



Patrícia Raquel Torres Matos

Licenciatura em Ciências de Engenharia Biomédica

**Instrumentação para avaliação da propagação da
radiação em meios biológicos túrbidos utilizando
radiação laser**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Biomédica

Orientadores: Prof. Doutor João Miguel Pinto Coelho
Professor Auxiliar da Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Física

Prof. Doutor Pedro Vieira
Professor Auxiliar da Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Física



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2019

**Instrumentação para avaliação da propagação da radiação em meios biológicos túrbidos
utilizando radiação laser**

Patrícia Raquel Torres Matos

2019





Patrícia Raquel Torres Matos

Licenciatura em Ciências de Engenharia Biomédica

Instrumentação para avaliação da propagação da radiação em meios biológicos túrbidos utilizando radiação laser

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Biomédica

Orientadores: Prof. Doutor João Miguel Pinto Coelho
Professor Auxiliar da Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências

Prof. Doutor Pedro Vieira
Professor Auxiliar da Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Júri: Presidente: Prof. Doutora Célia Maria Reis Henriques
Professor Auxiliar da Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências

Arguente: Prof. Doutor Manuel Adler Sanchez de Abreu
Investigador Auxiliar da Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências

Vogais: Prof. Doutor Pedro Vieira

Instrumentação para avaliação da fotoativação de sistemas de entrega de fármacos ou hipertermia em meios biológicos túrbidos utilizando radiação laser

Copyright © Patrícia Raquel Torres Matos, 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 deste projeto não teria sido possível sem a preciosa ajuda de algumas pessoas pelas quais manifesto o meu maior apreço e gratidão por toda a colaboração prestada para a realização deste projeto e o meu restante percurso académico.

Assim, começo por prestar um enorme agradecimento aos meus orientadores Professor Doutor João Pinto Coelho e Professor Doutor Pedro Vieira por me terem confiado este projeto e por todos os ensinamentos, conselhos e críticas construtivas. Faço votos de que mantenham sempre vivos o rigor e dedicação com que abraçam cada projeto. Em especial, agradeço ao Professor João pela infindável disponibilidade, orientação e paciência para comigo.

Agradeço ainda à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, em particular a todo a equipa do Laboratório de Ótica, Lasers e Sistemas que teve a amabilidade de partilhar o seu espaço de trabalho comigo e de me auxiliar sempre que precisei. Em particular à Marta Nespereira, agradeço toda a partilha de conhecimento e atenção.

Ao Professor Doutor Paulo Ribeiro agradeço a sua intervenção, a cedência de materiais, todo o esforço e simpatia incansável que teve para comigo e que me permitiu explorar aspetos do projeto que sem a sua intervenção poderia não sido possível explorar.

À Investigadora Susana Silva do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, um especial obrigado por toda a partilha de conhecimento, atenção e pura simpatia que teve para comigo desde o primeiro minuto que contactámos.

Um agradecimento aos meus amigos com quem partilhei estes cinco anos, que de uma forma ou de outra contribuíram para que esta minha etapa fosse um pouco mais fácil.

O agradecimento mais especial de todos à minha Mãe que com muito esforço e dedicação me permitiu estar aqui hoje, que me apoiou incondicionalmente em todas as ocasiões boas e más e que em momento algum deixou que algo me faltasse. Um agradecimento igualmente muito especial à minha Irmã por ser a melhor amiga, companheira, confidente, por estar sempre lá para mim e por ser a minha grande ajuda diária.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os docentes com quem tive a oportunidade e o prazer de contactar agradeço todos os ensinamentos transmitidos e todo o profissionalismo, foi um orgulho fazer parte desta instituição.

Resumo

A radiação laser tem sido amplamente utilizada na área da medicina como ferramenta para técnicas de diagnóstico não invasivas e até como instrumento cirúrgico na biomedicina. As polivalências desta tecnologia e o sucesso da sua aplicação têm suscitado a utilização da radiação laser direcionada para a terapia tumoral na fotoativação de fármacos ou na ablação dos tumores. A principal dificuldade na aplicação da radiação laser aos meios biológicos túrbidos prende-se com o desenvolvimento e implementação de metodologias para avaliar a distribuição da radiação no interior de fantasmas simuladores desses meios específicos sob irradiação laser. Neste caso, a medição deve ser o menos invasiva possível e insensível à própria radiação laser.

Até ao momento não existe nenhum estudo de técnicas que permitam avaliar a interação da radiação laser com fantasmas ópticos de diferentes coeficientes de difusão. Tal estudo possibilitará inferir sobre o comportamento da radiação laser no interior de diferentes meios biológicos túrbidos, permitindo terapias mais localizadas e eficientes.

Esta tese apresenta a performance de cinco instrumentos imagiológicos e metro-lógicos na avaliação direta e indireta, respetivamente, da propagação da radiação laser no interior de fantasmas ópticos com diferentes coeficientes de difusão. Os instrumentos estudados foram o Termómetro de Infravermelho, a câmara de telemóvel, a câmara USB, o termómetro Termopar e o Sensor de fibra óptica. Na categoria de instrumentos imagiológicos, a câmara de telemóvel apresenta os resultados mais conclusivos para uma avaliação direta da propagação do feixe laser, enquanto que na categoria de instrumentos metro-lógicos os resultados mais conclusivos para uma avaliação indireta registam-se com a utilização do termómetro Termopar.

O estudo aqui desenvolvido possibilita ainda definir linhas mestras para moldar a criação de novos instrumentos que permitam avaliar a fotoativação dos sistemas de entrega de fármacos ou a hipertermia em meios biológicos túrbidos, com recurso à radiação laser.

Palavras-chave: Radiação laser, fantoma óptico, Termografia de Infravermelho, Termopar, sensor CMOS, sensores de fibra óptica.

Abstract

Laser radiation has been widely used in medicine as a tool of noninvasive diagnostic techniques and even as surgical in biomedicine. This multipurpose technology and its successful application have raised its use in tumoral therapy aiming the photoactivation of drugs or the tumor ablation. The biggest obstacle for the application of laser radiation in biological turbid means is related to the development and implementation of methodologies to evaluate the radiation distribution inside phantoms which mimic those specific means under laser irradiation. In this case, the measure must be the least invasive possible and insensitive to the own radiation itself.

To date, there is no registered study in techniques that allow the evaluation of laser radiation interaction with different diffusion coefficient phantoms. Such study would enable the understanding of laser radiation behavior inside different biological turbid means, leading to more accurate and efficient therapies.

This thesis presents the performance of five imaging and metrological instruments in the direct and indirect evaluation, respectively, of laser radiation propagation inside optical phantoms with different diffusion coefficients. The studied instruments were an Infrared Thermometer, a cellphone camera, a USB camera, a thermocouple and an optical fiber sensor. In imaging instrumentation category, the cellphone camera presents the most conclusive results for a direct evaluation of laser radiation propagation, while in metrological instrumentation category the most conclusive results for an indirect evaluation are registered using the thermocouple.

The study conducted enables the definition of general outlines to mold the creation of new instrumentation which allows the evaluation of drugs delivery systems photoactivation in biological turbid means, using laser radiation.

Keywords: Laser radiation, optical phantom, Infrared Termography, Termocouple, CMOS sensor, optical fiber sensor.

Conteúdo

Lista de Figuras	xvi
Lista de Tabelas	xx
Lista de Acrónimos	xxii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.1.1 Fototerapia.....	1
1.1.2 Interação da radiação laser com os meios túrbidos.....	2
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Aplicação	3
1.4 Estrutura da Tese.....	4
2 Conceitos Teóricos	5
2.1 Radiação Laser	5
2.1.1 Componentes	5
2.1.2 Propriedades do laser	6
2.1.3 Princípio de funcionamento.....	7
2.2 Interação da luz com meios biológicos túrbidos	7
2.3 Sensores de fibra óptica.....	10
2.4 Imagiologia e Termografia de IV	11
3 Estado de Arte	14
3.1 Radiação Laser	14
3.1.1 Radiação laser e Hipertermia na Fototerapia tumoral.....	15
3.1.2 Estimar o comportamento da radiação laser em meios túrbidos	16

3.2	Imagiologia e Termografia de Infravermelho	16
3.3	Sensores de fibra óptica e Radiação Laser na Hipertermia	18
4	Materiais e Metodologias Experimentais	20
4.1	Laser	20
4.2	Corpo absorvedor.....	20
4.3	Fantoma	22
4.3.1	Fantoma A	23
4.3.2	Fantoma B	24
4.3.3	Fantoma C.....	25
4.3.4	Fantoma D	26
4.4	Termómetro de Infravermelho.....	28
4.5	Câmara de telemóvel	29
4.6	Câmara USB	29
4.7	Termómetro Termopar	30
4.8	Sensores de fibra óptica.....	31
5	Procedimento Experimental	35
5.1	Fantoma A	35
5.1.1	Termómetro de IV	35
5.1.2	Câmara de telemóvel	37
5.1.3	Recolha e análise de dados.....	37
5.2	Fantoma B.....	37
5.2.1	Termómetro de IV	38
5.2.2	Câmara de telemóvel	39
5.2.3	Recolha e análise de dados.....	39
5.3	Fantoma C	40
5.3.1	Termómetro de IV	41
5.3.2	Câmara de telemóvel	41
5.3.3	Termómetro Termopar	42
5.3.4	Recolha e análise de dados.....	42
5.4	Fantoma D	42
5.4.1	Câmara de telemóvel	43
5.4.2	Câmara USB	43
5.4.3	Termopar	43
5.4.4	Sensor de Fibra Óptica.....	44
5.4.5	Recolha e análise de dados.....	44
6	Resultados e Análise	46
6.1	Metrologia	46
6.1.1	Termómetro de IV	46
6.1.2	Termómetro Termopar	57
6.1.3	Sensor de fibra óptica.....	86

6.2 Imagiologia.....	87
6.2.1 Termómetro de IV	88
6.2.2 Câmara de telemóvel	100
6.2.1 Câmara USB	109
6.3 Análise comparativa	112
6.3.1 Instrumentos Metrológicos	112
6.3.2 Instrumentos Imagiológicos.....	114
6.4 Fantomas.....	117
6.4.1 Fantoma A	117
6.4.2 Fantoma B	118
6.4.3 Fantoma C.....	120
6.4.4 Fantoma D	122
7 Conclusão	123
Bibliografia	126
Anexo 1 – Curva de Calibração do Laser	130
Anexo 2 – Teste de resistência da esfera absorvedora	134
Anexo 3 - Teste de resistência do fantoma	140
Anexo 4 – Especificações do Termómetro de IV	144
Anexo 5 – Especificações do Termómetro Termopar	146
Anexo 6 – Especificações da Câmara USB.....	147
Sensor CMOS MT9V022	149
Anexo 7 – Construção dos sensores de fibra Óptica	150
Caracterização dos sensores de fibra óptica	153

Lista de Figuras

FIGURA 2.1: ESQUEMA DA CAVIDADE DE RESSONÂNCIA DE UM DISPOSITIVO LASER.....	6
FIGURA 2.2: ESQUEMA DA INTERAÇÃO DA LUZ COM UM MEIO	8
FIGURA 2.3: ESPETRO DE ABSORÇÃO DOS PRINCIPAIS CONSTITUINTES DO TECIDO.....	8
FIGURA 2.4: ILUSTRAÇÃO DOS MECANISMOS DA INTERAÇÃO ENTRE O FEIXE LASER E OS TECIDOS BIOLÓGICOS EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA E DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO.	9
FIGURA 2.5: REPRESENTAÇÃO DO ÂNGULO CRÍTICO θ_c , NUMA FIBRA ÓTICA ONDE OCORRE REFLEXÃO INTERNA TOTAL	11
FIGURA 2.6: ESPETRO DE SENSIBILIDADE EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA, TÍPICO PARA UM SENSOR CMOS..	12
FIGURA 4.1: IMAGEM DAS DUAS VERSÕES DE ESFERAS ABSORVEDORAS CONSTRUÍDAS.	21
FIGURA 4.2: IMAGEM DOS DOIS FANTOMAS DE CONCENTRAÇÃO 0,4% EM ÁGAR-ÁGAR CONSTRUÍDOS.....	24
FIGURA 4.3: IMAGEM DOS FANTOMAS B.1 E B.2.....	25
FIGURA 4.4: IMAGENS ESQUEMÁTICAS DAS DIMENSÕES DAS DUAS VERSÕES DO FANTOMA C CONSTRUÍDAS.	26
FIGURA 4.5: IMAGENS DA VISTA SUPERIOR DO MOLDE DO FANTOMA D.....	26
FIGURA 4.6: VISTA SUPERIOR DO FANTOMA D.1 COM A ESFERA ABSORVEDORA INCORPORADA COM 1,6 CM DE DIÂMETRO..	27
FIGURA 4.7: IMAGEM DAS QUATRO VERSÕES DO FANTOMA D DE CONCENTRAÇÕES EM INTRALÍPIDOS 0%, 1%, 2% E 3%.	27
FIGURA 4.8: ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES ENCONTRADOS NO INTERIOR DO TERMÓMETRO DE INFRAVERMELHO FLUKE VT02.	28
FIGURA 4.9: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL CONSTRUÍDO PARA CAPTAÇÃO DE IMAGENS DA PROPAGAÇÃO DO FEIXE LASER NO INTERIOR DE ALGUNS DOS DIFERENTES FANTOMAS UTILIZADOS AO LONGO DO PROJETO.	30
FIGURA 4.10: ESPETRO DE TRANSMISSÃO DO FILTRO PASSA-ALTO FEL0550.	30
FIGURA 4.11: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL COM O TERMÓMETRO TERMOPAR.....	31
FIGURA 4.12: IMAGENS DO FANTOMA D COM A PONTA SENSORA DO SENSOR DE FIBRA ÓPTICA INTRODUZIDO NO INTERIOR DO ABSORVEDOR E NA ESPESSURA DE FANTOMA IRRADIADA PELO FEIXE LASER.	32
FIGURA 4.13: IMAGENS DA VISTA SUPERIOR DO MOLDE DO FANTOMA D E DO FANTOMA D PRONTO PARA O REPOUSO NO MOLDE. .	33
FIGURA 4.14: IMAGENS DA VISTA SUPERIOR DO FANTOMA D.2 NO QUAL FOI INSERIDA A PIPETA DE PASTEUR COM A EXTREMIDADE SENSORA DO SENSOR DE FIBRA ÓPTICA NO SEU INTERIOR.	33
FIGURA 5.1: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL ESCOLHIDO PARA ESTUDAR O FANTOMA A.1..	36
FIGURA 5.2: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL ESCOLHIDO PARA ESTUDAR O FANTOMA A.2.	36
FIGURA 5.3: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL CONSTRUÍDO PARA REALIZAR A EXPERIÊNCIA B.1.1 E A EXPERIÊNCIA B.2.1.....	39
FIGURA 5.4: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL CONSTRUÍDO PARA REALIZAR O ESTUDO DO FANTOMA C.2.....	40
FIGURA 5.5: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL CONSTRUÍDO PARA AS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS SOBRE AS DIFERENTES VERSÕES DO FANTOMA C.1.	41
FIGURA 5.6: IMAGENS DA COLOCAÇÃO DA PONTA DO SENSOR DE FIBRA ÓPTICA NA POSIÇÃO DESEJADA NO INTERIOR DO MOLDE UTILIZADO PARA CONSTRUIR O FANTOMA D.	43
FIGURA 5.7: IMAGEM DO <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DA EXPERIÊNCIA D.1.A.....	44
FIGURA 6.1: GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA REGISTADA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.1 PARA A EXPERIÊNCIA 1 AO LONGO DOS 20 MINUTOS DE IRRADIAÇÃO PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS.	49
FIGURA 6.2: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.1 PARA AS IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA 1 NOS DIVERSOS INTERVALOS DE LEITURA REALIZADOS AO LONGO DOS 20 MINUTOS.....	50
FIGURA 6.3: GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.1 REGISTADA PARA AS DIFERENTES IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA B.1.2 AO LONGO DOS 20 MINUTOS DE CADA IRRADIAÇÃO.	50
FIGURA 6.4: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.1 PARA AS IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA 2 NOS DIVERSOS INTERVALOS DE LEITURA REALIZADOS AO LONGO DOS 20 MINUTOS.....	51

FIGURA 6.5: GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B REGISTRADA PARA AS DIFERENTES IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA B.2.1 AO LONGO DOS 20 MINUTOS DE CADA IRRADIAÇÃO.	52
FIGURA 6.6: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.2 PARA AS IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA 1 NOS DIVERSOS INTERVALOS DE LEITURA REALIZADOS AO LONGO DOS 20 MINUTOS.	53
FIGURA 6.7: GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.2 REGISTRADA PARA AS DIFERENTES IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA B.2.2 AO LONGO DOS 20 MINUTOS DE CADA IRRADIAÇÃO.	54
FIGURA 6.8: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA B.2 PARA AS IRRADIAÇÕES DA EXPERIÊNCIA 2 NOS DIVERSOS INTERVALOS DE LEITURA REALIZADOS AO LONGO DOS 20 MINUTOS.	54
FIGURA 6.9: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA C.1.A PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS.	55
FIGURA 6.10: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA C.1.B PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS.	56
FIGURA 6.11: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA C.1.C. PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS.	57
FIGURA 6.12: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS SOBRE O FANTOMA C.1.A.	58
FIGURA 6.13: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS SOBRE O FANTOMA C.1.B.	59
FIGURA 6.14: GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE FEIXE LASER UTILIZADAS SOBRE O FANTOMA C.1.C.	59
FIGURA 6.16: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.A.	60
FIGURA 6.16: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.A.	61
FIGURA 6.17: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.A.	62
FIGURA 6.18: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	64
FIGURA 6.19: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	64
FIGURA 6.20: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	65
FIGURA 6.21: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	66
FIGURA 6.22: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	67
FIGURA 6.23: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	68
FIGURA 6.24: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.B.	68
FIGURA 6.25: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	69
FIGURA 6.26: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	70
FIGURA 6.27: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	71
FIGURA 6.28: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	71
FIGURA 6.29: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	72
FIGURA 6.30: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA C.2.C.	73
FIGURA 6.31: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.A.	75
FIGURA 6.32: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.A.	75
FIGURA 6.33: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.A.	76
FIGURA 6.34: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.A.	77
FIGURA 6.35: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.B.	78
FIGURA 6.36: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.B.	79
FIGURA 6.37: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.B.	79
FIGURA 6.38: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.B.	80

FIGURA 6.39: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.c	81
FIGURA 6.40: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.c.....	81
FIGURA 6.41: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.c	82
FIGURA 6.42: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.c.....	83
FIGURA 6.43: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.D.....	84
FIGURA 6.44: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.D.	84
FIGURA 6.45: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR PARA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.D.....	85
FIGURA 6.46: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DO ABSORVEDOR AO LONGO DA IRRADIAÇÃO DO FANTOMA D.1.D.	85
FIGURA 6.47: GRÁFICOS DOS SINAIS RECOLHIDOS PARA AS IRRADIAÇÕES COM POTÊNCIAS DE 0,76 W NAS EXPERIÊNCIAS D.3.A E D.4.A.	87
FIGURA 6.48: REGISTOS TERMOGRÁFICOS DO TERMÓMETRO DE IV PARA A SUPERFÍCIE DO FANTOMA NOS MINUTOS 0, 10 E 20 DE IRRADIAÇÃO SOB O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,03 W.	88
FIGURA 6.49: TERMOGRAMAS RECOLHIDOS PARA A IRRADIAÇÃO COM A POTÊNCIA 2,3W REALIZADA NA EXPERIÊNCIA B.1.2 NOS MINUTOS DE IRRADIAÇÃO 0, 10 E 20.	91
FIGURA 6.50: TERMOGRAMAS RECOLHIDOS NA IRRADIAÇÃO COM A POTÊNCIA 0,76 W, RECOLHIDOS NA EXPERIÊNCIA B.2.1 PARA OS MINUTOS DE IRRADIAÇÃO 0, 10 E 20.	91
FIGURA 6.51: TERMOGRAMAS RECOLHIDOS NO DECORRER DA IRRADIAÇÃO COMA POTÊNCIA DE 1,50 W NA EXPERIÊNCIA B.2.1....	92
FIGURA 6.52: TERMOGRAMAS RECOLHIDOS NO DECORRER DA IRRADIAÇÃO COMA POTÊNCIA DE 1,82 W NA EXPERIÊNCIA B.2.1....	93
FIGURA 6.53: TERMOGRAMAS RECOLHIDOS NO DECORRER DA IRRADIAÇÃO B.2.2 SOB IRRADIAÇÃO DA POTÊNCIA 1,50 W.....	93
FIGURA 6.54: – IMAGEM DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER NO INTERIOR DO FANTOMA REGISTADA COM RECURSO À CÂMARA DE TELEMÓVEL.	100
FIGURA 6.55: IMAGENS DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER NO INTERIOR DO FANTOMA B.1 DURANTE A EXPERIÊNCIA 1 SOB IRRADIAÇÃO COM POTÊNCIAS DE 0,37 W E 1,50 W.....	101
FIGURA 6.56: IMAGEM DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER A INCIDIR SOBRE O FANTOMA B.2 NA EXPERIÊNCIA 1 COM A POTÊNCIA DE 0,37 W.	101
FIGURA 6.57: IMAGENS DO FANTOMA B.2 SOB IRRADIAÇÃO DE 1,82 W NA EXPERIÊNCIA 2.	102
FIGURA 6.58: IMAGEM DO FANTOMA B.2 SOB IRRADIAÇÃO DO FEIXE LASER COM POTÊNCIA DE 0,37 W.....	103
FIGURA 6.59: IMAGEM DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER COM POTÊNCIA DE 2,30 W SOBRE O FANTOMA B.1.C.	103
FIGURA 6.60: O FANTOMA COM 1 MM DE ESPESSURA É IRRADIADO COM O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,37 W.	103
FIGURA 6.61: IMAGENS DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER A INCIDIR NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA DE 5 MM DE ESPESSURA E EM SEGUIDA NA SUPERFÍCIE DO ABSORVEDOR PROVOCADA PELA INTERAÇÃO DO FANTOMA COM AS POTÊNCIAS DE 0,37 W, 0,76 W E 1,10 W, RECOLHIDAS COM RECURSO À CÂMARA DE TELEMÓVEL.	104
FIGURA 6.62: IMAGENS DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER A INCIDIR NA SUPERFÍCIE DO FANTOMA DE 10 MM DE ESPESSURA E EM SEGUIDA NA SUPERFÍCIE DO ABSORVEDOR PROVOCADA PELA INTERAÇÃO DO FANTOMA COM AS POTÊNCIAS DE 0,37 W, 0,76 W E 1,10 W, RECOLHIDAS COM RECURSO À CÂMARA DE TELEMÓVEL.....	104
FIGURA 6.63: IMAGEM DO FANTOMA COM 5 MM DE ESPESSURA IRRADIADO COM O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,37 W E 0,76 W	105
FIGURA 6.64: IMAGEM DO FANTOMA COM 10 MM DE ESPESSURA IRRADIADO COM O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,37 W E 0,76 W.	105
FIGURA 6.65: IMAGEM DO FANTOMA COM 14 MM DE ESPESSURA IRRADIADO COM O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,37 W E 0,76 W	106
FIGURA 6.66: IMAGEM DO FANTOMA COM 19 MM DE ESPESSURA IRRADIADO COM O FEIXE LASER DE POTÊNCIA 0,37 W E 0,76 W	106
FIGURA 6.67: IMAGEM DOS DOIS INSTRUMENTOS TERMÓMETRO DE IV E TERMOPAR DURANTE A EXPERIÊNCIA C.1	113

