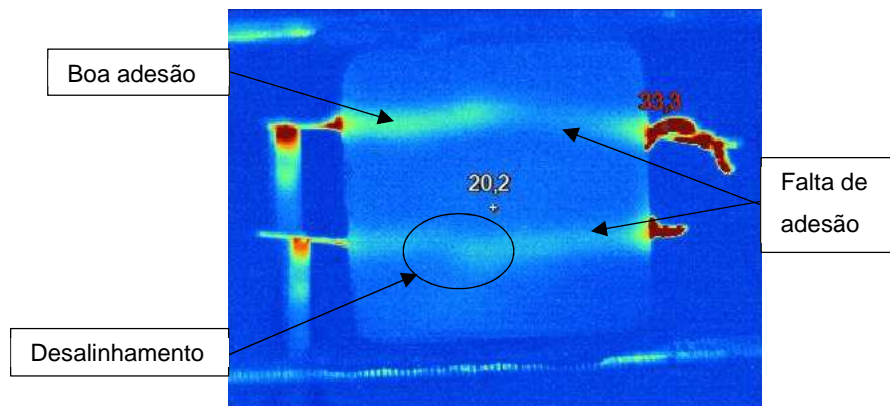


Figura 4.7 – Termografia do provete 6 no instante $t=5$ s após o fim da excitação elétrica de 2 A durante 5 segundos.

4.3 - Resultados dos Ultra-sons

4.3.1 – Resultados provete 2

Realizaram-se ensaios experimentais com o provete 2 com o objetivo de avaliar a capacidade de deteção de delaminações perpendiculares à direção de propagação do som com recurso à técnica de *ACUS* por transmissão. Na Figura 4.8 apresentam-se os A-scans resultantes dos ensaios realizados onde se analisou o efeito da delaminação e da distância entre as sondas e o provete.