FIGURA 6.68: IMAGEM DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER EM CONTACTO COM O FANTOMA REGISTADA COM A CÂMARA DO TELEMÓVEL.	114
FIGURA 6.69: IMAGENS RECOLHIDAS COM RECURSO À CÂMARA DO TELEMÓVEL DURANTE AS IRRADIAÇÕES COM POTÊNCIAS DE 0,03 W, 0,76 W E 1,50 W (c) SOBRE O FANTOMA B.1.	115
FIGURA 6.70: IMAGEM DA DIFUSÃO DO FEIXE LASER SOBRE O FANTOMA C.1. E DO TERMÓMETRO DE IV A CAPTAR A IMAGEM DO FANTOMA C.1.	116

Lista de Tabelas

TABELA 6.1: RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM AMBOS OS PONTOS A E B DO ENSAIO 2 PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DO FEIXE LASER UTILIZADAS. A MÉDIA DA TEMPERATURA AMBIENTE É APRESENTADA PARA CADA IRRADIAÇÃO.	48
TABELA 6.2: CADA LINHA DA TABELA REÚNE UM CONJUNTO DE TRÊS TERMOGRAMAS REGISTRADOS NOS MINUTOS 0, 10 E 20 DA IRRADIAÇÃO POR UMA DETERMINADA POTÊNCIA. A ESCALA DE CORES USADA PELO TERMÓMETRO DE IV, COMUM A TODOS OS TERMOGRAMAS, É APRESENTADA NO LADO DIREITO DE CADA LINHA DE TERMOGRAMAS.	88
TABELA 6.3: TERMOGRAMAS REGISTRADOS NOS INSTANTES DE IRRADIAÇÃO 0, 10 E 20 PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS UTILIZADAS NA EXPERIÊNCIA B.1.1.	90
TABELA 6.4: CONJUNTO DE TERMOGRAMAS REGISTRADOS PARA A EXPERIÊNCIA C.1.A. CADA LINHA DA TABELA REÚNE O CONJUNTO DE TRÊS TERMOGRAMAS REGISTRADOS NOS MINUTOS 0, 3 E 5 DA IRRADIAÇÃO A UMA DADA POTÊNCIA. A ESCALA DE CORES USADA PELO TERMÓMETRO DE IV É APRESENTADA NO LADO DIREITO DE CADA LINHA.	95
TABELA 6.5: CONJUNTO DE TERMOGRAMAS REGISTRADOS PARA A EXPERIÊNCIA C.1.B. CADA LINHA DA TABELA REÚNE O CONJUNTO DE TRÊS TERMOGRAMAS REGISTRADOS NOS MINUTOS 0, 3 E 5 DA IRRADIAÇÃO A UMA DADA POTÊNCIA. A ESCALA DE CORES USADA PELO TERMÓMETRO DE IV É APRESENTADA NO LADO DIREITO DE CADA LINHA.	97
TABELA 6.6: CONJUNTO DE TERMOGRAMAS REGISTRADOS PARA A EXPERIÊNCIA C.1.B. CADA LINHA DA TABELA REÚNE O CONJUNTO DE TRÊS TERMOGRAMAS REGISTRADOS NOS MINUTOS 0, 3 E 5 DA IRRADIAÇÃO A UMA DADA POTÊNCIA. A ESCALA DE CORES USADA PELO TERMÓMETRO DE IV É APRESENTADA NO LADO DIREITO DE CADA LINHA.	99
TABELA 6.7: IMAGENS RECOLHIDAS NAS DUAS IRRADIAÇÕES REALIZADAS SOBRE AS VÁRIAS ESPESSURAS DO FANTOMA D.2.	107
TABELA 6.8: IMAGENS RECOLHIDAS NAS DUAS IRRADIAÇÕES REALIZADAS SOBRE AS VÁRIAS ESPESSURAS DO FANTOMA D.3.	108
TABELA 6.9: IMAGENS RECOLHIDAS NAS DUAS IRRADIAÇÕES REALIZADAS SOBRE AS VÁRIAS ESPESSURAS DO FANTOMA D.4.	109
TABELA 6.10: IMAGENS DA PROPAGAÇÃO DO FEIXE LASER NO FANTOMA D.2 RECOLHIDAS COM A CÂMARA USB.	110
TABELA 6.11: IMAGENS DA PROPAGAÇÃO DO FEIXE LASER NO FANTOMA D.2 RECOLHIDAS COM A CÂMARA USB.	111
TABELA 6.12: IMAGENS DA PROPAGAÇÃO DO FEIXE LASER NO FANTOMA D.2 RECOLHIDAS COM A CÂMARA USB.	112
TABELA 6.14: IMAGENS RECOLHIDAS PELA CÂMARA DE TELEMÓVEL E PELA CÂMARA USB PARA AS IRRADIAÇÕES COM POTÊNCIA DE 0,76 W REALIZADAS NAS EXPERIÊNCIAS D.2.B, D.3.B E D.4.B.	117

Lista de Acrónimos

IV	Infravermelho
NIR	Near Infrared Radiation
IRT	Infrared Thermography
NAPT	Nanoshell-assisted photo-thermal therapy
MRI	Magnetic ressonance imaging
PRF	Proton ressonance frequency
FDA	Food and Drug Administration
FBG	Fiber Bragg Grating
LPFG	Long Period Fiber Gratings
SPR	Surface Plasmon Ressonance
PAH	Hidrocloreto de polialilamina
PEI	Polietilenoimina
LbL	Layer by Layer
GaAs	Arsenieto de Gálio
GO	Graphene Oxide
OSA	Optical Spectrum Analyser

1

1 Introdução

1.1 Contextualização

O cancro é atualmente considerado uma das principais causas de morbilidade e mortalidade mundial [1]. No ano de 2018, a Organização Mundial de Saúde registou 626 679 mortes provocadas pelo cancro da mama, tendo 22% dos casos sido registados na Europa e 49,6% na Ásia [2].

Em todos os tipos de cancro, corpos celulares malignos iniciam um processo de divisão desmedido que se espalha aos tecidos vizinhos, formando os tumores [3].

Os atuais métodos de terapia mais utilizados no combate ao cancro são a cirurgia, a quimioterapia e a radioterapia. No entanto, os mecanismos de resistência criados pelas células cancerígenas, os níveis de toxicidade não específicos, a elevada invasibilidade e os frequentes efeitos colaterais destas intervenções levaram a medicina a procurar abordagens que contornassem estas desvantagens e garantissem a eficiência do tratamento [4],[5].

1.1.1 Fototerapia

Em utilização há mais de 50 anos na clínica, a Fototerapia consiste numa modalidade alternativa à utilização de técnicas cirúrgicas e farmacêuticas para a qual não há ainda registo de efeitos secundários relevantes ou reações adversas à sua aplicação [6]. A técnica recorre a fontes de luz artificial nas gamas do ultravioleta, infravermelho [7] com o principal objetivo de concentrar a luz no interior de meios biológicos túrbidos, como são exemplo os tecidos humanos, e assim estimular determinadas respostas. No caso da fototerapia tumoral utiliza-se uma fonte de luz artificial para eliminar lesões cancerígenas e pré-cancerígenas [8],[9]. Para além de aplicada na oncologia, a fototerapia tem sido amplamente empregue nas mais diversas áreas da medicina incluindo a dermatologia, oftalmologia, neurologia e

neurocirurgia, desempenhando um papel importante na recuperação nervosa muscular [10], na diminuição da dor, inflamação e ainda na prevenção de fadiga muscular [11].

Na categoria das fototerapias estão incluídas a terapia fotodinâmica e fototérmica, nas quais a zona tumoral é irradiada por radiação de infravermelho próximo, *NIR*. Em ambas as técnicas a radiação ativa moléculas fotoresponsivas que irão provocar a destruição das células cancerígenas. No caso da terapia fotodinâmica estas moléculas são indutoras de espécies reativas de oxigénio e no caso da terapia fototérmica provocam um aumento reduzido de temperatura.

As células tumorais constituem redes vasculares compactas, desorganizadas, permeáveis e com um débil fluxo sanguíneo que retêm facilmente o calor. Esta configuração torna-as mais sensíveis do que as células saudáveis a um aumento de temperatura como o verificado na hipertermia, aquando da absorção da radiação incidente, culminando na sua destruição [12].

Como forma de potenciar a chegada de radiação a um dado local recorre-se ao encapsulamento das moléculas fotoresponsivas em nanopartículas biocompatíveis funcionalizadas. Estas nanopartículas permitem uma terapia mais localizada e eficaz, uma vez que irão alojar-se preferencialmente na zona do tumor [5],[13]. Além disso, as nanopartículas possuem propriedades que lhes conferem um elevado coeficiente de absorção na região do IV próximo o que origina uma concentração de energia absorvida superior no local onde estas se encontram [14].

1.1.2 Interação da radiação laser com os meios túrbidos

O avanço da indústria Biofotónica orientada para a medicina cedo se deparou com a necessidade de investigar as propriedades dos tecidos biológicos, uma vez que a eficácia das terapias com recurso à radiação laser depende sempre da propagação dos fotões e da distribuição da densidade de energia no interior dos tecidos irradiados [15]. No entanto, a difusão que resulta da interação entre os fotões e os tecidos mostra-se muito elevada, limitando o alcance da radiação no tecido e originando resultados díspares dos esperados, comprometendo a utilização e o sucesso das terapias dependentes da radiação laser [14],[16].

Por forma a contornar esta limitação têm sido explorados modelos que simulam as condições de propagação da luz no interior dos tecidos bem como as propriedades óticas dos últimos recorrendo a fantomas de gel. Os fantomas de gel permitem a construção de um ambiente mais controlado do que o conseguido *in vivo*.

Adicionalmente, diversos grupos de investigação têm procurado modelar a frente de onda do feixe laser com o principal objetivo de concentrar a luz no interior do tecido humano, implicando danos mínimos nos tecidos saudáveis. Os modelos de propagação da luz bem como a modelação da frente de onda

visam prever o comportamento da radiação laser nos meios túrbidos e assim permitir ainda a ativação das nanopartículas funcionalizadas [4],[14],[16],[17].

Posto isto, o conhecimento rigoroso das propriedades ópticas dos vários tecidos biológicos, dos efeitos da radiação laser nos mesmos e a descoberta de novas soluções terapêuticas baseadas na radiação laser são questões de elevada relevância para o avanço da tecnologia no diagnóstico não invasivo, na terapia e na cirurgia [15].

1.2 Objetivo

Uma das equipas de investigação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, em parceria com a Faculdade de Farmácia da mesma universidade, tem vindo a desenvolver novas técnicas direcionadas para a terapia de tumores utilizando radiação laser e nanopartículas funcionalizadas.

No decorrer das investigações, as tarefas mais desafiantes foram o desenvolvimento e implementação de metodologias para medir a temperatura, avaliar os efeitos da irradiação laser nos tecidos e desta forma aferir sobre a eficácia da terapia no interior dos fantasmas. A medição da temperatura deve ser o menos invasiva possível e insensível à própria radiação laser.

A tese aqui apresentada consiste no desenvolvimento e estudo de técnicas que permitem compreender a propagação da radiação laser em diferentes meios túrbidos. Os meios túrbidos são simulados por diferentes fantasmas ópticos de Ágar-ágar com um absorvedor na sua constituição que simula o tecido tumoral. Os fantasmas são irradiados por radiação na gama NIR com o comprimento de onda de 808 nm e são monitorizados com recurso a diferentes instrumentos de medida e registo de imagem.

No estudo da propagação do feixe de radiação laser no meio túrbido distinguem-se duas abordagens: a **forma indireta** – o comportamento do feixe é inferido por análise da evolução da temperatura de pontos distintos no fantoma sob irradiação laser com recurso a termómetros; e a **forma direta** – observa-se o comportamento do feixe de radiação laser incidente utilizando uma câmara com um sensor que permite captar o feixe NIR. Ambas as abordagens são exploradas neste projeto.

1.3 Aplicação

A compreensão do comportamento da radiação laser em meios túrbidos permite definir linhas mestras para moldar a criação de instrumentos que avaliem o processo de fotoativação dos sistemas de entrega de fármacos e/ou a hipertermia.

Os sistemas de entrega de fármacos ativam respostas imunológicas com o intuito de tratar o cancro. O controlo de variáveis como a temperatura, aquando da entrega de fármacos nos tecidos biológicos

tumorais, permite uma terapia mais localizada, efetiva e segura, diminuindo os riscos para o utente [18],[19].

As condições simuladas no presente estudo permitem compreender e inferir sobre o comportamento da radiação laser num meio túrbido e posteriormente realizar a construção de instrumentos metrológicos passíveis de serem aplicados na destruição de tumores, onde é fundamental uma elevada precisão de medida.

1.4 Estrutura da Tese

A tese está estruturada da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos considerados relevantes à compreensão das técnicas, ferramentas utilizadas e dos testes conduzidos na tese. Segue-se o capítulo 3 com uma revisão da literatura referente à evolução das técnicas e ferramentas utilizadas ao longo do estudo, nomeadamente nas fibras óticas, enquanto constituintes de sensores, e o avanço verificado na utilização da radiação laser. Adicionalmente, é explorada a crescente necessidade do conhecimento do comportamento da radiação laser nos meios túrbidos enquanto constituinte de diversas terapias utilizadas atualmente na clínica. O capítulo 4 apresenta os métodos experimentais para a construção do fantoma. Em seguida, no capítulo 5 são denotados os procedimentos realizados nas diferentes experiências e no capítulo 6 encontram-se descritos os resultados destas mesmas experiências. Segue-se o capítulo 7 com a análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, as principais conclusões a retirar deste projeto e direções para possíveis estudos a desenvolver no futuro são sumarizadas no capítulo 8.

2

2 Conceitos Teóricos

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos relevantes para a compreensão do projeto. Primeiramente, abordam-se os princípios de funcionamento do laser e dos dispositivos utilizados na sua produção, bem como os tipos de interação possíveis em contacto com os meios biológicos. Segue-se uma explicação da técnica de Termografia de Infravermelho e do princípio de funcionamento das fibras ópticas.

2.1 Radiação Laser

O termo LASER é um acrónimo inglês para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* e como o próprio nome indica, trata-se de um sistema de amplificação da luz que se baseia no princípio físico da emissão estimulada apresentada por Einstein em 1917 [20],[21]. Os feixes de laser são constituídos por radiação eletromagnética (fotões) e podem ser feitos de radiação visível, Raio-X, Ultravioleta ou Infravermelho.

2.1.1 Componentes

O dispositivo laser é constituído por um **meio ativo** que consiste no material cujos átomos serão excitados pela fonte de energia externa. Este meio ativo pode ser sólido (como o rubi), líquido (laser de corante), gasoso (como o dióxido de carbono) ou semiconductor permitindo criar feixes com diferentes comprimentos de onda. A estimulação do meio ativo é feita por uma **fonte de energia externa** que pode ser criada com recurso a eletricidade, a um outro feixe laser menos potente, a uma fonte de luz ou a reações químicas. Esta estimulação confere energia aos eletrões excitando os átomos. O meio ativo está incorporado na **cavidade de ressonância** que é composta por dois espelhos alinhados sobre o eixo longitudinal do meio. Os dois espelhos orientam o sentido dos fotões que circulam na câmara, formando

um feixe de luz coerente (no qual a luz não se difunde). Apenas o primeiro espelho possui refletividade total enquanto o segundo possui um valor inferior (usualmente 98%), permitindo a emissão de parte da radiação gerada (2%). No entanto, ambos os espelhos estão calibrados para refletir apenas um determinado comprimento de onda. O comprimento da cavidade é um valor múltiplo do comprimento de onda dos fótons, por forma a permitir ressonância com a frequência desejada para o feixe de luz laser. (Figura 2.1).

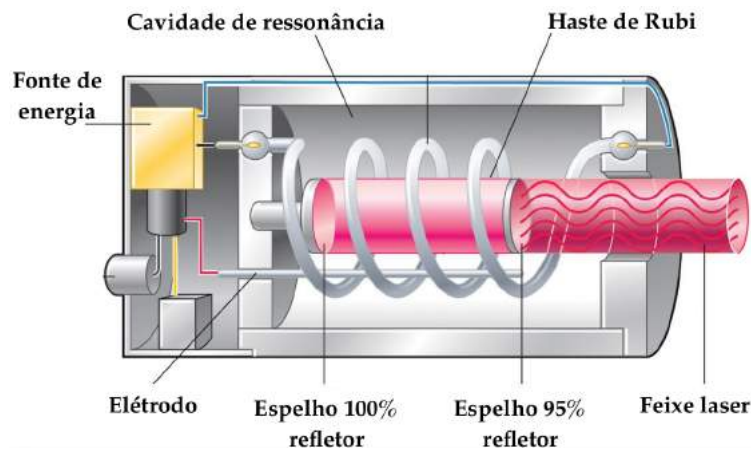


Figura 2.1: Esquema da cavidade de ressonância de um dispositivo laser. Adaptado de [22].

2.1.2 Propriedades do laser

O feixe de luz laser é caracterizado por ser **monocromático** – a geometria da cavidade e a emissão de fótons devido à absorção de valores quantizados de energia garantem a monocromaticidade do feixe, que se define por uma gama de comprimentos de onda muito estreita [23]; **colimado** – devido à geometria da cavidade de ressonância e à quantidade de vezes que o feixe é refletido nos espelhos, o laser fica com uma direção bem definida na qual os raios se tornam cada vez mais paralelos entre si [24] e **coerente** – o fenómeno de emissão estimulada garante a coerência espacial e temporal na direção do feixe laser, uma vez que os fótons libertados e os fótons responsáveis pelo estímulo destes possuem os mesmos valores de frequência e direção e mantêm uma relação de fase constante entre si [25].

Adicionalmente, os lasers podem dividir-se em três grandes categorias a respeito da produção do feixe: **Onda contínua** – o feixe produzido é contínuo e ininterrupto de potência idealmente estável e o comprimento de onda depende do meio ativo utilizado no dispositivo laser;

Pulsado – como o próprio nome indica, o feixe produzido é descontínuo (pulsado) na ordem dos 0.5 a 500 ns. O dispositivo de produção destaca-se pela capacidade de armazenar e libertar energia rapidamente (numa escala do nanossegundo o feixe atinge dezenas de *kilowatts* a *megawatts*);

Ultrarrápido – o feixe é produzido em impulsos na ordem do fentossegundo (10^{-15} segundos) e picossegundo [26].

2.1.3 Princípio de funcionamento

Sabemos pela Mecânica Quântica que os sistemas atômicos apenas admitem estados discretos de energia, o que implica que para ocorrer a transição de um elétron de um nível de baixa energia (E_n) para outro de mais elevada energia (E_{n-1}), é necessário que este absorva uma quantidade de energia bem definida, que é dada pela diferença de energia entre os dois níveis envolvidos na transição [27]. No equilíbrio térmico, os sistemas atômicos encontram-se em maior quantidade no estado de menor energia, havendo apenas uma pequena quantidade de átomos no estado de maior energia devido à agitação térmica [25]. Para a construção de um feixe laser é necessário promover a passagem dos elétrons do estado fundamental para um estado excitado através do fornecimento de energia pela fonte externa ao meio ativo, provocando a **inversão da população** – o nível de energia está mais povoado que o estado fundamental [25],[28]. No entanto, o elétron não vai permanecer durante muito tempo no estado excitado, retornando ao seu estado inicial libertando energia, por dois processos possíveis: **Emissão espontânea** – o elétron decai sem interferência exterior libertando um fóton; **Emissão estimulada** – o decaimento do elétron excitado é induzido por um fóton que tem a mesma energia que a energia de transição do elétron. Quando o elétron encontra tal fóton, ele decai imediatamente gerando outro fóton com a exata energia do fóton que estimulou este decaimento. Como resultado, são produzidos dois fótons não só com a mesma energia, frequência e comprimento de onda, mas também com a mesma direção de movimento, fase e polarização [29].

Adicionalmente ao mecanismo de libertação da luz dos dispositivos laser apresentado, as dimensões da cavidade de ressonância permitem o fenômeno de amplificação do feixe. Esta amplificação surge da contínua interação entre os fótons emitidos e as partículas, e da taxa de absorção destes mesmos fótons sempre inferior à de emissão. A luz proveniente de um dispositivo laser pode alcançar potências muito elevadas em consequência da sua amplificação e da possibilidade de ser concentrada numa área significativamente pequena.

2.2 Interação da luz com meios biológicos túrbidos

A luz proveniente do feixe de laser pode abranger comprimentos de onda entre o Infravermelho e o Ultravioleta, correspondendo a frequências entre 10^{14} Hz e 10^{16} Hz. A interação destas radiações com os tecidos biológicos irá transferir energia ao sistema, provocando um aumento localizado da temperatura dos tecidos sob irradiação. A forma, bem como a duração de aplicação da energia, têm influência

no efeito da interação com os tecidos. Na interação luz-meio, a luz pode sofrer Reflexão dependendo da refletividade da interface ou Transmissão ao longo do tecido depositando-se (Absorção) de acordo com o espectro de transmissão do tecido, podendo sofrer Difusão (Figura 2.3) [30].

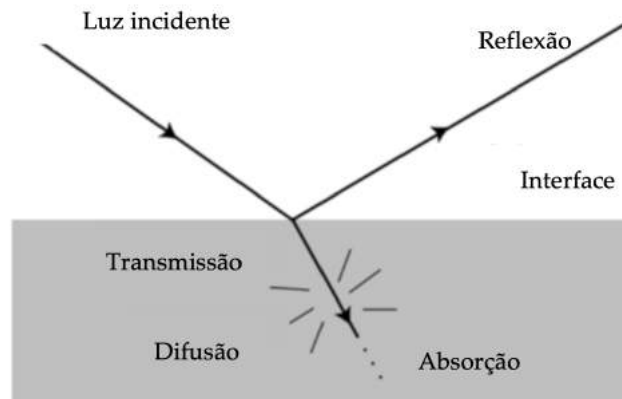


Figura 2.2: Esquema da interação da luz com um meio e os possíveis acontecimentos de reflexão e transmissão parcial. Adaptado de [31].

Os tecidos possuem vários constituintes dos quais se destacam a água (H_2O), a melanina, a desoxi-hemoglobina e principalmente a Oxi-hemoglobina (HbO_2) como sendo os que mais contribuem para as propriedades ópticas do tecido, mediando a deposição da energia nos tecidos [32]. Para radiações incidentes com comprimentos de onda entre 600 nm e 1300 nm a absorção verificada pelos constituintes dos tecidos referidos é mente baixa (aproximadamente inferior a 1). Este intervalo em comprimento de onda designa-se **Janela Terapêutica** e corresponde aos comprimentos de onda onde se verifica uma penetração da luz maximizada, em resultado da baixa absorvância dos constituintes do tecido neste mesmo intervalo (Figura 2.4) [32].

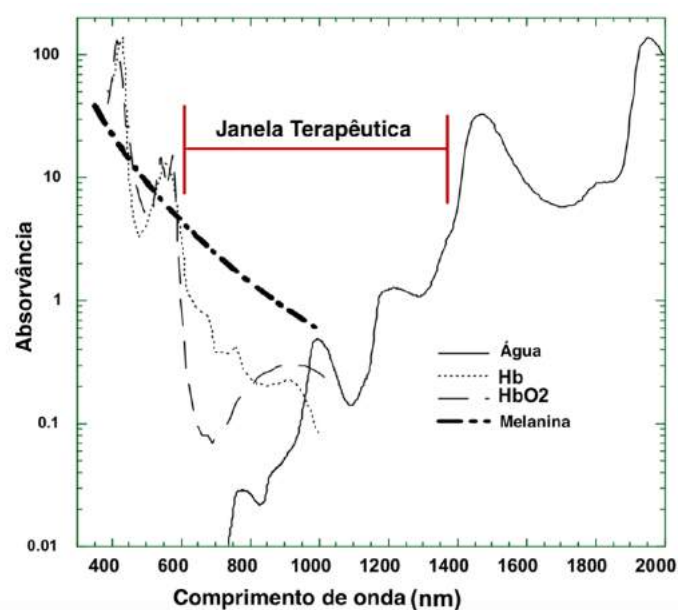


Figura 2.3: Espectro de absorção dos principais constituintes do tecido. Adaptado de [31].

Para além dos efeitos provocados nos tecidos pela variação do comprimento de onda da radiação incidente e das características do tecido, a transferência de energia para os tecidos depende também da Irradiância (I). A Irradiância (ou densidade de potência) expressa a potência (W) fornecida ao meio pelo laser por unidade de área irradiada (cm^2) segundo a equação 2.1 (Watts/ cm^2).

$$I = \frac{P_{laser}}{A} \quad (2.1)$$

A interação da radiação com os tecidos pode ocorrer sob forma de vários mecanismos que variam em função da Irradiância e do tempo total de exposição à radiação. São eles a interação fotoquímica, interação térmica, fotoablação, ablação induzida por plasma e fotodisrupção (Figura 2.5) [33].

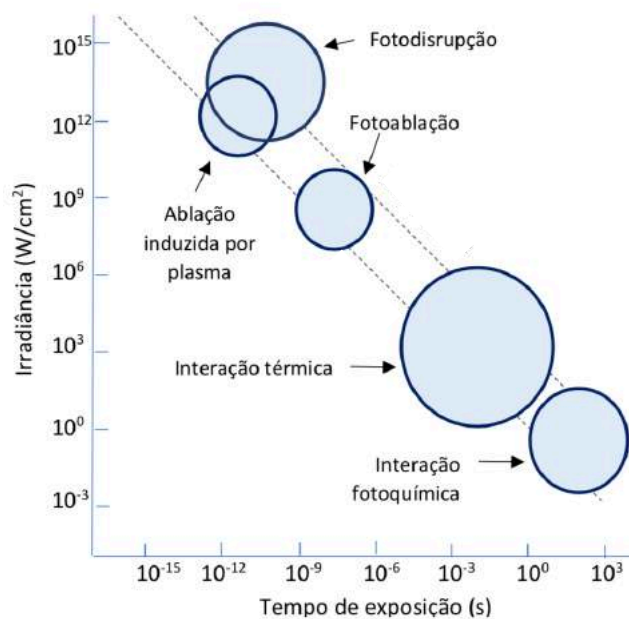


Figura 2.4: Ilustração dos mecanismos da interação entre o feixe LASER e os tecidos biológicos em função da Irradiância e do tempo de exposição. Adaptado de [34].

Interação fotoquímica – ocorre para valores de Irradiância entre (10^{-2} e 100) W/cm^2 com um período de exposição entre (10^1 e 10^3) s. Reflete a capacidade da luz provocar reações químicas nas macromoléculas alterando a sua estrutura com o aumento da temperatura. Devido às baixas potências utilizadas, o tempo de exposição é superior aos restantes mecanismos. **Interação térmica** – Resultam invariavelmente num aumento da temperatura dos tecidos que dependendo do valor de Irradiância aplicado e do tempo de exposição, se pode distinguir nos fenómenos de coagulação, vaporização, carbonização e fusão. **Fotoablação** – ocorre para valores de Irradiação elevados ($10^7 - 10^8$) W/cm^2 aplicados em intervalos de nanossegundos por impulso que provocam decomposição do tecido. Quanto mais elevada a energia da radiação aplicada maior será a profundidade do tecido removido, convergindo para um limite, variando também a geometria consoante o feixe da radiação incidente. Este mecanismo é muito

preciso na medida em que não afeta os tecidos adjacentes aqueles que sofrem irradiação. **Ablação induzida por plasma** – Para pulsos na ordem dos picossegundos de Irradiâncias superiores a 10^{11} W/cm² (em sólidos e fluídos), mediados pelo campo elétrico associado ao feixe, ocorre a ruptura ótica do tecido que se traduz na sua ionização e a formação de um plasma. Este plasma é projetado contra o tecido irradiado originando a sua ablação. **Fotodisrupção** – associado também ao fenómeno de ruptura ótica do tecido tem em conta os efeitos mecânicos das ondas de choque criadas na formação e expansão do plasma. Com valores de Irradiância e tempo de exposição próximos do mecanismo de ablação induzida por plasma, contabiliza-se também a área de tecido desintegrada por forças mecânicas, adjacente à área diretamente irradiada pelo feixe laser [33].

2.3 Sensores de fibra óptica

Atualmente, o uso de sensores baseados em fibras óticas tem sido amplamente explorado devido às suas vantagens: elevada sensibilidade, tamanho compacto, reduzidas perdas de informação na sua transmissão, possibilidade de conduzir elevada energia e insensibilidade a interferências eletromagnéticas. Estes dispositivos podem funcionar como transdutores, medindo alterações no meio (p.e. variação de pressão, pH) que afetam a intensidade, fase e/ou polarização da luz que é transmitida ao longo de toda a fibra [35].

Dependendo do espectro de transmissão que se pretende obter, as fibras óticas são filamentos dielétricos com diâmetro próximo de 125 µm que resultam da conjunção de três elementos concêntricos: núcleo, revestimento e proteção (Figura 2.5) [36].

O núcleo possui uma percentagem de um outro material (p.e. titânio, germânio ou boro) que lhe confere um índice de refração n_n , superior em 1% ao índice do revestimento n_r . Se o ângulo de incidência θ_i da radiação na interface meio-fibra é superior ao ângulo crítico θ_c , dado pela equação 2.2 ocorre **reflexão interna total** da luz e transmissão ao longo da fibra.

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_r}{n_n} \quad (2.2)$$

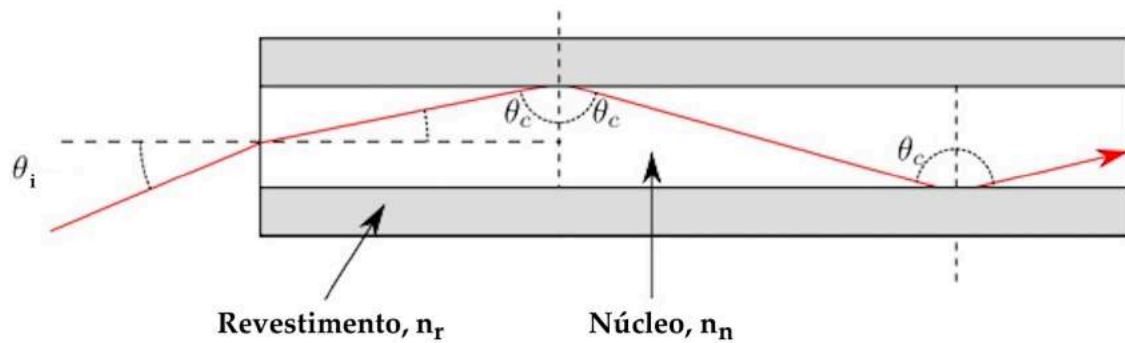


Figura 2.5: Representação do ângulo crítico θ_c , numa fibra ótica onde ocorre reflexão interna total. Constituintes da fibra ótica. Adaptado de [37].

O número de modos de propagação da luz é determinado pelo comprimento de onda da luz tipicamente entre 1.3 e 1.6 μm e pelo diâmetro e índice de refração do núcleo da fibra. Se o raio do núcleo for inferior a cerca de 10 μm a luz propaga-se apenas com um modo, designando-se neste caso por fibra **monomodo**. Por outro lado, será uma fibra **multimodo** se o raio estiver compreendido entre 50 e 100 μm e, conseqüentemente, a propagação decorre de vários modos [34].

2.4 Imagiologia e Termografia de IV

Atualmente as câmaras digitais estão presentes em diversas tecnologias auxiliando a execução de diversas tarefas. A captação de imagens é frequentemente associada à utilização de câmaras digitais típicas presentes no dia a dia moderno como as incluídas nos telemóveis mais recentes. Desde as câmaras mais potentes às mais modestas, o principal elemento na sua constituição é o sensor de imagem cuja função é captar a luz que entra no obturador e transformá-la num sinal elétrico que é processado e no qual são identificados os comprimentos de onda da luz incidente. O sinal é posteriormente codificado em cor e apresentado no ecrã do aparelho representando a imagem. Os dois tipos de sensores mais utilizados atualmente são o CCD (do inglês *Charge Coupled Device*) e o CMOS (do inglês *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). No entanto, devido à eficiência energética e velocidade de resposta superiores, o CMOS tem sido o mais utilizado no mercado [38]. Este tipo de sensores permite a captação de comprimentos de onda na gama do Infravermelho próximo como mostra o gráfico espectral típico destes sensores na Figura 2.6.

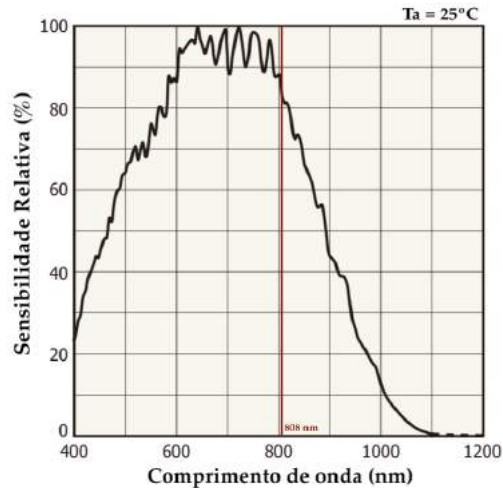


Figura 2.6: Espectro de sensibilidade em função do comprimento de onda, típico para um sensor CMOS à temperatura ambiente de 25°C . O comprimento de onda do feixe laser utilizado é de 808 nm e encontra-se assinalado no espectro com a cor *bordeux*. Adaptado de [39].

A fácil aquisição deste tipo de sensores e a sua sensibilidade para o comprimento de onda considerado neste projeto, demonstram a relevância da utilização deste instrumento ao longo deste projeto.

De igual forma, a termografia de infravermelho (IRT, do inglês *Infrared Thermography*) consiste numa técnica imagiológica e de mapeamento da temperatura superficial [32]. Trata-se de uma abordagem económica e rápida que permite medidas de temperatura em tempo real, não utiliza qualquer tipo de radiação nociva ao ser humano e não inflige dor ao utente. Enquanto método não invasivo e sem necessidade de contacto direto com o corpo é utilizada em várias áreas como a indústria civil, eletrónica, automóvel [40] e em particular a área da medicina [18]. Para tal, recorre a câmaras com detetores de radiação que captam a radiação emitida pelos corpos na gama infravermelha maioritariamente entre 2 e $14\ \mu\text{m}$ [41]. O princípio de funcionamento das câmaras de IV baseia-se no facto de que qualquer corpo com temperatura superior ao zero absoluto ($27\ \text{K}$) emite radiação eletromagnética tipicamente infravermelha com comprimento de onda entre $0,75$ e $1000\ \mu\text{m}$. Pela Lei de Planck, a radiação emitida pelo corpo será função da temperatura absoluta a que este se encontra e do seu comprimento de onda [41].

A câmara converte a radiação infravermelha para a faixa visível através de processos eletrónicos e representa-a num diagrama térmico visível a duas dimensões numa escala de cores fictícia, designado **termograma**. O termograma ilustra visivelmente a distribuição da temperatura na superfície do corpo [40]. Aquando da utilização de uma câmara de IV há alguns aspetos a ter em conta. Nomeadamente, a sensibilidade térmica que indica o valor da menor temperatura detetável pela câmara; a precisão que mostra o quão exata é a medida em relação ao valor real de temperatura do corpo; e a resolução espacial que indica o número de píxeis que a câmara possui e que varia com a distância entre a câmara e o corpo [40]. Desta forma, cenários como condições ambiente não controladas, diferenças significativas entre a

temperatura do corpo em estudo e a temperatura ambiente podem culminar em resultados errôneos. Adicionalmente, o ângulo entre a câmara e a superfície a ser medida provocam alterações significativas na emissividade. Os resultados pioram em ambas as situações se a superfície em estudo apresentar curvatura [19]. O parâmetro mais importante a ter em conta na utilização de uma câmara IV é a emissividade do corpo em estudo que consiste na sua capacidade de emitir radiação infravermelha, sendo a emissividade de um corpo negro à mesma temperatura [41]. Representa-se por um valor entre 0 e 1, sendo que o valor 1 em emissividade é atribuído a um corpo negro. O corpo negro é um conceito teórico que representa um corpo que absorve toda a radiação que nele incide, não permitindo a transmissão ou reflexão de qualquer radiação eletromagnética [41]. A pele humana pode ser considerada um emissor perfeito de radiação infravermelha na medida em que possui emissividade $0,98 \pm 0,01$ para um comprimento de onda entre 2 e 14 μm , assemelhando-se assim a um corpo negro [40],[41],[42].

Desta forma, a informação recolhida com recurso à IRT mostra-se conclusiva apenas para tumores superficiais. Por sua vez, a medida da temperatura superficial é possível devido à distribuição tridimensional típica do calor no interior do tumor subcutâneo comprovada por simulações numéricas e experiências pré-clínicas [19]. A elevada resolução espacial da IRT confere-lhe vantagem sobre os convencionais termómetros e termopares, permitindo medidas à distância e a sua resposta às variações de temperatura é mais rápida [41].

3

3 Estado de Arte

Este capítulo apresenta o estado de arte das ferramentas utilizadas neste estudo bem como de algumas técnicas relevantes para o mesmo. Está dividido em três partes: a primeira descreve os avanços verificados na produção e utilização da radiação laser, salientando-se o seu papel enquanto agente hipertérmico na fototerapia tumoral; a segunda parte realça os principais métodos em investigação para simular e analisar o comportamento da radiação laser nos meios túrbidos, enfatizando a Termografia de Infravermelho; a terceira parte abrange a evolução de vários tipos de sensores de fibra óptica aplicados na metrologia de parâmetros como a temperatura com recurso à radiação laser.

3.1 Radiação Laser

Em 1917, no seu artigo “On Quantum Theory of Radiation” Einstein propôs que um átomo no estado de maior energia transita para um nível inferior a uma taxa proporcional à densidade de radiação do campo em que está imerso e designou este processo de **emissão estimulada**. Mais tarde, em 1953 a equipa de Charles Townes apresentou a primeira experiência utilizando este conceito, dando origem àquele que viria a ser o precursor da radiação laser – o MASER (acrónimo em inglês para *microwave amplification by stimulated emission of radiation*). Após esta descoberta surgiram inúmeros estudos que visavam a criação do “optical maser”, no entanto sem sucesso. Em 1958, Townes e Arthur Schawlow desenvolveram o conceito teórico de laser baseando-se no princípio do Maser, aplicando-o à radiação visível. Em meados de 1960 na Hughes Aircraft Company, Theodore Maiman desenvolveu o primeiro laser completamente funcional que utilizava como meio ativo o cristal de rubi e que gerava um feixe com comprimento de onda na gama do vermelho [43]. No ano de 1964, o cristal de rubi deu lugar ao

primeiro laser a gás Neodímio YAG (ítrio-alumínio-granada), criando-se um dispositivo laser com comprimentos de onda de 1064 nm (infravermelho). Atualmente o dispositivo é utilizado em grande escala na indústria, comunicações, tecnologia aeroespacial e medicina [31].

No ano de 1962, o dermatologista Goldman utilizou um laser de rubi para remover tatuagens utilizando um comprimento de onda na gama de absorção da tinta, tendo sido esta a primeira utilização da radiação laser no ramo da medicina [25]. Goldman continuou os estudos nesta área tendo registado avanços significativos no tratamento do Melanoma [31].

Na atualidade, a radiação laser continua a ser alvo de investigação tendo-se verificado avanços recentes na técnica de laser de pulso muito curto, impulsionando a sua utilização na ortopedia, medicina dentária e neurocirurgia [26].

3.1.1 Radiação laser e Hipertermia na Fototerapia tumoral

O tratamento do cancro com recurso à hipertermia em resultado da aplicação da radiação laser tem sido amplamente investigado. Ao longo dos anos, as terapias térmicas têm recorrido a diversas fontes de calor incluindo a radiação laser, ultrassom focalizado e micro-ondas [44].

A utilização da radiação laser como instrumento cirúrgico para remoção do tumor em detrimento da técnica convencional de ressecção mostra-se menos invasiva, mais simples de desempenhar e com potencial para tratar tumores localizados em zonas vitais onde a cirurgia por ressecção não é possível. No entanto, em casos cuja proporção do tumor é elevada há a necessidade de utilizar radiação mais penetrante, não esquecendo que os danos provocados no tecido saudável localizado entre a fonte e o tumor devem ser mínimos e idealmente inexistentes. Diversos grupos de investigação têm estudado a terapia tumoral com recurso à hipertermia usando lasers emitindo NIR penetrante com e sem agentes marcadores (indocianina verde), mas com reduzido sucesso devido à elevada instabilidade destes agentes na presença da radiação [14],[16],[44],[45]. Uma solução é a produção de radiação incidente com um comprimento de onda pertencente à janela terapêutica do tecido biológico, na qual a absorvância dos constituintes do tecido é reduzida. Adicionalmente, utilizam-se nanopartículas de ouro denominadas nanoshells localizadas junto aos tumores e cujo coeficiente de absorção é elevado para esse mesmo comprimento de onda. O invólucro metálico da nanoshell converte a luz absorvida em calor provocando danos irreversíveis nas células tumorais. Esta técnica designa-se *nanoshell-assisted photo-thermal therapy* (NAPT) [28].

3.1.2 Estimar o comportamento da radiação laser em meios túrbidos

Os estudos publicados remetem maioritariamente para o estudo da hipertermia resultante da interação direta entre a radiação laser e os tecidos biológicos nas zonas irradiadas [16],[18]. Neste sentido e uma vez que o controlo da dose de energia aplicada é imprescindível na utilização de radiação laser *in vivo*, diversas abordagens têm sido empregues de entre as quais saliento a utilização de termopares, termómetros de fibra óptica, imagem por ressonância magnética MRI (do inglês *magnetic resonance imaging*), frequência de ressonância dos prótons PRF (do inglês *proton resonance frequency*), tomografia de impedância, radiometria de micro-ondas, ruído acústico térmico, o ultrassom e a termografia de infravermelho [18].

Enquanto técnicas não invasivas, os métodos de termometria baseados em MRI têm sido bastante explorados, no entanto a sua utilização não é possível na presença de nanopartículas magnéticas devido ao surgimento de artefactos na criação da imagem da zona de interesse [18].

Recentemente, a investigação na área da biofísica tem focado a sua atenção na modelação iterativa da frente de onda do feixe da radiação laser por forma a concentrar a luz no interior do meio túrbido [16] e aumentar a sua penetração no tecido [46]. Aliado à modelação da frente de onda surgem estudos de modelos empíricos que simulam as condições de propagação da radiação nos meios túrbidos. Como principais exemplos existem o modelo da difusão e o modelo de Monte Carlo, sendo estes o *gold standard* dos modelos de luz [14],[45].

As estratégias adotadas para contornar a difusão da luz, resultado da interação dos fotões com os meios biológicos túrbidos, consistem na recolha de informação sobre a luz difundida no meio e na utilização dessa informação para corrigir de forma iterativa a frente de onda do feixe incidente. Esta correção funciona como um *feedback* direto sobre a frente de onda incidente [16].

3.2 Imagiologia e Termografia de Infravermelho

As câmaras digitais tem sido uma ferramenta em evolução em diversas áreas da tecnologia como a medicina dentária no registo do pré e pós-tratamento de imagens intra-orais e extra-orais [47], na dermatologia [48], na microscopia e cirurgia aberta com captação de imagens estereoscópicas em alta resolução [49]. Como mencionado anteriormente, o elemento de interesse para este projeto consiste no sensor de imagem incorporado nas câmaras digitais. No decorrer deste projeto não foram encontrados registos da aplicação dos sensores CMOS a fantasmas ópticos como os utilizados neste projeto com o objetivo de monitorizar a distribuição e comportamento da radiação laser incidente na gama do infravermelho próximo.

As atuais câmaras com sensores de infravermelho características na IRT permitem monitorizar a temperatura superficial de um corpo, constituindo desta forma uma alternativa aos convencionais termómetros. Para além das diversas aplicações na área da indústria como a monitorização da deformação de estruturas civis [50], este método tem mostrado sucesso no ramo da biomédica ao ser aplicado em procedimentos cirúrgicos, como mecanismo complementar no diagnóstico e tratamento do cancro da mama e na deteção de Melanoma [19].

A evolução das câmaras de infravermelho permite atualmente o registo de imagens termográficas de elevada resolução. A tendência ao longo dos anos tem sido a diminuição da dimensão das câmaras e a utilização de lentes de maior capacidade, resultando em maior número de píxeis e conseqüentemente maior precisão na leitura [32].

Os primeiros registos de termogramas, datam de 1800 e foram concretizados por Jonh Herschel após o seu pai William Herschel ter descoberto a radiação infravermelha [42]. Em seguida, no ano de 1928 em Frankfurt, Czerny registou o primeiro termograma humano [51].

Por sua vez, os convencionais termómetros começaram a ser construídos ainda no século XVII e tiveram por base o termoscópio que Galileu desenvolveu em meados de 1595. Dois séculos depois, em 1868, foram usados por Carl Wunderlich como ferramenta dos seus estudos nos quais comparava as temperaturas de sujeitos saudáveis e febris, instituindo já nessa época a temperatura como indicador científico de doença [42].