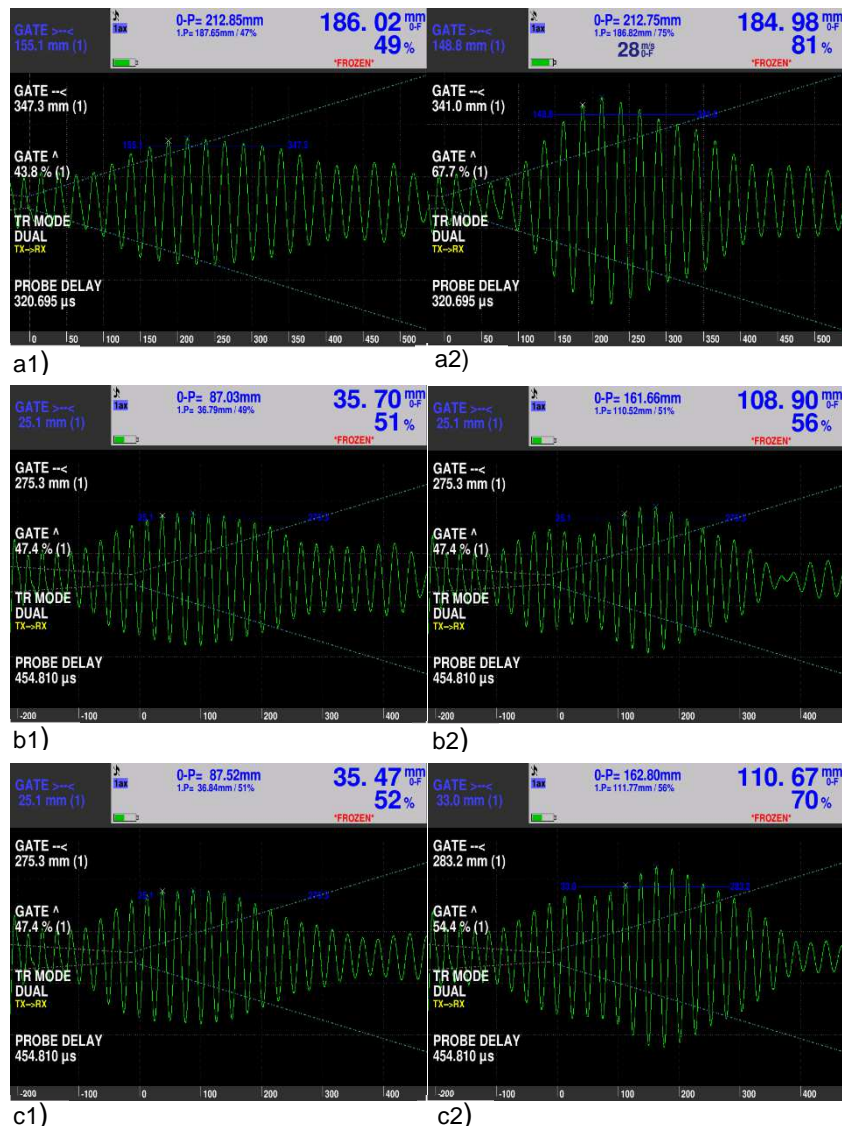


Figura 4.8 – A-Scans do provete 2 com sondas de 50 kHz e 111 dB de ganho
a1 e a2) A-scans a 55 mm de distância sobre e fora do defeito respetivamente
b1 e b2) A-scans a 65 mm de distância sobre e fora do defeito respetivamente
c1 e c2) A-scans a 75 mm de distância sobre e fora do defeito respetivamente

Na Figura 4.8 observa-se a redução da amplitude do sinal causada pela presença da delaminação. Comparando os sinais da Figura 4.8 a2), b2), e c2) observa-se a presença de interferências no sinal em b2) e c2), o que indica que o campo próximo pode ser superior ao valor teórico de 74,8 mm. Na Figura 4.8 a) não é visível a presença de interferências e a amplitude é a mais elevada dos três A-scans, razão pela qual se optou por realizar o C-scan com as sondas a 55 mm de distância do provete.

Na Figura 4.9 a) observa-se o C-scan de amplitude do sinal onde é visível a presença da delaminação com forma triangular, sendo as dimensões do defeito no C-scan próximas das dimensões reais do defeito. A Figura 4.9 b) apresenta um C-scan do tempo de pico do sinal, que se realizou com o objetivo de provar que a diminuição da amplitude não se devia a um possível aumento da espessura do material na zona do defeito. Tendo em conta que a velocidade do som no material do provete é superior à do ar e que a distância entre sondas se mante inalterável, um aumento da espessura de material deveria causar a antecipação do pico do sinal. Observando a Figura 4.8 a1) e a2) verifica-se que sobre a delaminação o pico do sinal surge 0,1 mm após o pico do sinal fora da delaminação, o que significa que o pico se atrasou em vez de se antecipar.

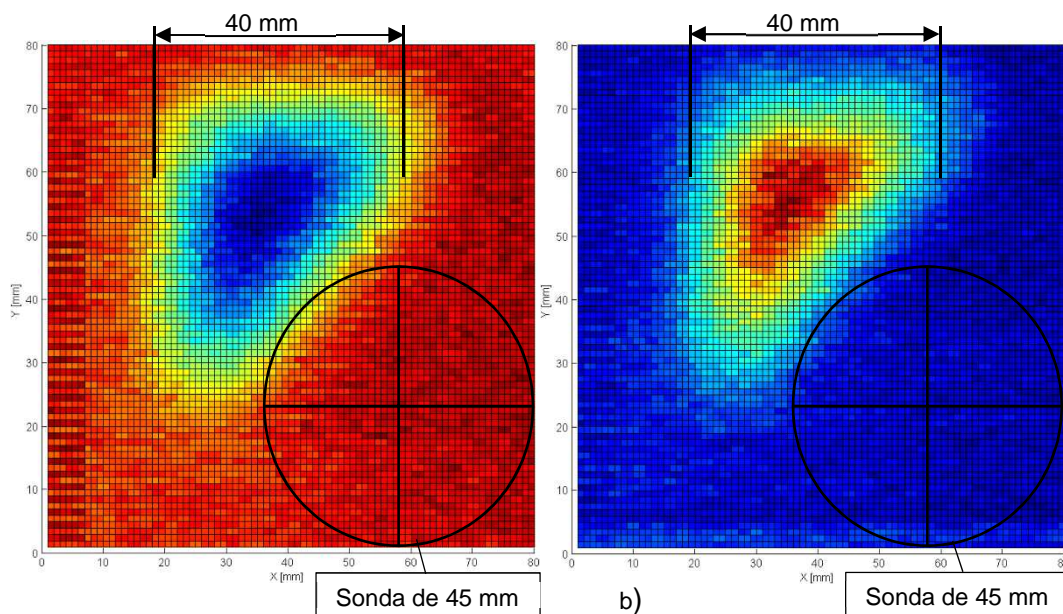


Figura 4.9 – C-Scans do provete 2 com sondas de 50 kHz a 55 mm de distância e 111 dB de ganho. Scan de 80x80 mm e resolução de 1 mm.

a) C-scan de amplitude do sinal, b) C-scan do tempo de pico do sinal

Conclui-se, portanto, que não existe um aumento da espessura de material na zona do defeito e que apesar de não se encontrar uma justificação para o desfasamento temporal, este está relacionado com a presença do defeito.

Na Figura 4.10 verifica-se que as sondas de 200 kHz produzem melhores resultados que as sondas de 50 kHz, uma vez que os limites do defeito apresentam melhor definição e as suas dimensões se aproximam mais das dimensões reais.

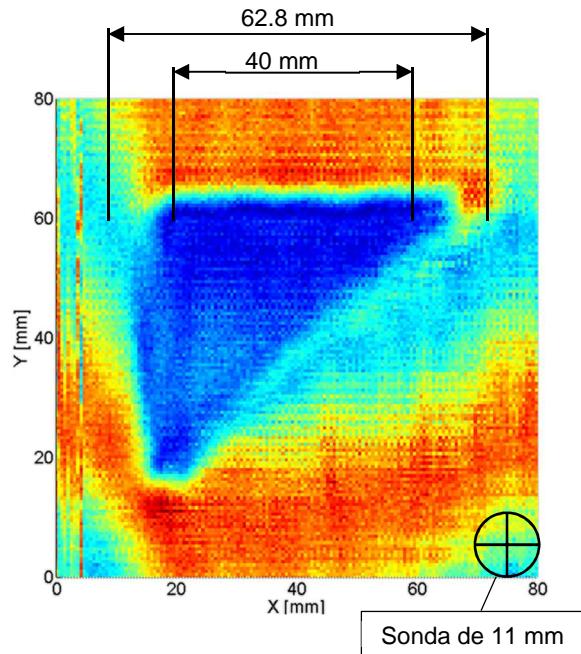


Figura 4.10 – C-Scan do provete 2 com sondas de 200 kHz a 30 mm de distância e 111 dB de ganho. Scan de 80 x 80 mm e resolução de 1 mm.

4.3.2 – Resultados provete 3

Realizaram-se ensaios experimentais com o provete 3 com o objetivo de avaliar a capacidade de deteção de delaminações perpendiculares à direção de propagação do som com recurso à técnica de *ACUS* por transmissão.

Na Figura 4.11 observa-se uma grande variação na amplitude do sinal, sobre e fora do defeito. Realça-se ainda o facto de a delaminação ter cerca de 0,5 mm de espessura e o comprimento de onda λ [mm] ser de 6,86 mm, o que indica que o sinal detetado resulta da difração do sinal emitido.

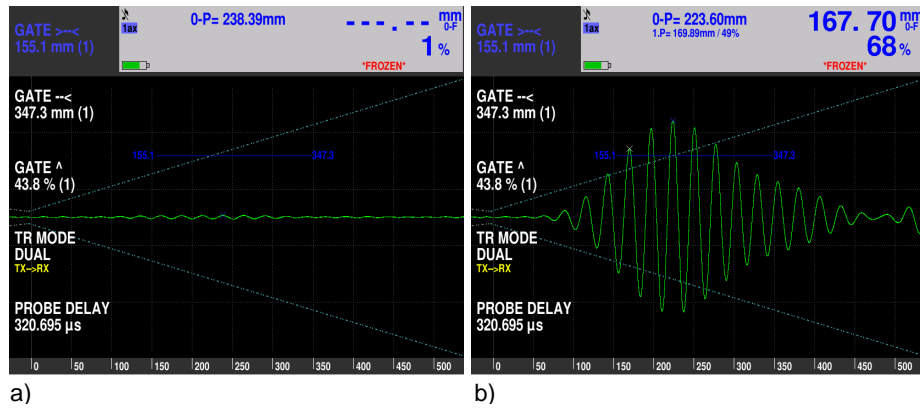


Figura 4.11 – A-scans do provete 3 com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 75 dB de ganho. a) A-scan a 30 mm do defeito b) A-scan sobre o defeito.

Na Figura 4.12 pode-se observar um C-scan do provete 3 onde se destaca o facto da dimensão do defeito (24 mm) ser bem reproduzida no sinal obtido.