Seguidamente, no ano de 1934, surgiram os primeiros avanços na utilização da IRT como meio complementar de diagnóstico quando Hardy apresentou a premissa de que a pele humana poderia ser considerada um corpo negro emissor de radiação infravermelha. O primeiro aparelho detetor moderno de radiação infravermelha remonta ao ano de 1939, construído para fins militares na deteção de Sulfeto de Chumbo durante a II Guerra Mundial e foi posteriormente alargada a sua utilização aos civis. Nesta época, a falta de conhecimento técnico e de equipamento de qualidade não permitiram a sua utilização efetiva na área medicina até ao ano de 1960 [42].

A termografia deu os seus primeiros passos na área da medicina no ano de 1952 na Alemanha, quando Schwamm e Reeh construíram um detetor bolómetro de infravermelho para medir a temperatura superficial do corpo humano com fins diagnósticos. Em 1954, Winsor apresentou o termístor também com o propósito de medir temperatura em ambiente clínico [52].

Por sua vez, em 1956 Lawson registou pela primeira vez a temperatura da pele superficial de uma mama que cobria tecido cancerígeno. No ano de 1959, Astheimer e Wormser apresentaram a primeira câmara de infravermelho que integrava um espelho digitalizador, um termístor e um elevador rotativo [51].

Posteriormente aos seus estudos, Lawson apresentou o termógrafo remoto juntamente com Chugtay, em 1963 [51].

A IRT veio assumir um papel de elevado relevo na detecção do cancro sendo que em 1982 foi aprovado pela FDA (*Food and Drug Administration*) como ferramenta complementar para o diagnóstico particular do cancro da mama [19]. Contudo, estudos já haviam sido publicados sobre a importância da técnica para a detecção do cancro nos anos de 1969 e 1974 [51].

3.3 Sensores de fibra óptica e Radiação Laser na Hipertermia

Para além de ser utilizada como instrumento cirúrgico, a radiação laser é também parte integrante de ferramentas de medição da variação de temperatura e do índice de refração como os sensores de fibra óptica [53].

Nas últimas décadas, a investigação na área das fibras óticas tem explorado as características ideais das fibras, procurando aprimorar a sensibilidade dos instrumentos construídos com base nestas. Como exemplo destes instrumentos existem os sensores com configuração de redes de Bragg (FBG, do inglês *Fiber Bragg Grating*), de redes de período longo (LPFG, do inglês *Long Period Fiber Gratings*), de redes de Bragg inclinadas, de interferómetro modal [54] e de interferómetro de Fabry-Perot [53]. A configuração e a evoluções destes sensores utilizando revestimentos e o efeito de ressonância de plasmão de superfície (SPR, do inglês *Surface Plasmon Resonance*) têm sido amplamente investigadas nos últimos anos por forma potenciar o desempenho dos mesmos [53].

Os estudos nesta área têm evoluído com o objetivo de eliminar a comum sensibilidade cruzada verificada neste tipo de sensores, na qual diversos fatores como a humidade, índice de refração e temperatura podem alterar simultaneamente (ou não) a leitura do sensor [54].

Em particular, para os sensores LPFG os valores de sensibilidade apresentados na literatura encontram-se no intervalo (0,05 - 0,3) nm/°C. Adicionalmente, para intervalos de temperatura superiores, os valores de sensibilidade aumentam para 0,054 nm/°C no caso de temperaturas próximas de 200°C, e aumentam para 0,135 nm/°C no caso de temperaturas entre 200°C e 1000°C [29]. Estes sensores assemelham-se aos típicos sensores FBGs no que respeita ao funcionamento e mostram-se uma potencial ferramenta para aplicações que requerem dimensões mínimas ou na avaliação de estruturas na área da engenharia civil. O aprimorar da sensibilidade deste tipo de fibras poderá passar pela deposição de nanopartículas e pela utilização das LPFGs para formar sensores mais complexos como LPFGs concatenadas. A maioria dos sensores do tipo LPFGs são fabricados com períodos em intervalos de centenas de micrómetros a milímetros e comprimentos entre (25 - 40) mm [29].

No ano de 2011, Jun Ma et. al apresentou um sensor fabricado com recurso a uma máquina de fusão que permite alterar a interface fibra-meio. A sua configuração inclui arcos elétricos na extremidade da fibra óptica formando uma cavidade de ar, constituindo assim um interferómetro de Fabry-Perot de três ondas. O sensor apresentou uma sensibilidade de $2,1 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ com o estudo do deslocamento em unidades de comprimento de onda das bandas de interferência do espectro de luz refletida [34].

Recentemente, foi proposto o desenvolvimento de um sensor cujo princípio de funcionamento se baseia na configuração do interferómetro de Fabry-Perot com uma extremidade oca na terminação da fibra óptica monomodo. A ponta sensora é revestida por um filme fino de óxido de Grafeno e outros polieletrólitos – hidrocloreto de polialilamina (PAH) e polietilenoimina (PEI) produzido pela técnica camada por camada (LbL, do inglês *Layer by Layer*). Para o intervalo de temperatura entre 25°C e 57°C , o sensor revelou uma sensibilidade de $1.7 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ [34].

Os diferentes tipos de fibra óptica existentes atualmente no mercado e a investigação desenvolvida em torno destes tem permitido um avanço considerável na tecnologia dos sensores. Diversas combinações de diferentes tipos de fibra óptica e até alterações da estrutura e índice das fibras têm sido testadas, culminando num aumento da sensibilidade dos sensores construídos [55].

A conjugação de fibras ópticas do tipo modo único com multimodo de diferentes comprimentos no mesmo sensor têm alcançado bons resultados e sensibilidades às variações de temperatura tão elevadas como $6,5 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ no intervalo de 51°C a 65°C [53],[55]. Esta configuração de sensores é mais fácil de confeccionar que os Sensores FBG pois requerem apenas o corte e junção das fibras, processos estes disponíveis em qualquer laboratório de óptica que opere com fibras ópticas [55].

4

4 Materiais e Metodologias Experimentais

Este capítulo apresenta todos os materiais utilizados ao longo do projeto bem como os objetivos da sua utilização e o método de construção, quando aplicável. Adicionalmente, explicita-se os métodos de aplicação dos diferentes materiais nas experiências realizadas ao longo do projeto com recurso aos diversos fantasmas ópticos construídos.

4.1 Laser

O laser utilizado em todo o projeto provém do condutor de laser díodo LaserPak Série 485 da Arroyo Instrumentals, no modelo 485-08-05. O laser é constituído por um díodo emissor de luz GaAs – Arsenieto de Gálio na gama do Infravermelho com 808 nm de comprimento de onda, é de baixa potência e opera no modo contínuo. Para este regime de operação, a potência mantém-se constante ao longo do tempo. O feixe laser possui um diâmetro de $(8 \pm 0,5)$ mm. A curva de calibração do laser em utilização ao longo do estudo foi construída com recurso a um bolómetro e os resultados obtidos bem como a ficha técnica do laser encontram-se no Anexo 1.

4.2 Corpo absorvedor

Tendo em conta o objetivo deste projeto e ambicionando a aproximação dos estudos efetuados a uma aplicação real *in vivo*, foram utilizados dois tipos de corpos absorvedores incorporados no fantoma de gel cujo objetivo é simular um conjunto de células tumorais e provocar uma deposição de energia localizada no interior do fantoma. Os dois tipos de corpos absorvedores utilizados foram a Tinta da China e uma esfera absorvedora construída com pasta de modelar. A cor preta dos absorvedores permite aproximá-los a dois corpos negros, na medida em que se assume que estes absorvem toda a radiação que

neles incide, independentemente do comprimento de onda, direção de incidência ou polarização da mesma e conseqüentemente nenhuma parte da radiação é refletida ou transmitida [56].

A Tinta da China utilizada é da marca vallejo® de cor preta e modelo opaco. Possui as mesmas características que a esfera absorvedora na medida em que é preta, constituindo assim um corpo absorvedor. Tal como a esfera, a Tinta da China permite a sua introdução localizada num determinado ponto do fantoma. Contrariamente ao método de incorporação da esfera absorvedora, a Tinta da China é introduzida no fantoma com recurso a uma seringa, quando este se encontra já no estado sólido. No entanto, a Tinta da China encontra-se no estado líquido e a sua incorporação no fantoma gera problemas no controlo do seu formato final (ver Figura 4.2).

A esfera absorvedora consiste numa esfera construída manualmente com pasta de modelar Fimo da marca Staedtler®, modelo Soft e cor preta opaca. À temperatura ambiente, a pasta assemelha-se à plasticina, mas o seu cozimento no forno durante 30 min à temperatura de 110°C, permite a total solidificação das peças construídas. Ao longo do projeto são construídas várias esferas com diferentes diâmetros desde (1 a $1,75 \pm 0,05$) cm (ver Figura 4.1 (a)). Adicionalmente, uma segunda versão da esfera absorvedora foi construída contendo um orifício. O orifício possui em todas as esferas um diâmetro aproximado de 3 mm e foi construído com o objetivo de introduzir o Termopar no interior do absorvedor por forma a monitorizar a temperatura nesse local (ver Figura 4.1b)).

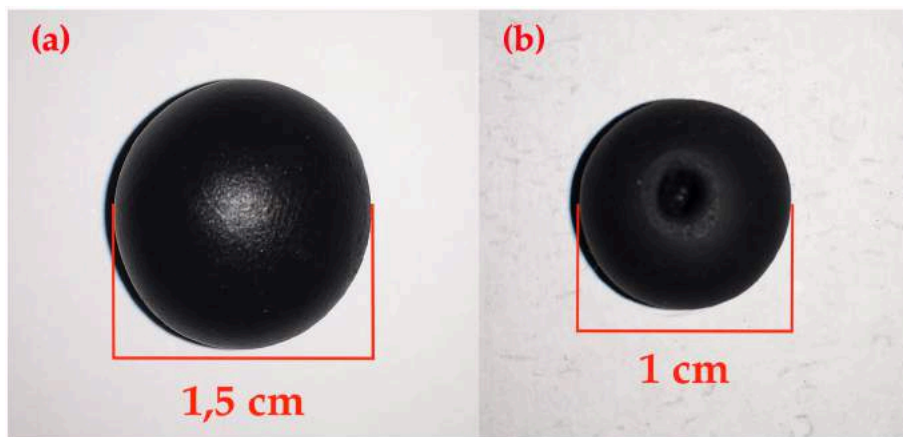


Figura 4.1: Imagem das duas versões de esferas absorvedoras construídas. A imagem (a) mostra a primeira versão da esfera absorvedora e a imagem (b) a segunda versão que inclui o orifício de 3 mm, no centro da esfera.

Constatou-se que a esfera absorvedora originava os melhores resultados no que toca à sua introdução no fantoma e por esta razão a Tinta da China não foi utilizada em mais nenhum fantoma para além do primeiro a ser construído que foi o fantoma A.

Por forma a aferir a resistência da esfera absorvedora à irradiação com o feixe laser a diferentes potências foi realizado um estudo no qual a esfera absorvedora é irradiada com o feixe laser a diferentes potências e se observa o comportamento da mesma, monitorizando a temperatura superficial no local

de incidência do feixe laser com recurso ao Termómetro de IV. Os resultados obtidos bem como a discussão dos mesmos são apresentados no Anexo 2.

4.3 Fantoma

A utilização de um fantoma de gel no projeto apresentado tem como finalidade simular as propriedades dos tecidos biológicos quando estes se encontram sob irradiação laser. Os tecidos biológicos constituem meios túrbidos que se caracterizam por serem meios não homogêneos e nos quais a luz incidente não se propaga em linha reta nem a velocidade constante. Adicionalmente, a elevada concentração de partículas indutoras de inhomogeneidades aleatórias nestes meios, provoca a difusão da luz que neles se propaga [57]. Os fantasmas de gel são utilizados em particular nos estudos de reações térmicas em técnicas de Termologia com recurso à radiação laser [58].

Os fantasmas de gel são produzidos através do pó de Ágar-ágar que consiste num carboidrato. Na sua forma em gel, o Ágar-ágar demonstra fenómenos de sinerese (extrusão espontânea de água através da superfície do gel em repouso) e histerese (intervalo de temperatura entre as temperaturas de fusão e gelificação). A gelificação ocorre a temperaturas muito abaixo da temperatura de fusão. Uma solução de 1,5% de Ágar-ágar forma um gel a temperaturas entre 32°C e 45°C e a fusão do mesmo não ocorre até serem atingidas temperaturas superiores a 85°C. O gel de Ágar-ágar diminui a sua estabilidade com o aumento da temperatura e com a diminuição do pH [59].

Como referido anteriormente, a difusão da luz incidente nos tecidos biológicos constitui o principal obstáculo à utilização eficiente da radiação laser em profundidade nestes tecidos. Assim, por forma a simular a turbidez característica dos meios biológicos que é responsável por esta difusão, foram construídos fantasmas com diferentes coeficientes de difusão. Tal é conseguido com a utilização de diferentes concentrações de Intralípidos SMOF na constituição do fantoma.

Ao longo do estudo denominar-se-á fantoma ao conjunto fantoma de gel + absorvedor incorporado.

Posto isto, todos os diferentes fantasmas construídos neste projeto providenciam um meio que permite avaliar a propagação e distribuição térmica da radiação laser incidente em meios túrbidos distintos.

O fantoma de gel consiste numa mistura heterogênea de Ágar-ágar com água que solidifica à temperatura ambiente e adquire o estado físico semelhante ao do gel. O processo de construção é aproximadamente igual em todos os exemplares de fantoma construídos, diferindo consoante as concentrações dos compostos utilizados e o formato de fantoma pretendido. As dimensões apresentadas para todos os fantasmas construídos possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. Abaixo são apresentadas as etapas de construção do fantoma adotadas neste projeto. Adaptado de [60].

1. Misturar o pó de Ágar-ágar com água destilada nas quantidades desejadas, mexer bem para dissolver o pó na água;
2. Levar a solução ao micro-ondas a uma potência média até esta atingir o ponto de ebulição. Nesse momento, cronometrar 2 minutos de fervura e depois retirar a solução do micro-ondas;
3. Aguardar que a temperatura diminuía até aos 50°C. Durante este passo é importante mexer a solução continuamente para evitar que a solidificação se inicie;
4. Adicionar a concentração pretendida do segundo composto. Verter a solução no molde escolhido. Aguardar um total de 4 horas para garantir a total solidificação do fantoma.

Os passos 3 e 4 só se aplicam aos fantomas a que é adicionado um segundo composto, que no caso deste projeto são os Intralípidos.

Por forma a aferir a resistência do fantoma de concentração 0,4% em Ágar-ágar à irradiação com o feixe laser a diferentes potências foi realizado um estudo no qual o fantoma é irradiado com o feixe laser a diferentes potências e comportamento do mesmo é observado, monitorizando-se a temperatura superficial no local de incidência do feixe laser com recurso ao Termómetro de IV. Os resultados obtidos bem como a discussão dos mesmo são apresentados no Anexo 3.

4.3.1 Fantoma A

Para construir o fantoma A apresentado na Figura 4.2 a), o passo seguinte ao ponto 2 apresentado será verter o líquido no molde com as dimensões apresentadas e aguardar 4 horas com o fantoma em repouso à temperatura ambiente. Como mostra a Figura 4.2, o fantoma possui o formato de um paralelepípedo com 14 cm de comprimento, 7,5 cm de altura e 2,5 cm de espessura. O fantoma apresentado assumirá a designação A.1 e possui uma concentração de 0,4% em Ágar-ágar.

Foi construída uma segunda versão deste fantoma com a mesma concentração em Ágar-ágar, na qual se introduziu uma porção de Tinta da China com o auxílio de uma seringa, após o fantoma ter solidificado por completo. Como é visível na Figura 4.2 b), a porção de Tinta da China adquire o formato aproximado de um paralelepípedo com 1 cm de altura, 3 cm de largura e 2,5 cm de espessura. O centro da porção de Tinta da China localiza-se a cerca de 2 cm de distância da superfície do fantoma na qual incide o feixe laser. Esta versão do fantoma designar-se-á fantoma A.2.

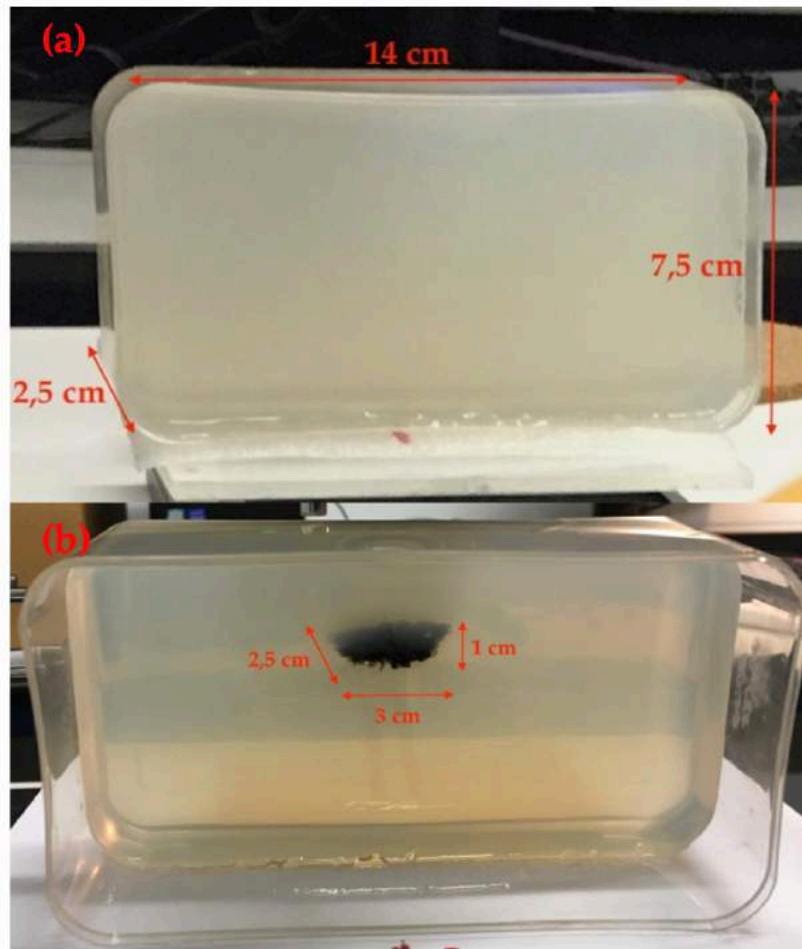


Figura 4.2: Imagem dos dois fantasmas de concentração 0,4% em Ágar-ágar construídos com recurso ao molde com o formato de um paralelepípedo com 14 cm de comprimento, 7,5 cm de altura e 2,5 cm de espessura. A imagem (a) apresenta o fantoma A.1. e a imagem (b) ilustra versão A.2 do fantoma, na qual se injeta a porção de Tinta da China. Esta adquire o formato aproximado de um paralelepípedo com 1 cm de altura, 3 cm de comprimento e 2,5 cm de espessura.

4.3.2 Fantoma B

Um outro fantoma foi construído com base nos passos anteriormente apresentados, variando-se o formato do molde utilizado para dar forma ao fantoma (ver Figura 4.3 a)). Neste caso, o molde é um cilindro com 3 cm de altura e 10,5 cm de diâmetro em ambas as faces circulares. A concentração de Ágar-ágar mantém-se constante em 0,4% e o fantoma designar-se-á B.1. Foi construída uma segunda versão deste fantoma, denominada B.2, à qual se adicionou duas esferas absorvedoras com 1 cm de diâmetro cada (ver Figura 4.3 b)). Para esta segunda versão, as esferas absorvedoras possuem o seu centro localizado a diferentes distâncias da superfície lateral do fantoma, sendo uma das distâncias de 1,5 cm e a outra de 3 cm.

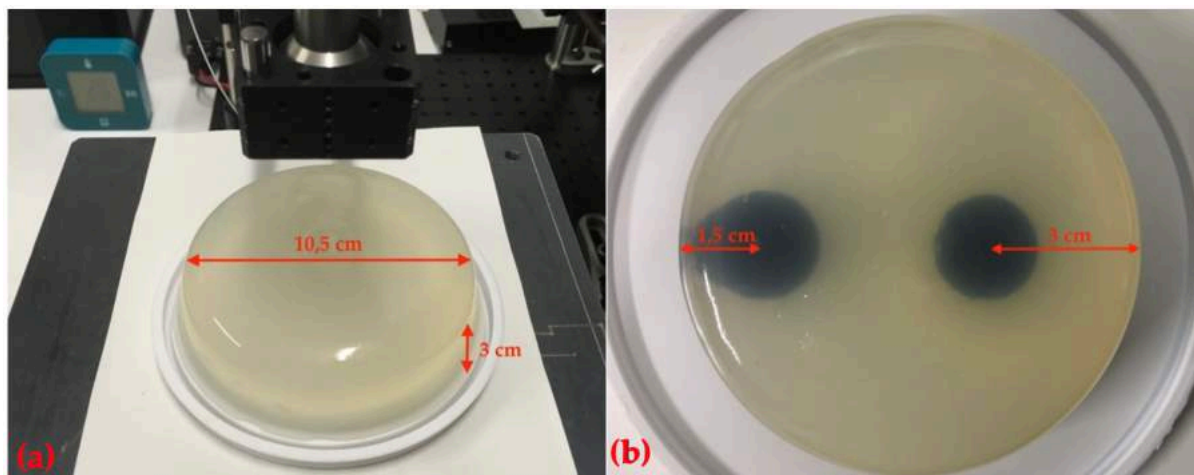


Figura 4.3: Na imagem (a) são apresentadas as dimensões de ambos os fantasmas B.1 e B.2 que corresponde ao formato de um cilindro com 3 cm de altura e 10,5 cm de diâmetro nas faces circulares. A imagem (b) apresenta o fantoma B.2 e inclui as duas esferas absorvedoras cujos centros se encontram às distâncias de 1,5 cm e 3 cm da superfície lateral do fantoma.

4.3.3 Fantoma C

Para a construção do fantoma C utiliza-se um molde também com o formato de um cilindro, mas com diferentes dimensões das escolhidas para o fantoma B. Na construção do fantoma C, o molde possui 5,8 cm de diâmetro para as faces circulares e uma altura de 2,5 cm (ver Figura 4.4).

Com base neste fantoma são construídas duas versões distintas C.1 e C.2 nas quais o absorvedor com 1 cm de diâmetro é incorporado aproximadamente no centro do fantoma próximo da face circular inferior do mesmo. Para o fantoma C.1 (ver Figura 4.4 (a)), o único absorvedor incorporado é posicionado em diferentes pontos no centro do fantoma consoante a espessura de fantoma que se pretende entre a superfície do absorvedor e a superfície do fantoma. Criam-se assim três versões para o fantoma C.1. denominadas C.1.a, C.1.b e C.1.c consoante a espessura em fantoma é de 1, 5 e 10 mm. Por sua vez, no fantoma C.2 (ver figura 4.4 (b)) o absorvedor é imobilizado no centro do fantoma e este último é seccionado em diferentes partes por forma a obter as espessuras em fantoma pretendidas. Assim, o fantoma C.2 possui também três versões diferentes denominadas C.2.a, C.2.b e C.2.c consoante a espessura definida para a espessura em fantoma seja 1, 5 e 10 mm.