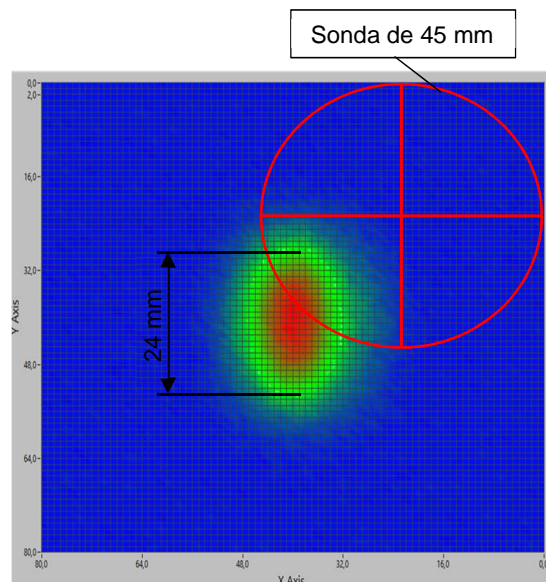


Figura 4.12 – C-scan do provete 3 com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 75 dB de ganho. Scan de 80x80 mm e 1 mm de resolução.

Estes resultados indicam que delaminações paralelas à direção de propagação dos ultra-sons podem ser detetadas pela técnica de ACUS em modo transmissão.

4.3.3 – Resultados provete 4

Para confirmar a hipótese da difração realizaram-se ensaios ao provete 4 com sondas de 200 kHz por serem mais precisas que as sondas de 50 kHz, devido à frequência mais elevada e menor diâmetro do transdutor. Esta precisão foi importante para se conseguir obter uma imagem do campo de interferências criado pela difração dos dois furos.

Na Figura 4.13 observa-se que entre os dois furos a amplitude do sinal é superior à amplitude de ambos os furos, e que os dois furos têm sinais com amplitudes diferentes que se devem a variações no seu diâmetro.

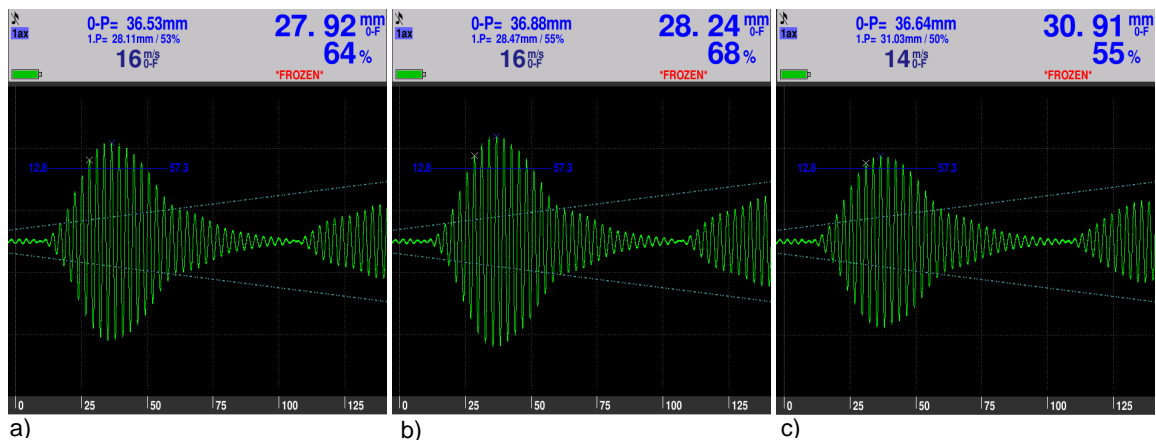


Figura 4.13 – A-scans do provete 4 com sondas de 200 kHz a 30 mm do provete e 95 dB de ganho.

a) A-scan sobre o furo, b) A-scan entre os dois furos, b) A-scan sobre o furo.

Na Figura 4.14 observa-se a interferência construtiva do som difratado nos furos. A inexistência do fenómeno de difração implicaria que entre os dois furos existiria um vale ou um patamar em vez de um pico de amplitude do sinal.

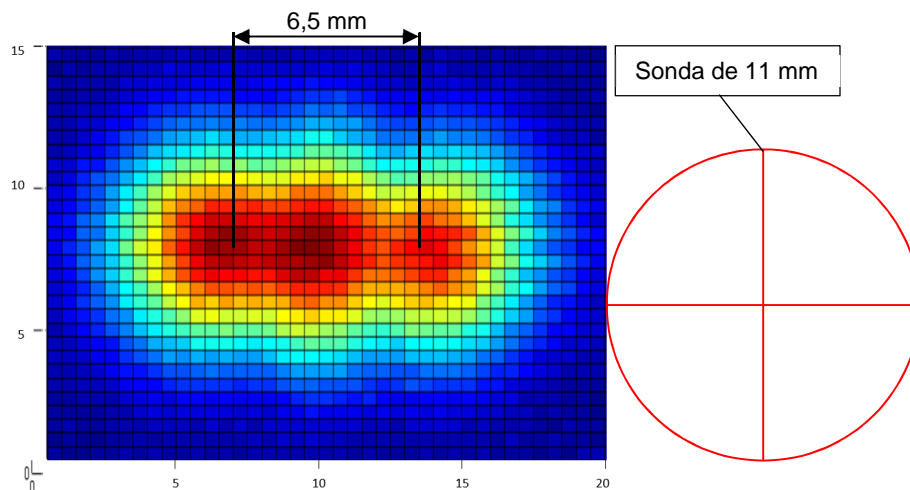


Figura 4.14 – C-scan do provete 4 com sondas de 200 kHz a 30 mm do provete e 50 dB de ganho. Scan de 80 x 80 mm e resolução de 1 mm.

4.3.4 – Resultados provetes PTFE

Realizaram-se ensaios experimentais com os provetes de PTFE com o objetivo de avaliar os efeitos na amplitude do sinal causados pelo aumento da espessura do provete e pela presença de interfaces no seu interior. Na Figura 4.15 apresentam-se os A-scans resultantes dos ensaios realizados.