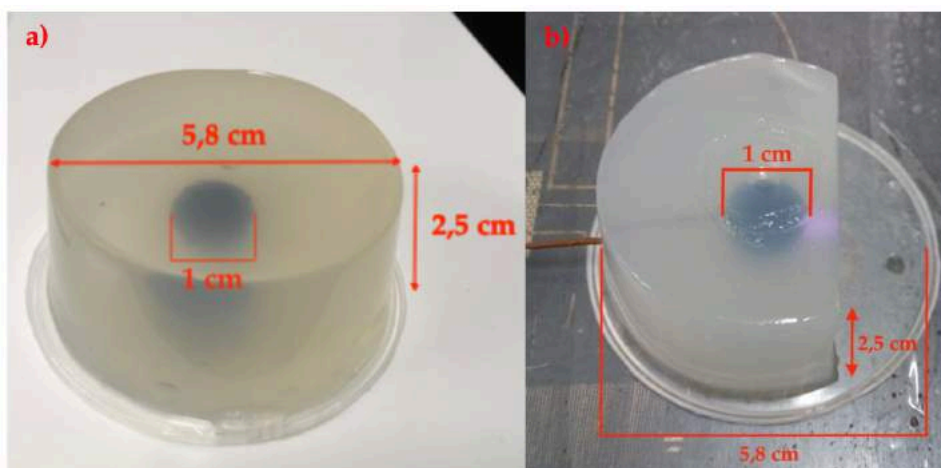


Figura 4.4: Imagens esquemáticas das dimensões das duas versões do fantoma C construídas. A imagem (a) corresponde ao fantoma C.1 para a espessura de 10 mm. A imagem (b) corresponde ao fantoma C.2 com a espessura em fantoma de 10 mm. No lado direito da imagem vemos o feixe laser com uma potência de 0,76 W a incidir lateralmente no fantoma e no lado oposto, o Termopar a atravessar o fantoma e entrar no interior do absorvedor.

4.3.4 Fantoma D

Para a construção do fantoma D utiliza-se um molde em forma de cubo com 64 cm³ de volume apresentado na Figura 4.5 (a). Com base no fantoma D são construídas três versões de fantoma às quais são adicionadas diferentes doses de Intralípidos após o passo 3 de construção do fantoma apresentado em 4.3. Todas as versões deste fantoma possuem incorporada uma esfera absorvedora com 1,6 cm de diâmetro que é suspensa no fantoma junto à superfície do mesmo com a ajuda de uma linha.

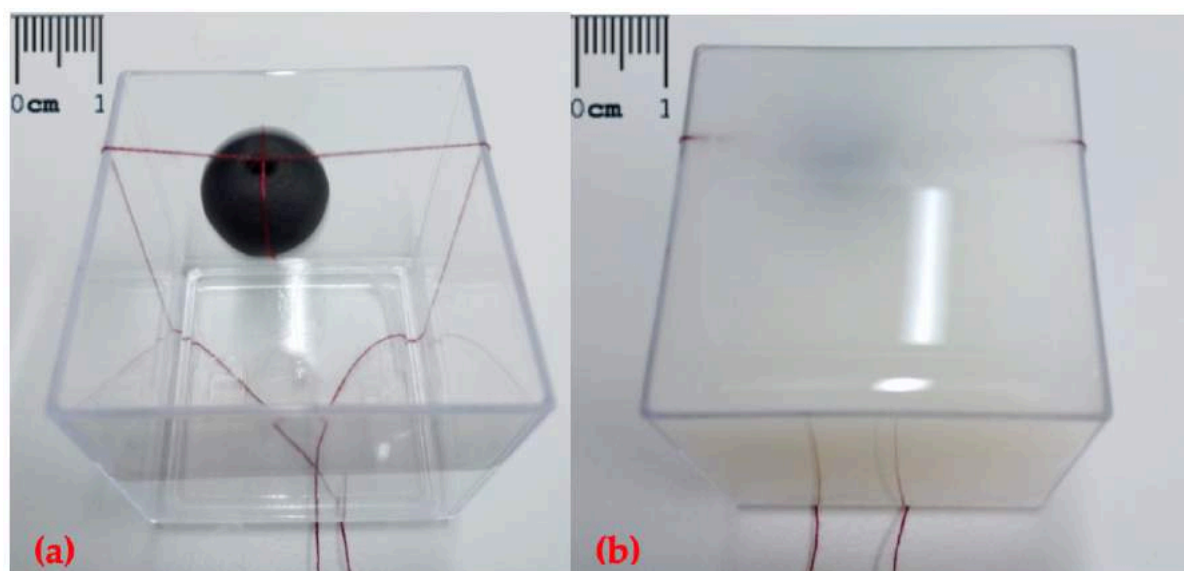


Figura 4.5: Imagens da vista superior do molde (a) e do fantoma D pronto para o repouso (b). Na imagem (a) vemos o absorvedor suspenso por uma linha no molde utilizado para a construção de todas as versões do fantoma D.

A esfera absorvedora está na mesma posição para todas as versões de fantoma. A concentração em Ágar-ágar de todas as versões do fantoma D é mantida constante em 1% fazendo-se variar apenas a concentração em Intralípidos. As dimensões escolhidas para as distâncias da superfície lateral do absorvedor à superfície lateral do fantoma são apresentadas na Figura 4.6.

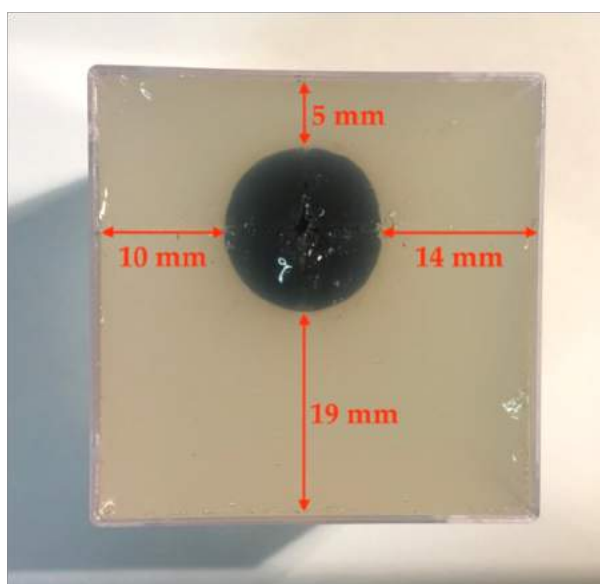


Figura 4.6: Vista superior do fantoma D.1 com a esfera absorvedora incorporada com 1,6 cm de diâmetro. As diferentes distâncias da superfície lateral do absorvedor às superfícies laterais do fantoma são assinaladas. Na imagem é visível o orifício construído na esfera absorvedora para introduzir o Termopar no centro do absorvedor.

As diferentes versões do fantoma D são apresentadas na Figura 4.7 e possuem concentrações em Intralípidos de 0%, 1%, 2% e 3% respetivamente.

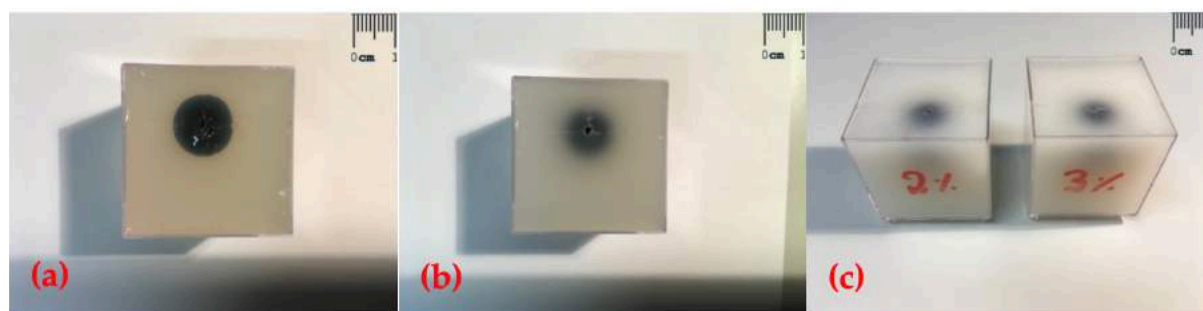


Figura 4.7: A imagem mostra as quatro versões do fantoma D de diferentes concentrações em Intralípidos: 0% (a), 1% (b), 2% e 3% (c).

Como referido anteriormente, a adição de Intralípidos ao fantoma permite variar o coeficiente de difusão final do mesmo. O estudo da propagação do feixe laser em fantasmas com coeficientes de difusão distintos visa mais uma vez aproximar o estudo realizado neste projeto a uma aplicação *in vivo*, simulando-se os diferentes coeficientes de difusão presentes nos tecidos biológicos humanos que dependem de aspetos tão diversos como a oxigenação microvascular do tecido ou a idade do indivíduo [15],[61]. A escolha das concentrações em Intralípidos a colocar nas diferentes versões do fantoma D foi baseada no estudo apresentado em [60]. Com base na equação 4.1 apresentada pelo estudo que mostra a variação do coeficiente reduzido de difusão em função da concentração de Intralípidos e nas concentrações de Intralípidos definidas no presente estudo, foram construídos fantasmas com os coeficientes reduzidos de difusão de $8,15 \text{ cm}^{-1}$, $9,19 \text{ cm}^{-1}$ e $9,79 \text{ cm}^{-1}$ para as concentrações respetivas de 1%, 2% e 3% em Intralípidos.

$$y = 1,48\ln(x) + 8,16 \quad (4.1)$$

A equação mencionada considera uma concentração fixa de 1% em Ágar-ágar.

4.4 Termómetro de Infravermelho

O Termómetro de IV utilizado neste estudo consiste no Termómetro Visual de Infravermelhos da marca FLUKE® e modelo VT02. Este instrumento é empregue neste estudo como ferramenta de metrologia da temperatura num dado local do fantoma e também como meio de registo imagiológico do feixe laser. Os resultados numéricos obtidos com recurso a este instrumento apresentam uma incerteza de 0,1°C. O Termómetro de IV capta a radiação infravermelha emitida pelo corpo e constrói uma imagem eletrónica que mostra a temperatura aparente da superfície do corpo a ser medido. No interior do Termómetro encontra-se um dispositivo que foca a radiação captada no sensor que por sua vez, consiste numa matriz de pixéis detetores (ver Figura 4.8). Cada um desses pixéis produz um sinal elétrico proveniente da sua interação com a radiação. O processador recebe o sinal de cada um dos pixéis e aplicando um cálculo matemático, cria um mapa de cores representativo da temperatura aparente do corpo. A cada valor de temperatura é associada uma cor diferente que irá integrar uma matriz. A matriz de cores resultante é depois enviada para a memória e para o ecrã do Termómetro em forma de imagem térmica do objeto em estudo.

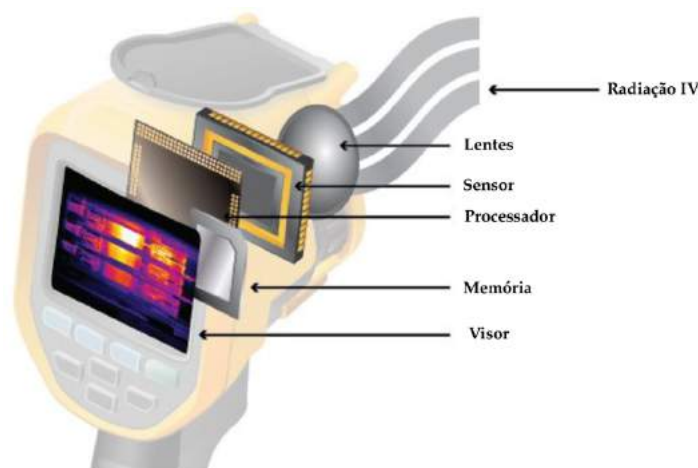


Figura 4.8: Esquema representativo dos principais componentes encontrados no interior do Termómetro de Infravermelho FLUKE VT02. Adaptado de [62].

O Termómetro utilizado neste projeto possui ainda um sensor de luz visível que deteta uma imagem digital cada vez que o utilizador faz a captura de imagem. Assim, o Termómetro combina as duas imagens, alinhando a informação proveniente dos mesmos pixéis nos diferentes sensores e envia o resultado para o ecrã, permitindo uma melhor perceção e correlação das áreas em estudo. O Termómetro

permite ainda definir a percentagem de mistura das duas imagens visível e infravermelha desde imagem visível completa até imagem de infravermelho completa, em unidades de 25%.

A ficha técnica do Termómetro de IV utilizado no estudo encontra-se no Anexo 4.

4.5 Câmara de telemóvel

A câmara principal do telemóvel de marca Wiko e modelo PULP é utilizado com meio de registo de imagens de todas as experiências realizadas ao longo do projeto. Adicionalmente, esta câmara serve como métodos de captação imagiológico da propagação do feixe laser no interior do fantoma. A câmara mencionada possui uma abertura focal de $f/2,2$, distância focal de 3,5 mm e é composta por um sensor CMOS (do inglês *complementary metal-oxide-semiconductor*). A aplicação utilizada pelo telemóvel para gerar as imagens e as apresentar no ecrã do mesmo é a MediaTek Camera. Não foi possível obter informação adicional sobre a câmara do telemóvel nem sobre esta aplicação, como por exemplo o tipo de filtros que são posteriormente aplicados à imagem captada ou o espectro de sensibilidade do sensor. Como será mostrado mais à frente, a difusão provocada pela interação do feixe laser com os diferentes fantasmas é visível nas imagens captadas com a câmara do telemóvel utilizada.

4.6 Câmara USB

Neste projeto, foi também utilizada uma câmara AVT GUPPY no modelo F-036 B cujo sensor é um CMOS MT9V022 e uma lente COSMICAR com 25 mm de distância focal. As imagens recolhidas foram visualizadas com o *software Allied Vision*. O anexo 6 reúne as principais especificações desta câmara.

Esta câmara foi utilizada como meio de registo do comportamento do feixe laser ao interagir com o fantoma ao longo do projeto. No entanto, o estudo desta interação com recurso à câmara só foi abordado para o fantoma D.

Na figura 4.9 encontra-se o *setup* experimental utilizado para a captação das imagens das diversas versões do fantoma D com o laser incidente. A lente da câmara localiza-se a 4 cm da superfície do fantoma.

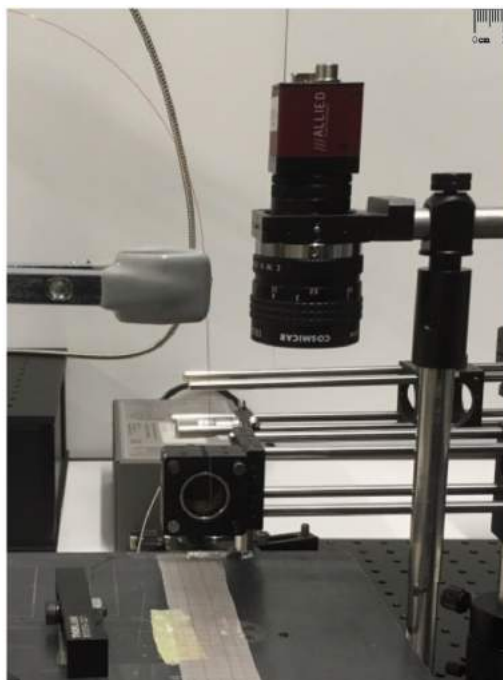


Figura 4.9: Imagem do *setup* experimental construído para captação de imagens da propagação do feixe laser no interior de alguns dos diferentes fantasmas utilizados ao longo do projeto. Neste *setup* em específico, o fantoma é colocado sobre a régua milimétrica (no centro inferior da imagem) e o laser incide lateralmente numa das suas superfícies. A lente da câmara encontra-se a 4 cm de distância da superfície dos fantasmas estudados.

Como podemos constatar pela imagem, a câmara USB capta a vista superior do fantoma, permitindo assim uma imagem completa da propagação do feixe laser no interior do fantoma. Na extremidade da lente, foi colocado um filtro passa-alto da marca THORLABS e o modelo FEL0550. O gráfico da Figura 4.10 representa o espetro de transmissão para o filtro utilizado em função do comprimento de onda. A região de transmissão do filtro utilizado é de 550-2200 nm.

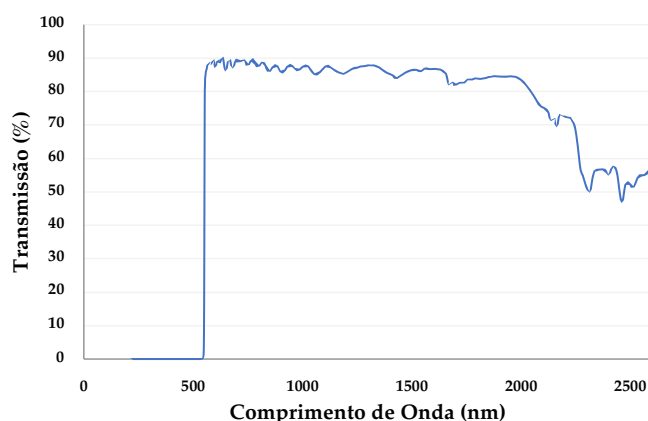


Figura 4.10: Espetro de transmissão do filtro passa-alto FEL0550. O comprimento de onda de corte é de 550 nm. Adaptado de [62].

4.7 Termómetro Termopar

O termómetro Termopar utilizado é da marca FLUKE Série 52 e é constituído por uma extremidade sensora e um fio metálico isolado que une a extremidade ao aparelho transformador do sinal. A Figura 4.11 a) mostra o Termopar em utilização numa das experiências dirigidas com o fantoma D.4.

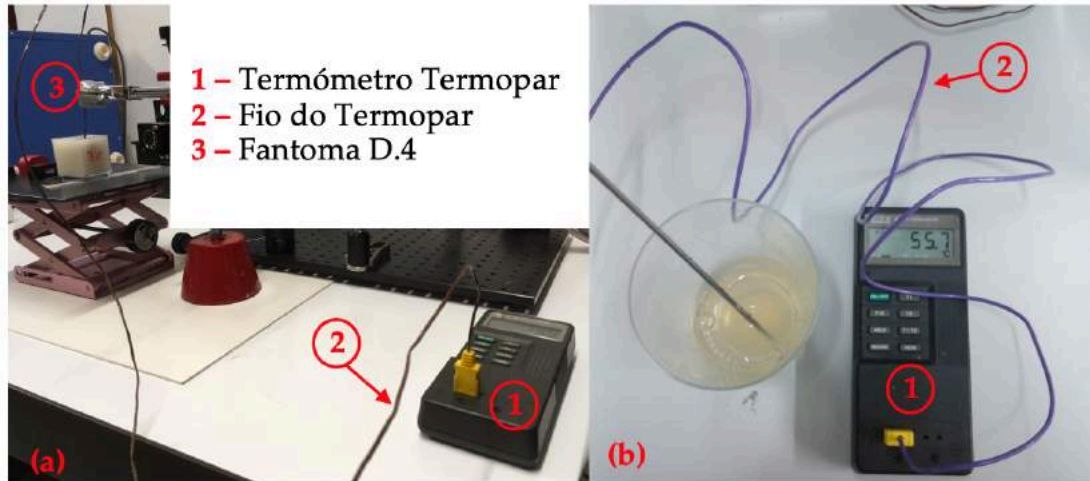


Figura 4.11: A imagem (a) apresenta o *setup* experimental com o termómetro Termopar (1) em utilização visível no canto inferior direito da imagem. Por sua vez, a ponta sensora (2) do Termopar está introduzida no interior do absorvedor que se encontra dentro do fantoma D.4 (3), visível no canto superior. A imagem (b) mostra o Termopar (1) com uma segunda ponta sensora (2) utilizada para monitorizar a preparação de um dos fantasmas.

Em todas as experiências dirigidas ao longo deste projeto, a ponta sensora do Termopar é introduzida no interior da esfera absorvedora, num orifício previamente construído para o efeito e permite medir a temperatura no seu interior ao longo do tempo. Os resultados obtidos com o Termopar possuem uma incerteza de leitura associada de $0,1^{\circ}\text{C}$. No Anexo 5 foram reunidas as especificações técnicas do termómetro Termopar utilizado.

4.8 Sensores de fibra óptica

Na fase final deste projeto, foi ainda estudada a utilização de sensores de fibra óptica como meio de monitorização da temperatura no interior do absorvedor e do fantoma. O sensor de fibra óptica escolhido foi colocado no orifício da esfera absorvedora e diretamente na espessura de fantoma irradiada pelo do feixe laser (ver Figura 4.12).

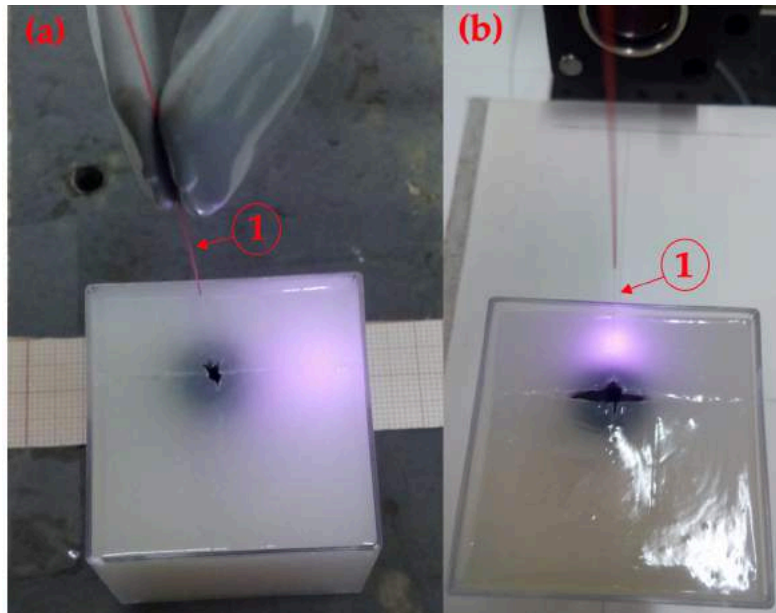


Figura 4.12: Imagens do fantoma D com a ponta sensora (1) do sensor de fibra óptica introduzido no interior do absorvedor (a) e na espessura de fantoma (b) irradiada pelo feixe laser.

A aplicação dos sensores de fibra óptica nas experiências realizadas sobre o fantoma D processa-se de três formas distintas, no entanto, estes são sempre utilizados como forma de monitorizar a evolução da temperatura no interior do absorvedor e na espessura de fantoma atravessada pelo feixe laser. Na primeira fase, o sensor é introduzido diretamente no orifício do absorvedor ou na espessura de fantoma irradiada pelo feixe laser. Nesta fase, quando no interior do absorvedor, a utilização dos sensores de fibra óptica é conduzida de forma semelhante à utilização do Termopar, uma vez que ambos os instrumentos são introduzidos no interior do absorvedor. No entanto, os resultados retornados pelos sensores de fibra óptica são obtidos em variação de temperatura e os resultados do Termopar em valores absolutos. Numa segunda fase, as diferentes versões do fantoma D são construídas com o sensor já embutido na posição final desejada para o mesmo (ver Figura 4.13).