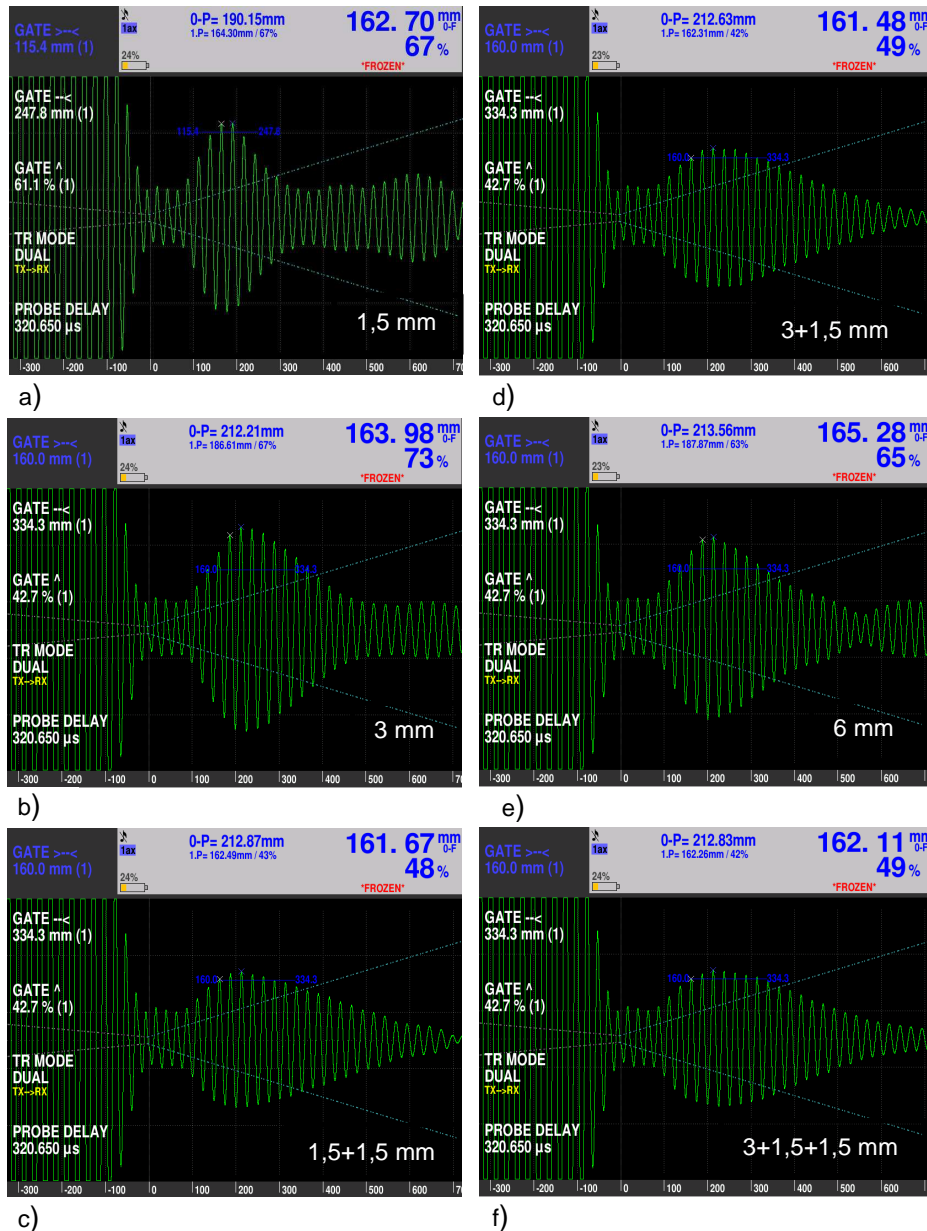


Figura 4.15 – A-Scans do provete de PTFE com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e 111 dB de ganho

- a) A-scan 1,5 mm, b) A-scan 3 mm, c) A-scan 1,5 mm + 1,5 mm,
- d) A-scan 3 mm + 1,5 mm, e) A-scan 6 mm, f) A-scan 3 mm + 1,5 mm + 1,5 mm

Observando a Figura 4.15 b) e e) conclui-se que o aumento da espessura provoca uma redução da amplitude do sinal. Porém na Figura 4.15 c), d) e f) não existe redução da amplitude, ainda que a espessura dos provetes seja de 3 mm, 4,5 mm e 6 mm respetivamente. Como tal conclui-se que a redução da amplitude com o aumento da espessura não se verifica quando existe uma ou mais interfaces no provete. Da Figura 4.15 c), d) e f) conclui-se ainda que a redução de amplitude não é proporcional ao número de interfaces.

4.3.5 – Resultados provete de fibra de carbono

Foi realizado um C-scan num provete de fibra de carbono com 0,5 mm de espessura, composto por 4 camadas de fibra de carbono, tendo sido produzida uma delaminação de 10 mm de largura entre duas camadas consecutivas. Este provete não foi produzido no âmbito deste trabalho, tendo sido facultado por terceiros, porém a título exemplificativo pode-se aferir que a técnica de ACUS por transmissão é eficaz na deteção de delaminações com espessuras muito reduzidas.

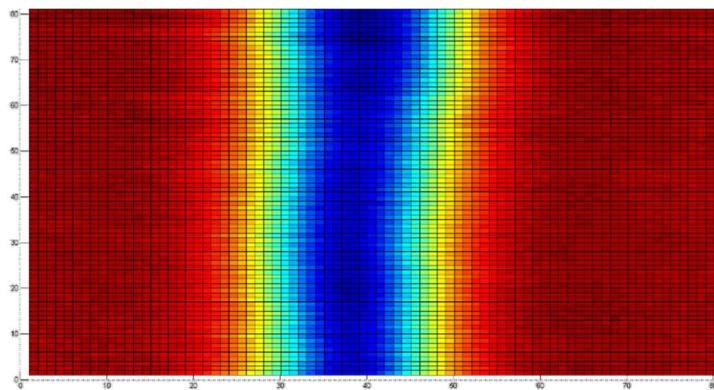


Figura 4.16 – C-scans do provete de fibra de carbono com sondas de 50 kHz a 55 mm do provete e ganho de 60 dB.

5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 – Introdução

Neste capítulo são sintetizadas as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, sendo referidos os defeitos detetados e parâmetros como potência e tempo de excitação, tempo de máximo contraste da imagem, frequência das sondas de ultra-sons

5.2 – Conclusões

Os ensaios de termografia permitiram concluir que a técnica de TAP em modo reflexão é a que melhor se adequa à inspeção de compósitos produzidos por AM, uma vez que apenas é necessário acesso a uma das faces do componente e produz imagens com melhor contraste. Esta técnica permitiu detetar delaminações paralelas e delaminações perpendiculares à superfície. Também foi possível identificar fios de reforço com desalinhamentos e falta de adesão, com recurso à Termografia Passiva. Foi ainda possível verificar que a imagem com melhor contraste é obtida durante o arrefecimento num instante que varia com a tipologia de defeito. Para as condições de ensaio testadas este tempo de contraste máximo corresponde a 30-40 s para

delaminações paralelas à superfície, e 0 s para delaminações perpendiculares localizadas na superfície do componente. As lâmpadas IV de 300 W utilizadas produziram bons resultados ainda que a necessidade de utilização de um filtro dissipador da radiação seja uma desvantagem.