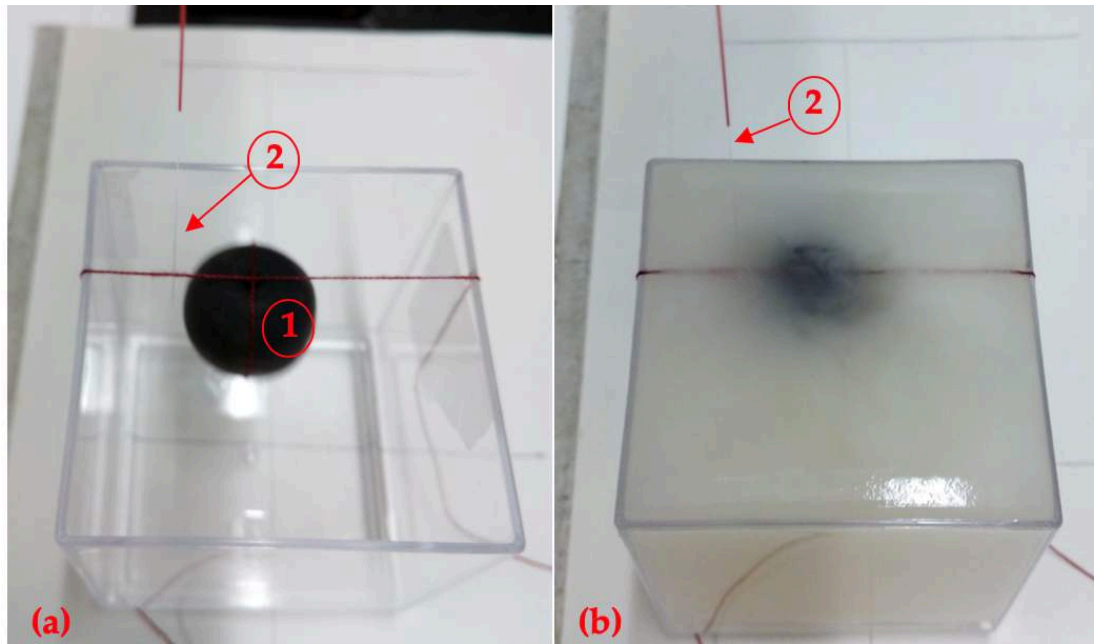


Figura 4.13: Imagens da vista superior do molde do fantoma D (a) e do fantoma D pronto para o repouso no molde (b). Na imagem (a) vemos o absorvedor suspenso (1) por uma linha no molde e a ponta sensora do sensor de fibra óptica localizada na sua posição final (2). A imagem (b) mostra o resultado final do fantoma com o sensor de fibra óptica incorporado.

Na terceira fase, utiliza-se uma Pipeta de Pasteur para proteger a extremidade sensora do contacto directo com o fantoma que se mostra problemático para o sucesso da aquisição de dados (ver Figura 4.14) e as experiências são repetidas para a monitorização da temperatura na espessura de fantoma irradiada pelo feixe laser.

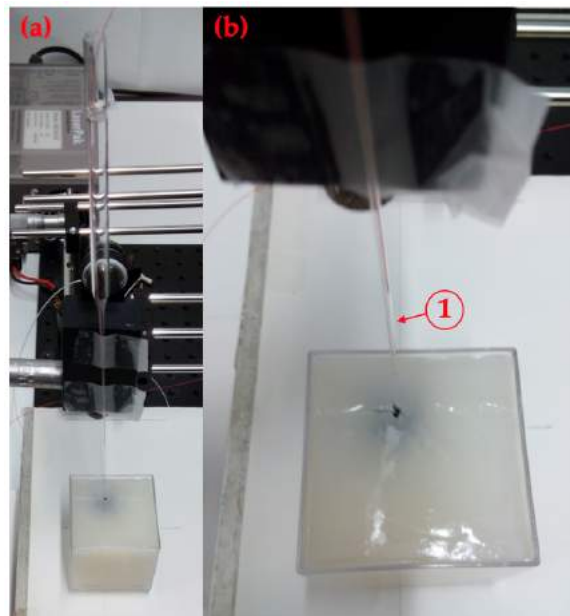


Figura 4.14: Imagens da vista superior do fantoma D.2 no qual foi inserida a Pipeta de Pasteur com a extremidade sensora do sensor de fibra óptica no seu interior (1). Na imagem (a) é visível a Pipeta de Pasteur por completo. A imagem (b) corresponde a uma aproximação da imagem (a) na qual é visível a posição da Pipeta na espessura de 5 mm de fantoma.

A escolha do tipo de sensores de fibra óptica utilizados no projeto baseou-se na premissa de que os sensores selecionados possuem sensibilidade para as gamas de temperatura utilizadas. Na impossibilidade de adquirir um sensor completamente construído, este projeto inclui ainda a construção dos sensores propriamente ditos. As metodologias e os resultados obtidos para a construção e validação dos sensores de fibra óptica foram reunidos no Anexo 6.

5

5 Procedimento Experimental

Este capítulo descreve os procedimentos adotados em todas as experiências realizadas ao longo do projeto, bem como as metodologias adquiridas para realizar a posterior análise dos resultados obtidos. Para cada um dos fantasmas construídos descreve-se o *setup* experimental adotado bem como os instrumentos utilizados.

5.1 Fantoma A

Em todas as experiências realizadas, ambas as versões construídas do fantoma A foram estudadas recorrendo ao Termómetro de IV e à câmara de telemóvel. O fantoma é colocado sob o feixe laser que incide numa das superfícies laterais de maior comprimento a uma distância de 4 cm (ver Figura 5.1). As dimensões apresentadas possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. O feixe incide próximo da superfície de leitura da temperatura com recurso ao Termómetro de IV. Entre as diferentes irradiações é contabilizado um intervalo de descanso que permita ao fantoma retornar a valores de temperatura próximos do equilíbrio inicial. A experiência/irradiação é interrompida quando o fantoma apresenta sinais de cedência como por exemplo o surgimento de bolhas de ar ao longo do trajeto realizado pelo feixe laser no fantoma.

5.1.1 Termómetro de IV

O Termómetro de IV foi utilizado como meio de metrologia da temperatura superficial das duas versões de fantoma e também como meio de registo imagiológico das mesmas, através da recolha de termogramas no mesmo instante de leitura da temperatura. Em alguns dos termogramas recolhidos com recurso ao Termómetro de IV é visível no centro da imagem, uma cruz com um valor numérico ao lado. Para os termogramas correspondentes ao fantoma A, o valor numérico corresponde ao valor de temperatura

lido na zona assinalada com a cruz em unidades Fahrenheit. Em ambas as experiências realizadas para estudar as duas versões do fantoma A, o Termómetro de IV foi colocado a 50 cm de distância da superfície do fantoma da qual regista a temperatura ao longo da experiência (ver Figura 5.1).



Figura 5.1: Imagem do *setup* experimental escolhido para estudar o fantoma A.1. A imagem (a) mostra a disposição do Termómetro de IV em relação à superfície de leitura da temperatura e de registo do termograma. Na imagem (b) vemos o termograma da superfície do fantoma na qual se realiza a leitura de temperatura no ecrã do Termómetro de IV.

Na experiência com o fantoma A.1 a temperatura superficial do mesmo é registada centrando a mira do Termómetro de IV no ponto da superfície do fantoma a cerca de 1 cm de distância da superfície de incidência do feixe laser. São também registados três termogramas nos instantes de 0, 10 e 20 minutos de irradiação. No caso da experiência realizada com o fantoma A.2, a temperatura superficial do fantoma é lida em dois pontos distintos do fantoma (ilustrados na Figura 5.2 (a) com as letras **a** e **b**). Adicionalmente, são registados termogramas dos dois pontos no fantoma com recurso ao Termómetro de IV, no mesmo instante de leitura da temperatura. O ponto **a** localiza-se a 1 cm da superfície de incidência do feixe laser e o ponto **b** a 2 cm.

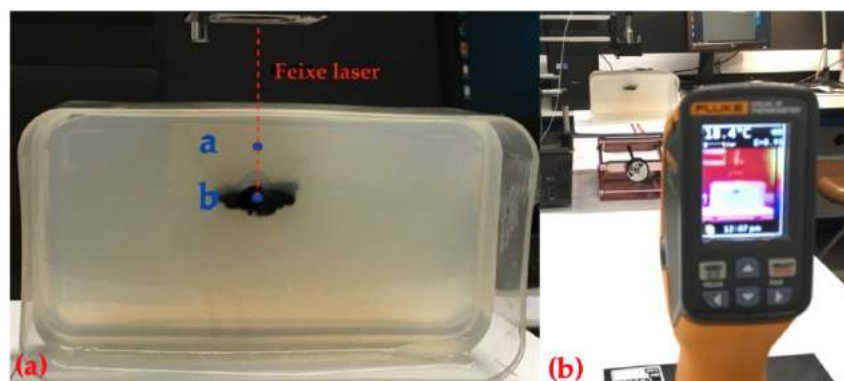


Figura 5.2: Imagem do *setup* experimental escolhido para estudar o fantoma A.2. A imagem (a) mostra a disposição do Termómetro de IV em relação à superfície de leitura da temperatura e de registo do termograma. Na imagem (b) vemos o termograma da superfície do fantoma na qual se realiza a leitura de temperatura no ecrã do Termómetro de IV.

5.1.2 Câmara de telemóvel

A câmara do telemóvel foi utilizada para captar imagens da difusão do feixe laser no interior do fantoma A.2. Este método de captação de imagens com recurso à câmara do telemóvel não segue nenhum procedimento experimental previamente estipulado.

5.1.3 Recolha e análise de dados

A única irradiação realizada sobre o fantoma A.1 teve a duração de 20 minutos contínuos e a potência do feixe laser foi definida para 0,03 W. A temperatura superficial do fantoma foi lida em intervalos de 10 minutos e nos mesmos instantes foram registados termogramas da superfície do fantoma.

No caso do fantoma A.2 são realizadas seis irradiações e são utilizadas potências do feixe laser desde 0,03 W inclusive, até ao máximo de 2,30 W. Todas as irradiações possuem uma duração de 20 minutos contínuos. A temperatura superficial do fantoma é lida nos dois pontos distintos **a** e **b** em intervalos de 10 minutos e os termogramas são registados no mesmo instante. Em ambas as experiências, a temperatura ambiente foi registada com recurso a um termómetro de mercúrio analógico que marcou 20°C ao longo de todas as irradiações realizadas. Após o registo dos dados obtidos realiza-se a análise dos mesmos, distinguindo-se as variações de temperatura verificadas em: variações ΔT , quando a variação de temperatura é ΔT ao valor registado no instante de leitura anterior; e variações total, quando a variação considerada corresponde à variação que ocorreu entre o valor inicial e o valor final de temperatura numa dada irradiação ou experiência com várias irradiações.

5.2 Fantoma B

Ambas as versões do fantoma B foram estudadas recorrendo ao Termómetro de IV e à Câmara de telemóvel. Para cada uma das versões do fantoma, o feixe laser incide verticalmente na superfície do fantoma localizada a 5 cm do colimador, em dois pontos distintos (ver Figura 5.3). As dimensões apresentadas possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. No fantoma B.2 estas coordenadas correspondem ao centro das esferas absorvedoras. Denomina-se experiência 1 o conjunto de irradiações realizadas sobre o absorvedor cujo centro se localiza a 1,5 cm da superfície de leitura da temperatura com o Termómetro de IV e experiência 2 ao conjunto de irradiações realizadas sobre a esfera a 3 cm. Assim, por exemplo, o conjunto de irradiações realizado sobre o fantoma B.2 com o absorvedor a 1,5 cm da superfície do fantoma denomina-se experiência B.2.1 e com o absorvedor a 3 cm da superfície denomina-se experiência B.2.2.

São utilizadas diversas potências do feixe laser sucessivamente superiores em cada um dos fantomas e cada irradiação tem a duração máxima de 20 minutos. Entre as diferentes irradiações é contabilizado

um intervalo de descanso que permita ao fantoma retornar a valores de temperatura próximos do equilíbrio inicial. Contudo, a irradiação é interrompida de imediato se houver algum sinal de cedência por parte do fantoma como o surgimento de bolhas de ar ou sulcos à superfície do mesmo.

No caso do fantoma B.1 a potência do feixe laser foi aumentada desde 0,03 W até 3,13 W em ambas as experiências, tendo todas as irradiações uma duração total de 20 minutos. Nas experiências com o fantoma B.2 por sua vez, a potência do feixe laser foi aumentada desde 0,03 W até ao valor de 1,82 W para a experiência 1 e até 1,50 W para a experiência 2.

A temperatura ambiente medida com o termómetro de mercúrio manteve-se aproximadamente constante nos 21°C durante o estudo de ambas as versões do fantoma B.

5.2.1 Termómetro de IV

O Termómetro de IV regista os valores da temperatura superficial do fantoma na face lateral do mesmo e encontra-se a 35,5 cm de distância desta face. A leitura é realizada perpendicularmente ao feixe laser (ver Figura 5.3) em intervalos de 5 minutos. A imagem do *setup* experimental utilizado para cada uma das experiências realizadas sobre o fantoma B.1 (a) e B.2 (b) são apresentadas na figura 5.3.

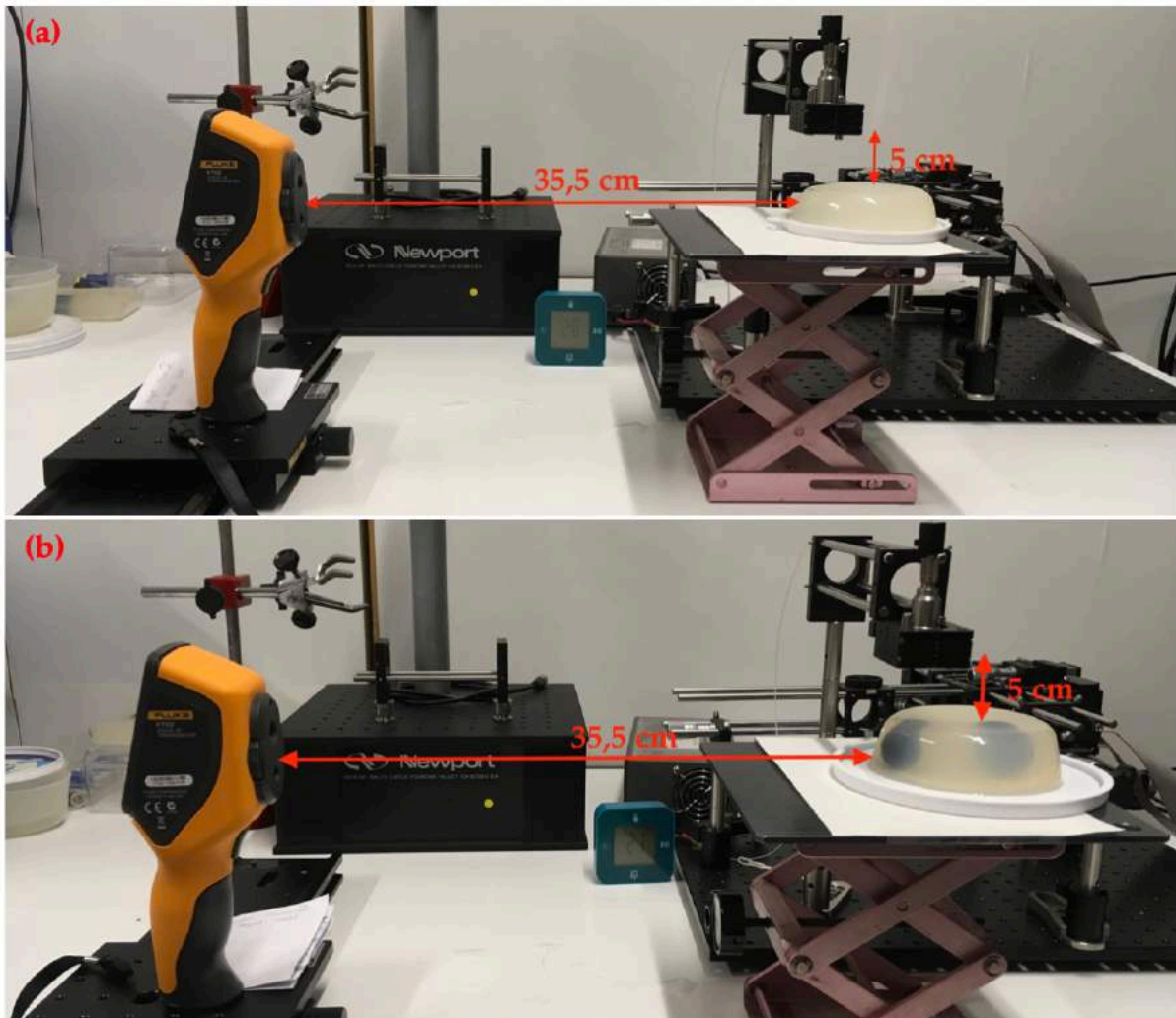


Figura 5.3: Imagem do *setup* experimental construído para realizar a experiência B.1.1 (a) e a experiência B.2.1 (b). Para as experiências 2 realizadas sobre ambos os fantasmas, roda-se o fantoma 180° até o segundo absorvedor ficar sob o feixe laser.

Para além de utilizado como meio de metrologia da temperatura superficial do fantoma, o Termómetro de IV recolhe também termogramas da superfície lateral do fantoma B nos mesmos instantes de leitura da temperatura.

5.2.2 Câmara de telemóvel

Nas experiências com o fantoma B, a câmara de telemóvel foi usada no registo de imagens pontuais ao longo das experiências realizadas em ambas as versões do fantoma, como por exemplo no registo da cedência do fantoma. Foram também recolhidas imagens da difusão do feixe laser em diferentes condições de irradiação das duas versões do fantoma.

5.2.3 Recolha e análise de dados

As duas versões do fantoma B têm como objetivo analisar a influência da espessura de fantoma entre o feixe laser e a superfície de leitura da temperatura com o Termómetro de IV e seguidamente a influência

da presença de um corpo absorvedor em cada uma das espessuras. Assim, são recolhidos os valores de temperatura e termogramas com recurso ao Termómetro de IV para todas as irradiações de ambas as experiências realizadas sobre o fantoma B. São recolhidas algumas imagens da difusão do feixe laser com a câmara de telemóvel. Neste fantoma, a análise dos dados concentra-se nos resultados numéricos de temperatura obtidos para a superfície do feixe laser e nos termogramas cujo código de cores apresentado seja conclusivo ou relevante mencionar para cada irradiação. Finalmente, dado o objetivo da construção das duas versões do fantoma B, são estabelecidas comparações entre os resultados numéricos e termográficos recolhidos para cada um dos fantasmas B.1 e B.2.

5.3 Fantoma C

Os estudos realizados sobre ambas as versões C.1 e C.2 do fantoma C seguiram diferentes procedimentos experimentais. Nas diversas irradiações das experiências realizadas sobre o fantoma C.1, o feixe laser incide verticalmente na superfície do fantoma onde é lida a temperatura pelo Termómetro de IV, localizando-se a 8 cm de distância do colimador do feixe (ver Figura 5.5). As dimensões apresentadas possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. No caso do fantoma C.2, o feixe laser incide lateralmente na superfície do fantoma previamente seccionada, a uma distância de 8 cm do colimador (ver Figura 5.4).

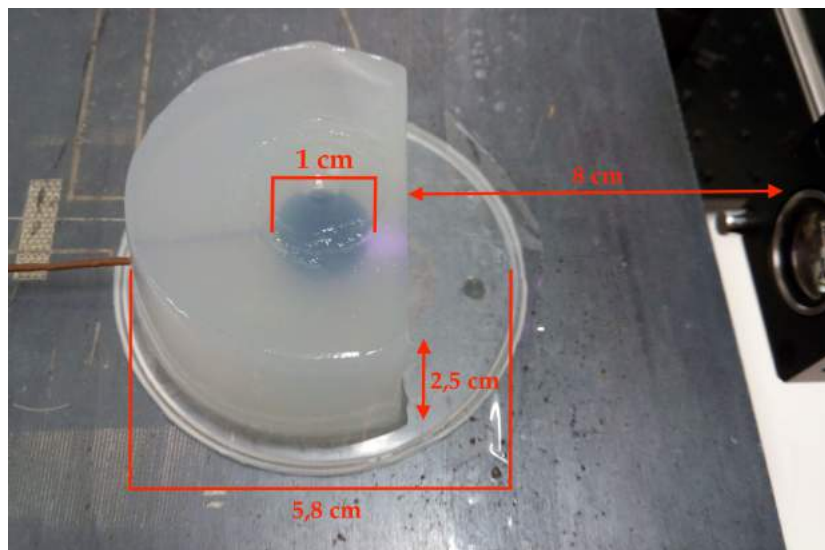


Figura 5.4: Imagem do *setup* experimental construído para realizar o estudo do fantoma C.2. Na imagem vemos o feixe laser no lado direito a incidir sobre a superfície lateral do fantoma que se encontra a uma distância de 8 cm. No lado esquerdo da imagem é visível o fio do Termopar a atravessar o fantoma e entrar no absorvedor.

A evolução da temperatura no interior do absorvedor é monitorizada em todas as irradiações sobre os diferentes fantasmas com recurso ao Termopar. No que respeita à evolução da temperatura superficial do fantoma, esta é monitorizada apenas em algumas irradiações realizadas sobre o fantoma C.1 devido à avaria do Termómetro de IV.

5.3.1 Termómetro de IV

A evolução da temperatura na superfície do fantoma C.1 é monitorizada no local de incidência do feixe laser com recurso ao Termómetro de IV, que foi colocado a 18,5 cm da superfície do fantoma (ver Figura 5.5). Adicionalmente, são registados termogramas nos mesmos instantes de leitura da temperatura superficial do fantoma, em intervalos de 1 minuto.

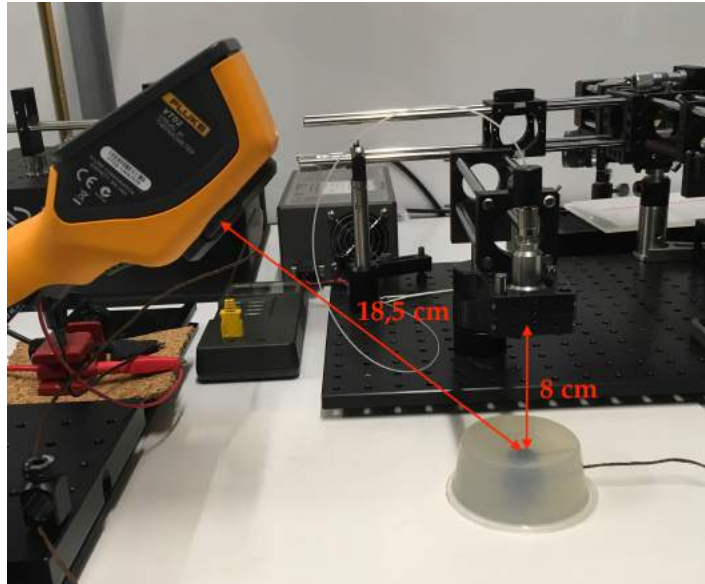


Figura 5.5: Imagem do *setup* experimental construído para as experiências realizadas sobre as diferentes versões do fantoma C.1. Na imagem é visível o Termómetro de IV que dista 18,5 cm do local de incidência do feixe laser na superfície do fantoma. Adicionalmente, no interior do absorvedor encontra-se o Termopar, que atravessa o fantoma. Sobre o fantoma está localizado o laser a uma distância de 8 cm da superfície do fantoma na qual este incide.

Devido à avaria do Termómetro de IV, não foi possível realizar a monitorização da evolução da temperatura superficial do fantoma C.1 para as irradiações com potência de 0,37 W nas experiências C.1.b e C.1.c. No caso do fantoma C.2, já não foi possível recolher qualquer valor de temperatura superficial do fantoma ou termograma com o Termómetro de IV.

5.3.2 Câmara de telemóvel

De igual forma ao mencionado anteriormente para os fantasmas A e B, a utilização da câmara de telemóvel como instrumento imagiológico de análise da propagação do feixe laser no interior do fantoma para o fantoma C.1 cinge-se ao registo de imagens pontuais da difusão do feixe e ao registo dos *setups* experimentais construídos para análise do mesmo. Por outro lado, a utilização da câmara de telemóvel com o fantoma C.2 é mais conclusiva na medida em que são registadas imagens da difusão do feixe laser em todas as potências utilizadas para cada uma das espessuras de fantoma irradiado.

5.3.3 Termómetro Termopar

A temperatura no interior do absorvedor em ambos os fantomas C.1 e C.2 é monitorizada utilizando o termómetro Termopar que foi colocado no interior do absorvedor num orifício previamente criado para o efeito (ver Figuras 5.4 e 5.5).

5.3.4 Recolha e análise de dados

Para ambos os fantomas C.1 e C.2 são realizadas 3 experiências com irradiações de potências sucessivamente superiores estudando-se as diferentes espessuras entre a superfície do fantoma e a superfície do absorvedor. Durante todas as irradiações os valores de temperatura superficial do fantoma e interna do absorvedor são registados a cada intervalo de 1 minuto pelo Termómetro de IV e pelo Termopar respetivamente. Nas experiências realizadas com o fantoma C.1 estas irradiações têm a duração máxima de 5 minutos e nas experiências realizadas com o fantoma C.2 a duração é de 20 minutos. Entre as diferentes irradiações é contabilizado um intervalo de descanso que permita ao fantoma retornar a valores de temperatura próximos do equilíbrio inicial. Contudo, a irradiação é interrompida de imediato se houver algum sinal de cedência por parte do fantoma como o surgimento de bolhas de ar ou sulcos à superfície do mesmo. Todos os resultados recolhidos em cada irradiação das experiências realizadas para cada fantoma são apresentados e analisados considerando a variação total da temperatura na irradiação completa ou a variação em determinados intervalos de leitura.

5.4 Fantoma D

Os estudos realizados sobre todas as versões do fantoma D seguiram os mesmos procedimentos experimentais. Para cada valor de espessura de fantoma, são realizadas diversas irradiações com potências do feixe laser sucessivamente superiores. O feixe laser incide na superfície do fantoma a 8 cm de distância da sua saída (ver Figura 5.7). As dimensões apresentadas possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. Em cada irradiação são registadas imagens da distribuição do feixe laser no interior do fantoma com recurso à câmara de telemóvel e à câmara USB.

Para o fantoma D, a evolução da temperatura no interior do absorvedor é monitorizada com recurso aos dois instrumentos metrológicos Termopar e Sensor de Fibra Óptica.

Adicionalmente, a temperatura na espessura de fantoma entre a superfície do absorvedor e a superfície de incidência do feixe laser é também monitorizada com recurso ao Sensor de Fibra Óptica que é colocado nesta espessura de fantoma quase em contacto com a superfície do absorvedor (ver Figura 5.6).

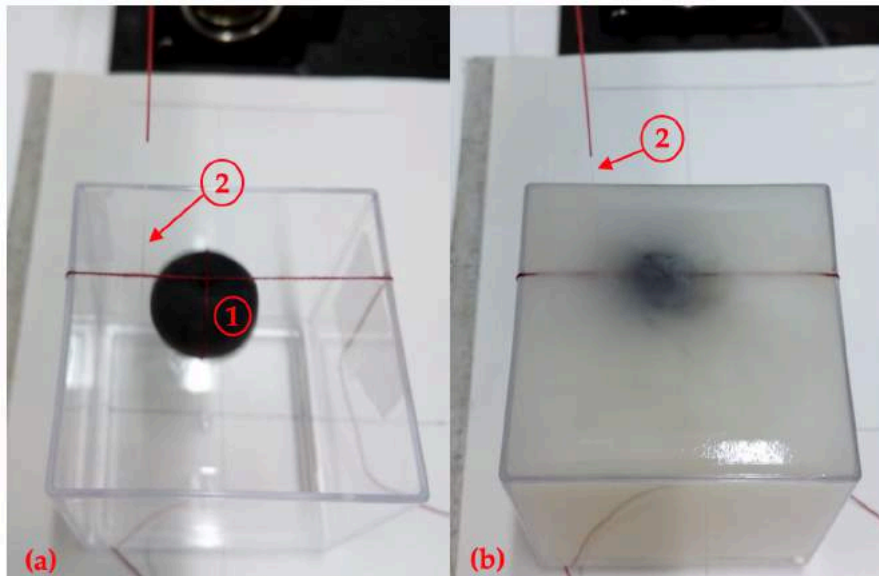


Figura 5.6: Imagens da colocação da ponta do Sensor de Fibra Óptica na posição desejada no interior do molde utilizado para construir o fantoma D. Na imagem (a) é visível o molde com a esfera absorvedora (1) já suspensa e a ponta sensora colocada no lado esquerdo do absorvedor (2) pronta para a deposição da solução de fantoma. A imagem (b) mostra o resultado final após se adicionar a solução de fantoma.

5.4.1 Câmara de telemóvel

Nas experiências realizadas sobre todas as versões do fantoma D, a câmara de telemóvel é utilizada como instrumento imagiológico do registo da propagação do feixe laser no interior do fantoma. São registadas imagens para todas as irradiações com diferentes potências realizadas para cada uma das versões do fantoma D.

5.4.2 Câmara USB

Nas experiências realizadas sobre todas as versões do fantoma D, a câmara USB é utilizada como instrumento imagiológico registando a propagação do feixe laser no interior do fantoma para todas as irradiações com diferentes potências realizadas com o fantoma D. Como mencionado em 4.6. a lente da câmara é colocada a 4 cm da superfície do fantoma (ver Figura 4.9). São registadas imagens da distribuição da radiação do feixe laser no interior do fantoma para todos os valores de potência do feixe laser utilizados em cada uma das espessuras de fantoma entre a superfície do absorvedor e a superfície de incidência do feixe laser.

5.4.3 Termopar

Nas experiências realizadas sobre todas as versões do fantoma D, o Termopar é utilizado como instrumento metrológico dos valores de temperatura registados no interior do absorvedor ao longo das irradiações com diferentes potências para cada uma das experiências realizadas sobre as diferentes versões do fantoma D. O fantoma é introduzido no interior do absorvedor que se encontra à superfície do fantoma, no orifício do absorvedor (ver Figura 5.7).

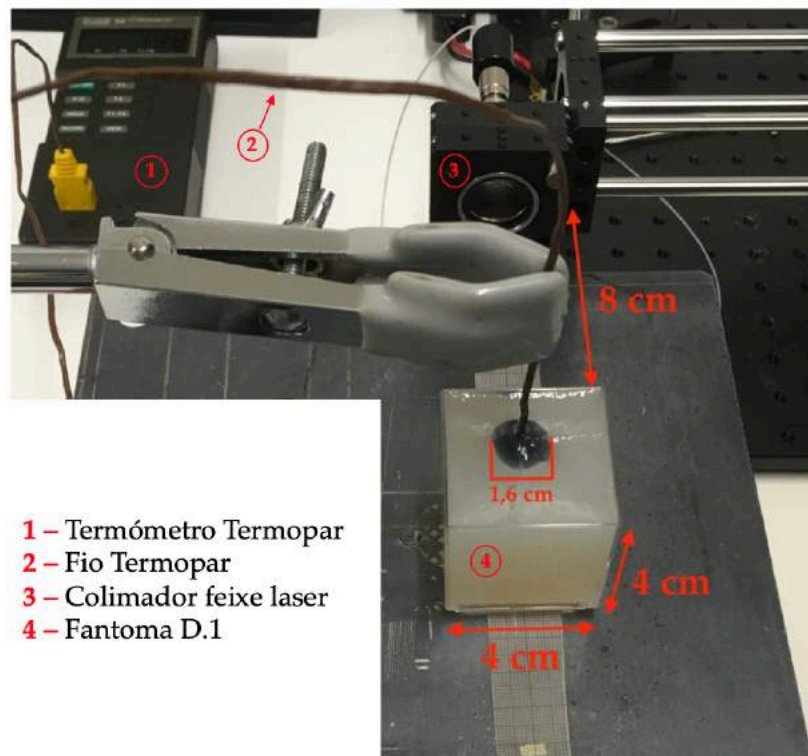


Figura 5.7: Imagem do *setup* experimental da disposição dos materiais utilizados na realização da experiência D.1.a. A ponta sensora do Termopar (2) é introduzida no interior do absorvedor no fantoma D.1 (4).

Com recurso ao termómetro Termopar regista-se os valores de temperatura do interior do absorvedor em intervalos de 1 minuto.

5.4.4 Sensor de Fibra Óptica

O sensor de Fibra Óptica é utilizado como instrumento metrológico da temperatura no interior do absorvedor e na espessura de fantoma irradiada pelo feixe laser, ao longo das diversas irradiações realizadas sobre as versões D.2, D.3 e D.4 do fantoma D. O sinal lido pelo sensor ao longo de cada irradiação é registado em intervalos de 2 minutos.

5.4.5 Recolha e análise de dados

Como mencionado anteriormente, são construídas 4 versões do fantoma D nas quais se varia a concentração de Intralípidos na composição de cada fantoma. Assim, para as experiências realizadas sobre o fantoma D, denominar-se-ão experiências D.1, D.2, D.3 e D.4 consoante são realizadas sobre os fantomas com 0%, 1%, 2% e 3% de concentração em Intralípidos. Adicionalmente para cada um dos fantomas são realizadas 4 experiências que consistem na irradiação do fantoma nas suas diferentes faces por forma a estudar diferentes espessuras de fantoma irradiados pelo feixe laser, tendo estas de 5, 10, 14 e 19 mm entre a superfície do absorvedor e a superfície de incidência do feixe laser. As dimensões apresentadas possuem uma incerteza associada de 0,05 cm. Desta forma, a experiência realizada sobre o fantoma D.1 com a espessura de 5 mm por exemplo, designar-se-á experiência D.1.a. Nas experiências realizadas

sobre o fantoma D utilizam-se apenas as potências de 0,37 W e 0,76 W pois consistem nas potências de feixe laser que resultaram em menos episódios de cedência do fantoma ao longo dos estudos dirigidos anteriormente com os diversos fantomas. A duração das duas irradiações foi definida para os 25 minutos contínuos. Os resultados obtidos com o Termopar para a evolução da temperatura no interior do absorvedor ao longo das diferentes irradiações são analisados como nos fantomas anteriores, estabelecendo-se comparações entre variações absolutas e Δ de temperatura das diferentes irradiações. Os resultados numéricos obtidos na experiência realizada sobre o fantoma D.1 são apresentados em gráficos da evolução da temperatura ao longo da irradiação e em gráficos de variações Δ para cada intervalo de leitura. Para as experiências realizadas com os restantes fantomas os gráficos são disponibilizados no anexo 8. No que respeita aos resultados imagiológicos, a câmara USB foi utilizada apenas sobre as versões D.3 e D.4 do fantoma D enquanto que a câmara de telemóvel foi utilizada em todas as versões do mesmo.

Por outro lado, os resultados obtidos pelo sensor de fibra óptica são recolhidos em intervalos de dois minutos até se perfazer um total de 20 minutos de irradiação.

6

6 Resultados e Análise

O presente capítulo descreve os principais resultados obtidos para as experiências realizadas com os diferentes fantasmas e com cada um dos instrumentos utilizados ao longo do projeto. Primeiramente, apresentam-se os resultados obtidos e análise dos mesmos para os diferentes instrumentos. Esta apresentação divide-se em duas categorias que distinguem os diferentes instrumentos utilizados consoante o tipo de resultado que fornecem, classificando-os em Metrológicos e/ou Imagiológicos. Para cada um dos instrumentos são apresentados os resultados obtidos com recurso a esse material em cada experiência, seguindo-se uma breve análise dos mesmos. Por fim, é apresentada uma análise conjunta de alguns dos resultados obtidos para cada um dos instrumentos, estabelecendo-se comparações entre os diferentes meios de avaliação do comportamento da radiação laser. Finalmente, é apresentada uma análise dos resultados com foco em cada um dos fantasmas utilizados.

6.1 Metrologia

Esta categoria apresenta os instrumentos cujos resultados fornecidos são numéricos. Desta forma, a categoria reúne os resultados adquiridos com recurso ao Termómetro de IV, ao termómetro Termopar e aos sensores de fibra óptica.

6.1.1 Termómetro de IV

O Termómetro de IV foi utilizado nas experiências realizadas com os fantasmas A, B e C. São considerados apenas os valores de temperatura registados com recurso a este instrumento. Os resultados apresentados possuem uma incerteza associada de $0,1^{\circ}\text{C}$.

6.1.1.1 Fantoma A

Na única experiência realizada com o fantoma A.1 a variação de temperatura total registada foi de $0,4^{\circ}\text{C}$.

Por sua vez, para a experiência realizada com o fantoma A.2 obteve-se um maior número de resultados. A Tabela 6.1 reúne os valores de temperatura absolutos registrados em cada instante de leitura da temperatura para os pontos **a** e **b** na superfície do fantoma.

Tabela 6.1: Resultados da medição de temperatura em ambos os pontos **a** e **b** do ensaio 2 para as diferentes potências do feixe laser utilizadas. A média da temperatura ambiente é apresentada para cada irradiação.

Potência (W)	Tempo (min)	Temperatura Ponto a (°C)	Temperatura Ponto b (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
0,03	0	17,8	17,4	20
	10	s/resultado	s/resultado	
	20	18,2	17,6	
0,37	0	17,2	14,7	20
	10	18,2	16,9	
	20	18,8	18	
0,76	0	17,4	16,9	20
	10	19,2	19,4	
	20	19,9	20,4	
1,1	0	20,6	21,3	20
	10	21,1	23,1	
	20	21,7	23,4	
1,5	0	21,6	22,9	20
	10	22,4	25,3	
	20	22,9	25,7	
1,82	0	23,4	26,3	20
	10	23,4	26,7	
	18,4	23,8	27,7	

Para a potência do feixe laser de 0,03 W, o ponto **a** registou um aumento de temperatura de 0,5°C e o ponto **b** verificou um aumento de 0,2°C. Por lapso, para o instante de 10 minutos de irradiação não foram registados os valores de temperatura. O aumento da potência para o valor de 0,37 W originou um aumento da variação total de temperatura para 1,6°C no ponto **a** e uma variação de 3,3°C no ponto **b**. Por sua vez, a potência de 0,76W provocou uma variação total de 2,5°C para o ponto **a** e de 3,5°C para o ponto **b**. Em seguida, com o aumento da potência do feixe laser para 1,10 W, verifica-se uma variação total de temperatura de apenas 1,1°C para o ponto **a**, enquanto que o ponto **b** verifica uma variação total de 2,1°C. A potência de 1,50 W, provocou uma variação total de temperatura de 1,3°C no ponto **a** e de 2,8°C para o ponto **b**. Finalmente, a potência de 1,82 W provocou a variação total de 0,4°C no ponto **a** e de 1,4°C no ponto **b**. No final desta irradiação, o fantoma cedeu e surgiu um orifício na superfície do mesmo localizado no centro da porção de Tinta da China, próximo do ponto **b** considerado ao longo do ensaio.

Momentos antes do final da irradiação com a potência de 1,82 W, o Termómetro de IV registava uma temperatura de 28,3°C no ponto **b**. Podemos assim definir esta temperatura e esta potência de feixe laser como um limite máximo aproximado de resistência à irradiação do fantoma com Tinta da China incorporada.

É importante salientar que a variação total de temperatura ao longo das diferentes irradiações é sempre superior para o ponto **b**, no qual se localiza a porção de Tinta da China. Uma vez que a Tinta da China

possui propriedades óticas aproximadas às de um absorvedor perfeito, torna-se evidente a razão da maior deposição de energia neste local, originando a deformação do fantoma.

A partir da irradiação com potência do feixe laser de 1,10 W já não foi possível retomar as temperaturas iniciais de equilíbrio de ambos os pontos do fantoma. Os intervalos de descanso tidos entre cada irradiação tornaram-se cada vez mais longos inviabilizando a realização do ensaio em tempo útil.

6.1.1.2 Fantoma B

Em todas as irradiações realizadas sobre os fantasmas B.1 e B.2 a temperatura inicial registada pelo Termómetro de IV é aproximadamente igual, situando-se nos 17,3°C, tendo-se verificado diferentes variações e totais da temperatura ao longo das irradiações e consequentemente, diferentes temperaturas finais.

O gráfico da Figura 6.1 reúne a evolução da temperatura registada pelo Termómetro de IV para as diferentes irradiações realizadas na experiência B.1.1.

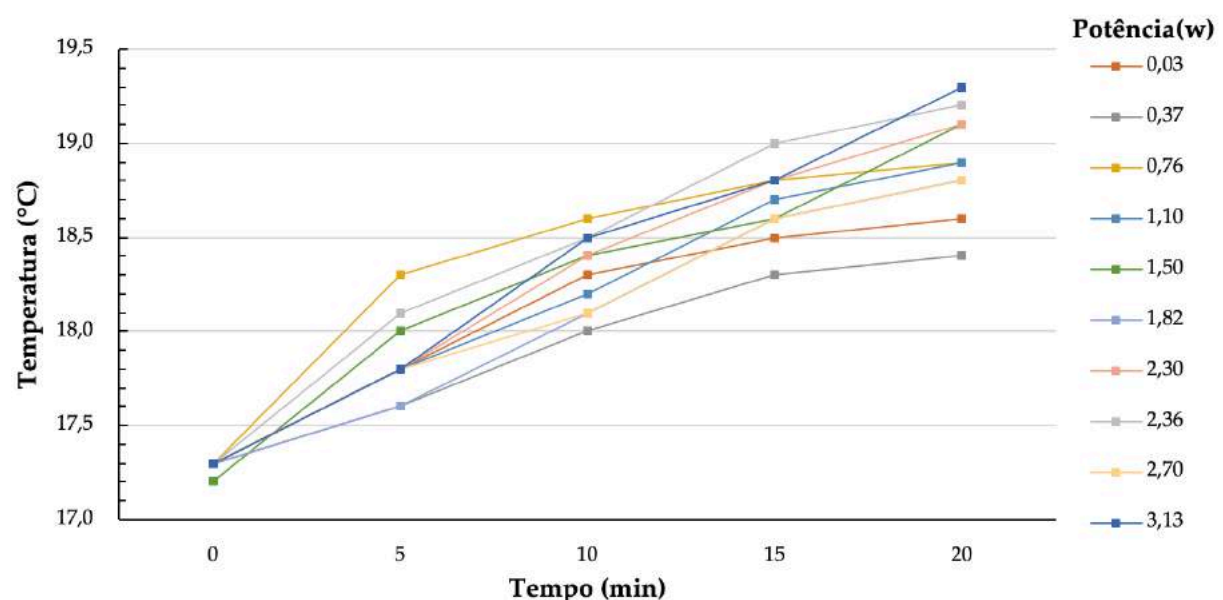


Figura 6.1: Gráfico com evolução da temperatura registada na superfície do fantoma B.1.1 ao longo dos 20 minutos de irradiação para as diferentes potências de feixe laser utilizadas.

A análise do gráfico da Figura 6.1 permite verificar que a menor variação total de temperatura registada no fantoma B.1.1 foi de 1,1 °C e ocorreu para a potência de 0,37 W, que registou a menor temperatura final de 18,4°C. A maior variação total por sua vez, foi de 2°C e verificou-se para a potência de 3,13 W, que alcançou o maior valor de temperatura final de 19,3°C. As potências intermédias registaram valores intermédios de variação total da temperatura de 1,6°C para as potências de 0,76 W e 1,10 W, 1,9°C para as potências 1,50 W e 2,36°C, 1,5°C para as potências 1,82 W e 2,70 W, 1,8°C para a potência 2,30 W.

Por sua vez, o gráfico da Figura 6.2 permite avaliar a variação de temperatura registada em cada intervalo de leitura para as diferentes potências utilizadas na experiência.

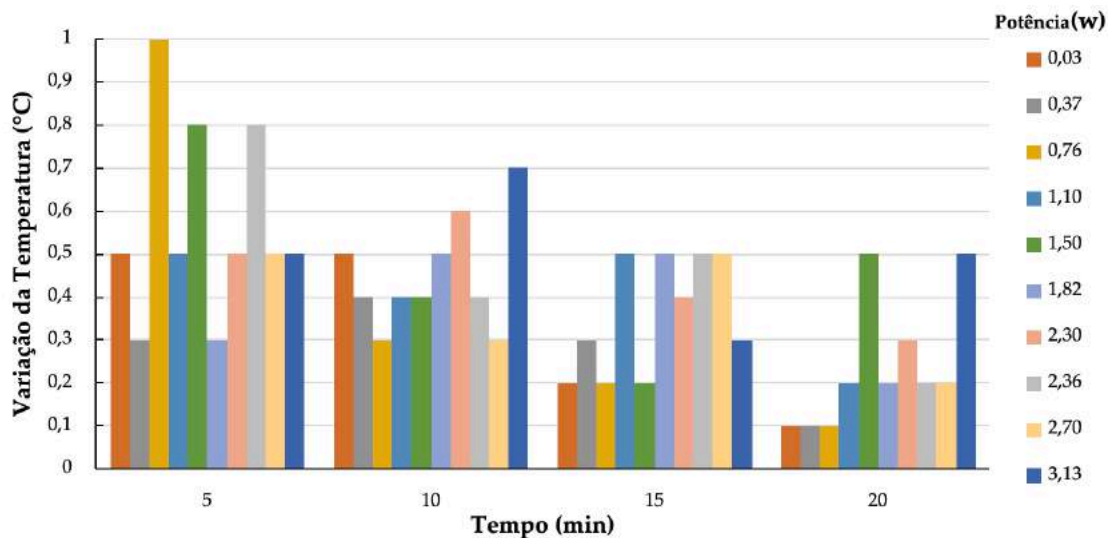


Figura 6.2: Variação da temperatura na superfície do fantoma B.1.1 nos diversos intervalos de leitura realizados ao longo dos 20 minutos.