Os ensaios de ultra-sons permitiram confirmar que a técnica de ACUS em modo transmissão é uma técnica viável para inspeção de materiais compósitos de matriz polimérica. Foi possível detetar as delaminações paralelas e perpendiculares com sondas de 50 e 200 kHz, e confirmou-se a possibilidade de deteção por difração do som em defeitos que atravessem a totalidade da espessura. As sondas de 400 kHz produziram resultados insatisfatórios uma vez que o sinal é totalmente atenuado pelo acoplamento de ar. Foi ainda possível constatar que o módulo de inspeção automatizada de ultra-sons não permite obter resultados uma vez a vibração induzida nas sondas e a impossibilidade de ajustar o seu alinhamento interferem no sinal obtido.

Conclui-se ainda que a atenuação da onda sonora não é proporcional ao número de interfaces no componente, sendo igual para componentes com uma ou mais interfaces, o que torna esta técnica interessante para inspeção de matérias compósitos laminados ou produzidos por AM.

5.3 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros

As técnicas de termografia foram exaustivamente estudadas ao longo das últimas décadas, porém a continuação de estudos relacionados com a simulação numérica dos ensaios de termografia permite sistematizar o processo de escolha dos parâmetros de inspeção. Em futuros ensaios de termografia seria recomendável a utilização e avaliação de outros filtros dissipadores para as lâmpadas de infravermelhos, bem como a avaliação de outras combinações de potência e tempo de excitação.

Apesar de se ter comprovado a capacidade de detecção de defeitos por ACUS em modo transmissão, não se compreendem totalmente os fenómenos associados a esta técnica, o que torna relevante realizarem-se mais estudos em componentes com diferentes espessuras e materiais e em compósitos laminados multicamada, por forma a compreender melhor o efeito das interfaces no sinal obtido.

O desenvolvimento de uma melhor solução para o sistema de inspeção automatizada de ultra-sons é essencial para se poderem obter resultados em proveres com geometrias curvas.

Dado o grande interesse que poderia ter para aplicações na indústria aeronáutica, seria interessante avaliar a viabilidade da técnica de ACUS em modo reflexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Ciampa, P. Mahmoodi, F. Pinto, and M. Meo, "Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components," (in English), *Sensors*, Review vol. 18, no. 2, p. 37, Feb 2018, Art no. 609, doi: 10.3390/s18020609.
- [2] "Partial History of Thermal Testing." https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/IRT/IR_History.htm (accessed 26 August 2019).
- [3] R. Mulaveesala and S. Tuli, "Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection," (in English), *Applied Physics Letters*, Article vol. 89, no. 19, p. 3, Nov 2006, Art no. 191913, doi: 10.1063/1.2382738.
- [4] K. Chatterjee, S. Tuli, S. G. Pickering, and D. P. Almond, "A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques," (in English), *Ndt & E International*, Article vol. 44, no. 7, pp. 655-667, Nov 2011, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.06.008.
- [5] G. Giorleo and C. Meola, "Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates," (in English), *Ndt & E International*, Article vol. 35, no. 5, pp. 287-292, Jul 2002, Art no. Pii s0963-8695(01)00062-7, doi: 10.1016/s0963-8695(01)00062-7.
- [6] B. Liu, H. Zhang, H. Fernandes, and X. Maldague, "Quantitative Evaluation of Pulsed Thermography, Lock-in Thermography and Vibrothermography on Foreign Object Defect (FOD) in CFRP," (in English), *Sensors*, Article vol. 16, no. 5, p. 14, May 2016, doi: 10.3390/s16050743.
- [7] "Present State of Ultrasonics." <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/presentstate.htm> (accessed 26 August 2018).
- [8] M. Deka, "Ultrasonic Transducers," Patent Appl. US Patent 4,976,150, issued December 11 1990.
- [9] B. Q. Ma, Z. G. Zhou, H. X. Zhao, D. M. Zhang, and W. P. Liu, "Characterisation of inclusions and disbonds in honeycomb composites using non-contact non-destructive testing techniques," (in English), *Insight*, Article vol. 57, no. 9, pp. 499-507, Sep 2015, doi: 10.1784/insi.2015.57.9.499.
- [10] "Polylactic acid." https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid (accessed 28 August 2019).
- [11] Z. Zhang, C. Breidt, L. Chang, and K. Friedrich, "Wear of PEEK composites related to their mechanical performances," (in English), *Tribology International*, Article; Proceedings Paper vol. 37, no. 3, pp. 271-277, Mar 2004, doi: 10.1016/j.triboint.2003.09.005.
- [12] S. Najeeb, M. S. Zafar, Z. Khurshid, and F. Siddiqui, "Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics," (in English), *Journal of Prosthodontic Research*, Review vol. 60, no. 1, pp. 12-19, Jan 2016, doi: 10.1016/j.jpor.2015.10.001.
- [13] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, "Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," (in English), *Materials*, Review vol. 12, no. 7, p. 41, Apr 2019, Art no. 1121, doi: 10.3390/ma12071121.
- [14] M. Nikzad, S. H. Masood, and I. Sbarski, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling," (in English), *Materials & Design*, Article vol. 32, no. 6, pp. 3448-3456, Jun 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.01.056.
- [15] N. Y. Li, Y. G. Li, and S. T. Liu, "Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing," (in English), *Journal of Materials Processing*

- Technology*, Article vol. 238, pp. 218-225, Dec 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025.
- [16] J. M. Chacon, M. A. Caminero, E. Garcia-Plaza, and P. J. Nunez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," (in English), *Materials & Design*, Article vol. 124, pp. 143-157, Jun 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- [17] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," (in English), *Materials & Design*, Article vol. 83, pp. 768-776, Oct 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- [18] A. Boschetto, L. Bottini, and F. Veniali, "Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining," (in English), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Article vol. 41, pp. 92-101, Oct 2016, doi: 10.1016/j.rcim.2016.03.004.
- [19] Bhardwaj and M. C., "Ultrasonic transducer for high transduction in gases and method for non-contact ultrasound transmission into solid materials," Patent 6,311,573, November 6, 2001.
- [20] D. E. Chimenti, "Review of air-coupled ultrasonic materials characterization," (in English), *Ultrasonics*, Article vol. 54, no. 7, pp. 1804-1816, Sep 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2014.02.006.
- [21] "Encyclopedia of Smart Materials," (in English), *Ieee Circuits & Devices*, News Item vol. 18, no. 4, pp. 59-59, Jul 2002.
- [22] "Acoustic Attenuation in Air." <http://airstar1.com/air-coupled%20us.htm> (accessed 16 January 2018).
- [23] W. Post, M. Kersemans, I. Solodov, K. Van den Abeele, S. J. Garcia, and S. van der Zwaag, "Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer," (in English), *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, Article vol. 101, pp. 243-253, Oct 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.06.018.
- [24] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "THERMAL WAVE IMAGING WITH PHASE SENSITIVE MODULATED THERMOGRAPHY," (in English), *Journal of Applied Physics*, Article vol. 71, no. 8, pp. 3962-3965, Apr 1992, doi: 10.1063/1.351366.
- [25] G. Busse and A. Rosencwaig, "SUBSURFACE IMAGING WITH PHOTOACOUSTICS," (in English), *Applied Physics Letters*, Article vol. 36, no. 10, pp. 815-816, 1980, doi: 10.1063/1.91327.
- [26] R. L. Thomas, J. J. Pouch, Y. H. Wong, L. D. Favro, P. K. Kuo, and A. Rosencwaig, "SUBSURFACE FLAW DETECTION IN METALS BY PHOTOACOUSTIC MICROSCOPY," (in English), *Journal of Applied Physics*, Article vol. 51, no. 2, pp. 1152-1156, 1980, doi: 10.1063/1.327726.
- [27] X. Maldague and S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," (in English), *Journal of Applied Physics*, Article vol. 79, no. 5, pp. 2694-2698, Mar 1996, doi: 10.1063/1.362662.
- [28] S. Marinetti *et al.*, "Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA," (in English), *Infrared Physics & Technology*, Article; Proceedings Paper vol. 46, no. 1-2, pp. 85-91, Dec 2004, doi: 10.1016/j.infrared.2004.03.012.
- [29] N. Rajic, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures," (in English), *Composite Structures*, Article vol. 58, no. 4, pp. 521-528, Dec 2002, Art no. Pii s0263-8223(02)00161-7, doi: 10.1016/s0263-8223(02)00161-7.
- [30] F. Lopez, C. Ibarra-Castanedo, V. D. Nicolau, and X. Maldague, "Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression," (in English), *Ndt & E International*, Article vol. 66, pp. 128-138, Sep 2014, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.06.003.
- [31] "Fluke TI 400." <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-imaging/infrared-cameras/professional-series/fluke-ti400> (accessed 20 January 2018).

- [32] "Detector de defeitos Starmans DIO 1000 LF." <http://www.starmans.net/product/dio-1000-lf/> (accessed 20 January 2018).