Para as potências 0,03 W, 0,76 W e 1,50 W verifica-se uma diminuição da variação da temperatura com o passar do tempo para os primeiros quinze minutos de irradiação. As restantes potências não possuem um padrão de variação de temperatura, sendo que esta aumenta ou diminui aleatoriamente ao longo dos 20 minutos de irradiação. Por exemplo, para a potência 0,37 W ocorre um aumento da variação da temperatura nos primeiros dez minutos de irradiação, seguindo-se uma diminuição da mesma para o terceiro e quarto intervalos de 5 minutos. Todos os testes realizados com as diferentes potências atingiram os 20 minutos de irradiação sem ocorrer a deformação da superfície do fantoma.

No caso da experiência B.1.2, as potências de irradiação utilizadas foram desde os 0,03 W até aos 3,13 W sem ocorrer deformação visível do fantoma.

O gráfico da Figura 6.3 reúne a evolução da temperatura registada pelo Termómetro de IV para as diferentes irradiações realizadas sobre o fantoma B.1.2.

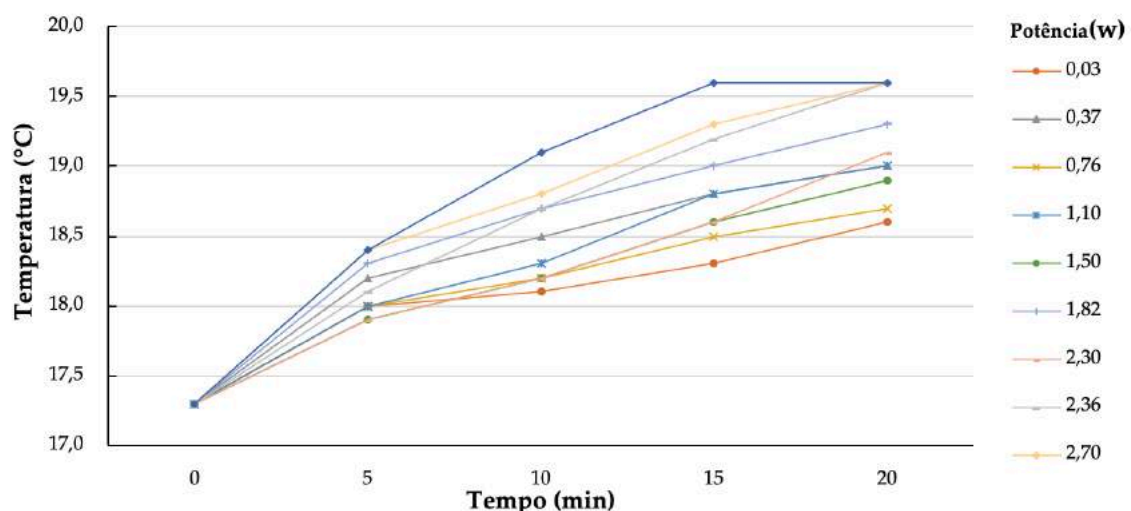


Figura 6.3: Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma B.1.2 ao longo dos 20 minutos de cada irradiação.

Verifica-se que para as potências de 2,36 W, 2,70 W e 3,13 W a superfície lateral do fantoma atinge a mesma temperatura final de 19,6°C, ainda que as variações de temperatura ao longo da irradiação com as diferentes potências tenham sido diferentes.

A menor potência do feixe laser (0,03 W) originou a menor temperatura final de 18,6°C para a superfície do fantoma e a maior potência (3,13 W) originou a temperatura mais elevada de 19,6°C. No entanto, para as potências intermédias não se verifica uma proporcionalidade direta, na medida em que, um aumento de potência não origina um aumento da temperatura final alcançada pela superfície do fantoma.

Com base no gráfico da Figura 6.4, que regista a variação de temperatura verificada em cada intervalo para as diferentes potências, podemos afirmar que a maior variação ocorreu para os primeiros 5 minutos de irradiação em todas as potências. Os minutos consecutivos de irradiação registaram menores variações para a superfície do fantoma nas diversas potências.

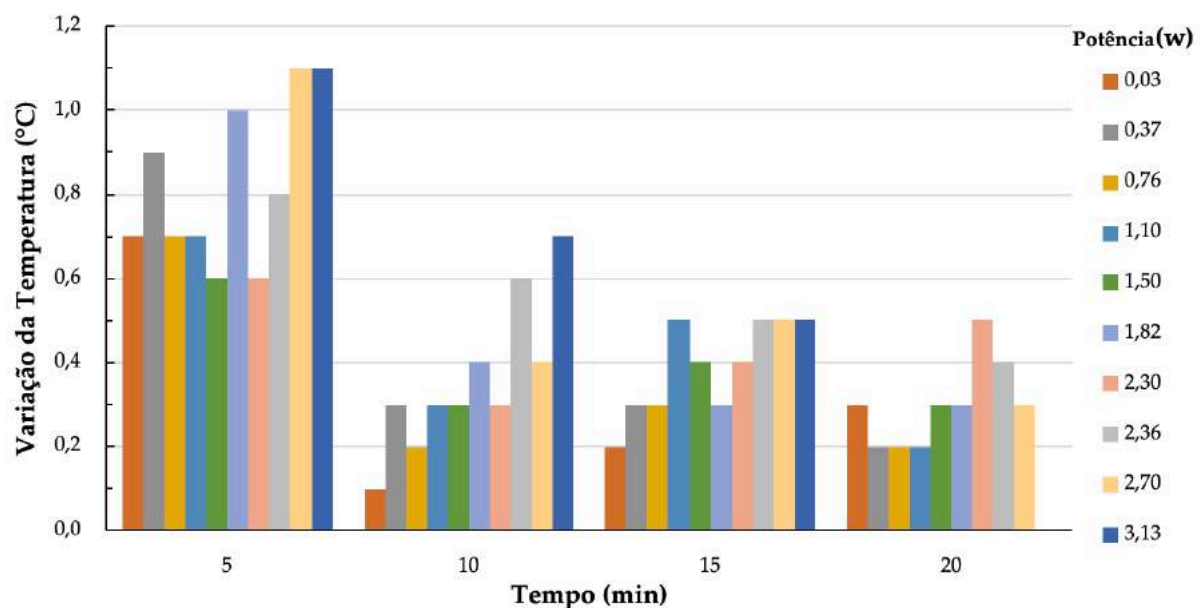


Figura 6.4: Variação da temperatura na superfície do fantoma B.1.2 nos diversos intervalos de leitura realizados ao longo dos 20 minutos.

Podemos ainda verificar que as potências 0,37 W, 1,82 W, 2,36 W e 3,13W registam uma diminuição da variação de temperatura ao longo dos 20 minutos de irradiação. As restantes potências possuem variações de temperatura que aleatoriamente aumentam ou diminuem a cada intervalo de leitura.

A variação máxima de temperatura verificada para este ensaio foi de 1,1°C e ocorreu para ambas as potências 2,70 W e 3,13 W ao fim dos primeiros 5 minutos de irradiação. Já a variação máxima absoluta ocorreu para as três potências mais elevadas: 2,36W, 2,70 W e 3,13 W e foi de 2,3°C.

Todos os testes realizados com as diferentes potências atingiram os 20 minutos de irradiação sem ocorrer a deformação da superfície do fantoma.

As duas experiências realizadas sobre o fantoma B.2 resultaram também em aumentos contínuos da temperatura superficial do fantoma, mas com diferentes taxas de variação consoante a potência de feixe utilizada e a distância da esfera absorvedora à superfície de leitura da temperatura. Adicionalmente, os valores de potência utilizados em cada experiência aumentaram desde os 0,03 W até aos 1,82 W para o fantoma B.1.1 e até aos 1,50 W para o fantoma B.2.2.

O gráfico da Figura 6.5 reúne a evolução da temperatura registada pelo Termómetro de IV para as diferentes irradiações realizadas na experiência B.2.1.

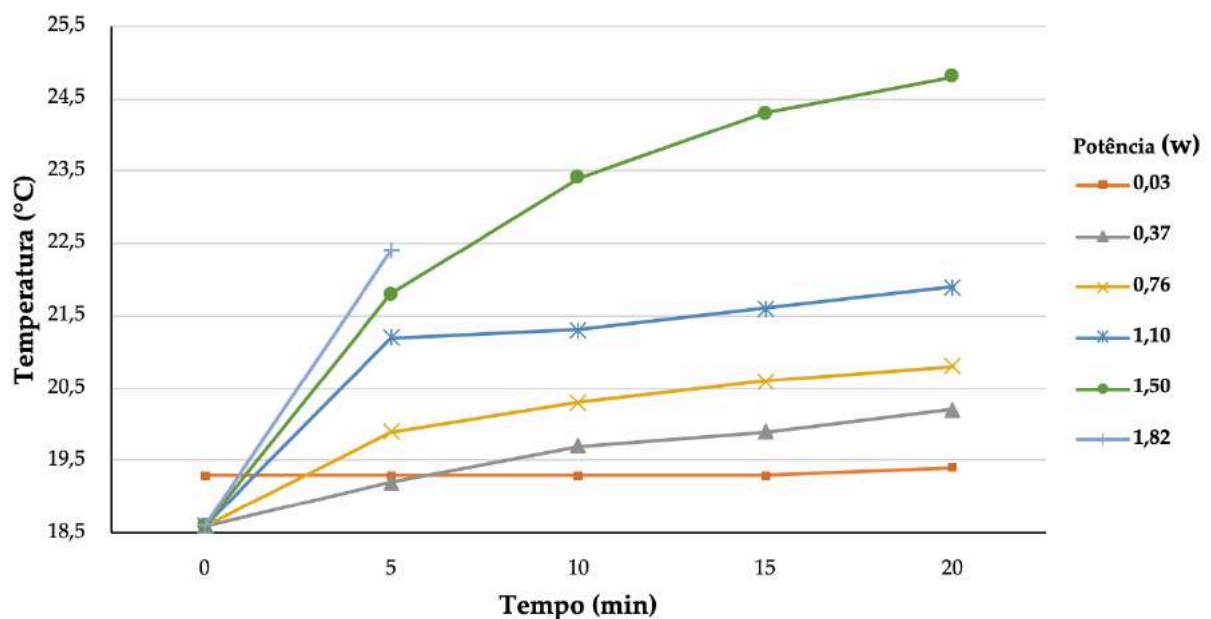


Figura 6.5: Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma B registada para as diferentes irradiações do fantoma B.2.1 ao longo dos 20 minutos de cada irradiação.

Podemos verificar pelo gráfico anterior que o aumento da potência do feixe laser origina maiores variações totais da temperatura superficial do fantoma. A maior temperatura final é de 24,8°C e foi alcançada na irradiação com a potência de 1,50 W. O que indica que a maior variação total de temperatura foi obtida para esta potência, tendo sido de 6,2°C.

Verificamos ainda que para a potência de 1,82 W o teste foi interrompido ao final do minuto 5 de irradiação, tendo-se atingido 22,4°C de temperatura.

Por sua vez, o gráfico da Figura 6.6 permite avaliar a variação de temperatura registada em cada intervalo de tempo para as diferentes potências.

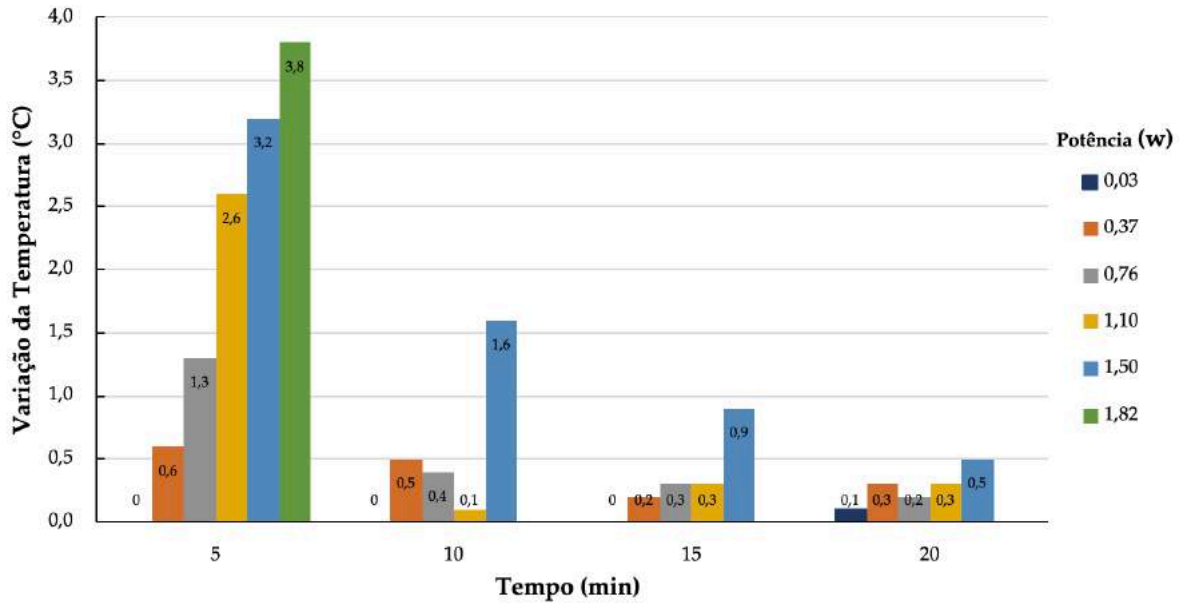


Figura 6.6: Variação da temperatura na superfície do fantoma B.2.1 nos diversos intervalos de leitura realizados ao longo dos 20 minutos.

Verificamos pelo gráfico que a potência de 0,03 W não originou variação da temperatura superficial do fantoma nos primeiros 15 minutos de irradiação, tendo-se registado uma variação de 0,1°C nos últimos 5 minutos da irradiação. Para os primeiros 5 minutos de irradiação, o aumento sucessivo da potência do feixe laser originou variações também elas sucessivamente maiores. Após os 5 primeiros minutos a irradiação com a potência de 1,82 W o fantoma cedeu e a irradiação foi interrompida. As potências 0,37 W, 0,76 W e 1,50 W originam uma diminuição da variação da temperatura com o passar do tempo para os primeiros 15 minutos de irradiação. As restantes potências não possuem um padrão de variação de temperatura da superfície, sendo que esta aumenta ou diminui aleatoriamente ao longo dos 20 minutos de irradiação. No caso da potência 1,10 W verifica-se uma diminuição abrupta da variação da temperatura após os primeiros 5 minutos de irradiação de 2,1°C para 0,1°C, sendo que nos seguintes intervalos a variação oscila entre 0,1°C e 0,3°C. A variação de temperatura máxima ocorreu logo nos primeiros 5 minutos de irradiação para a potência de 1,82 W, sendo ela de 3,8°C. Considerando apenas as potências que não originaram deformação do fantoma, a variação máxima foi de 3,2°C e ocorre para a potência de 1,50 W também após os 5 minutos de irradiação.

O gráfico da Figura 6.7 regista a evolução da temperatura lida pelo Termómetro de IV em intervalos de 5 minutos para todas as irradiações realizadas no fantoma B.2.2.

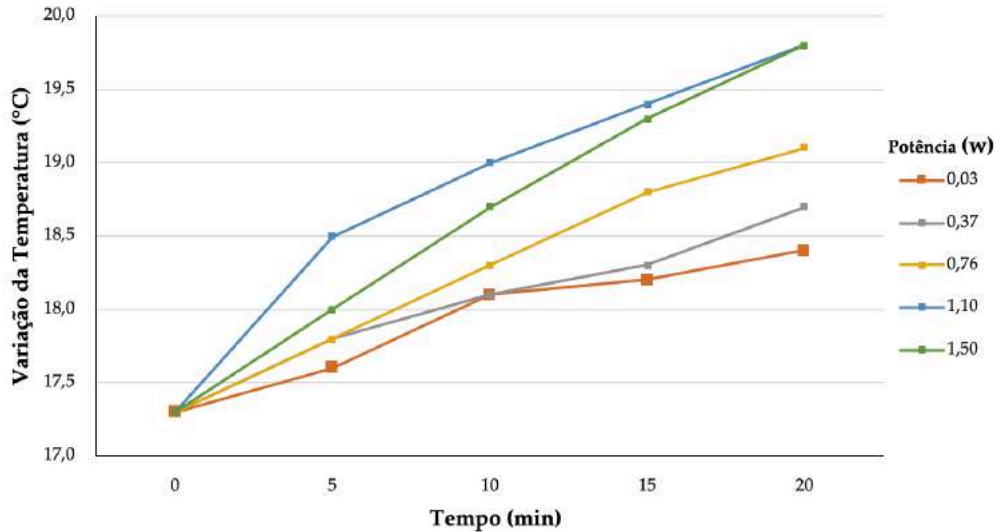


Figura 6.7: Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma B.2 registada para as diferentes irradiações da experiência B.2.2 ao longo dos 20 minutos de cada irradiação.

Verificamos que o aumento da potência origina temperaturas finais na superfície do fantoma sucessivamente superiores, sendo a máxima de 19,8°C atingida para as potências de 1,10 W e 1,50 W. As potências inferiores originaram menores variações totais de temperatura. A menor temperatura registada foi de 18,4°C para a potência de 0,03 W.

Por sua vez, o gráfico da Figura 6.8 permite avaliar a variação de temperatura registada em cada intervalo de tempo para as diferentes potências.

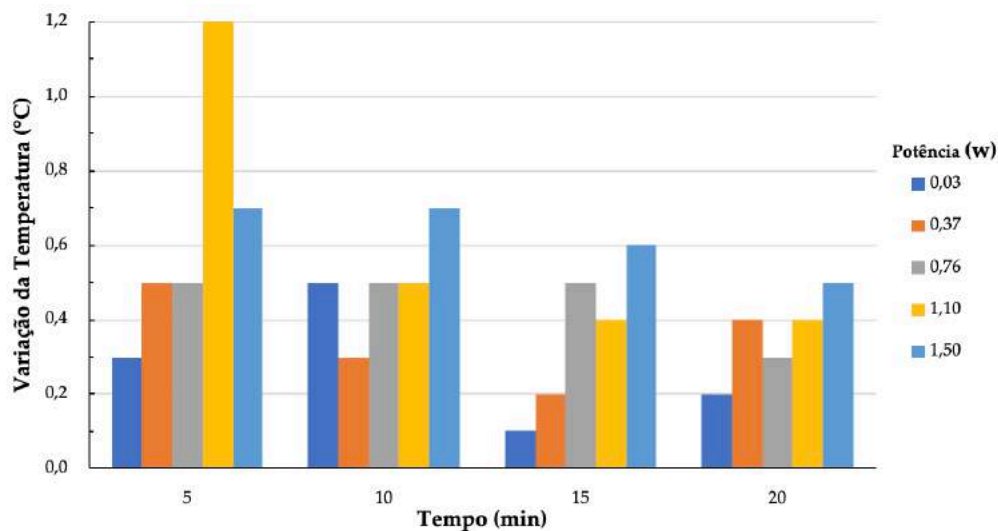


Figura 6.8: Variação da temperatura na superfície do fantoma B.2 nos diversos intervalos de leitura realizados ao longo dos 20 minutos.

Em todas as irradiações, a maior variação de temperatura ocorreu logo nos primeiros 5 minutos de irradiação, sendo este o intervalo que possui maiores valores de variação de temperatura para o ensaio em análise. Após os primeiros 5 minutos de irradiação, as potências 0,76 W, 1,10 W e 1,50 W diminuíram a variação de temperatura na superfície do fantoma. Por sua vez, a potência de 0,03 W oscilou entre

aumentos e diminuições da variação ao longo dos 20 minutos de irradiação para cada intervalo de leitura. Já a potência de 0,37 W verificou uma diminuição para os três primeiros intervalos de leitura, seguindo-se um aumento da variação nos últimos 5 minutos de irradiação. No final dos últimos 5 minutos de irradiação para a potência de 1,50 W inicia-se o processo de deformação da superfície do fantoma com o surgimento de bolhas de ar entre o absorvedor e a interface ar-fantoma. Posto isto, a última potência utilizada neste ensaio foi a de 1,50 W. A maior variação é de 1,2°C e ocorre para a potência de 1,10 W nos primeiros 5 minutos de irradiação. Por outro lado, a menor variação é de 0,1°C e ocorre para a potência de 0,03W ao fim de 15 minutos de irradiação.

6.1.1.3 Fantoma C

Como referido anteriormente, o estudo realizado sobre a segunda versão do fantoma C coincidiu com a avaria do Termómetro de IV e por essa razão a recolha dos valores da temperatura superficial do fantoma só foi possível para o fantoma C.1. Os valores de temperatura no interior do absorvedor com recurso ao Termopar são apresentados para ambas as versões do fantoma C.

A Figura 6.9 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro regista a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termómetro de IV na experiência C.1.a.

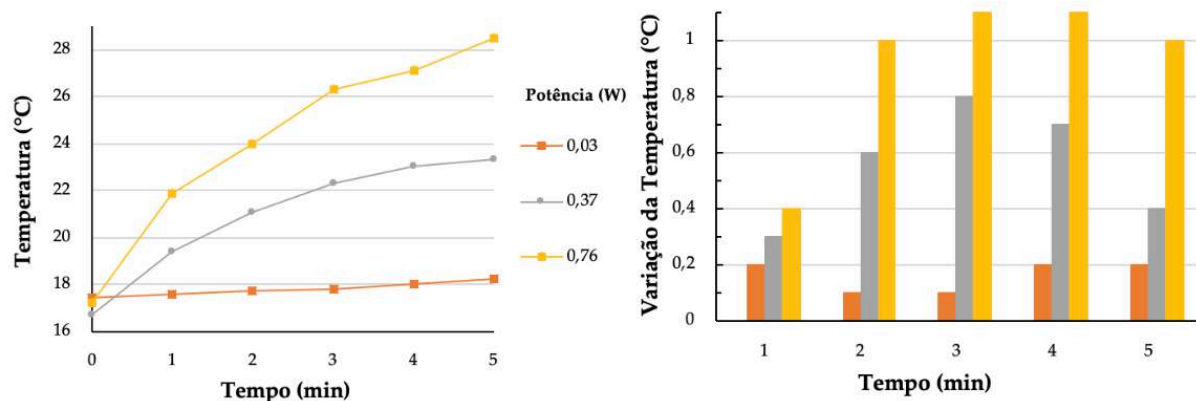


Figura 6.9: (a) Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.a. (b) Gráfico da variação da temperatura na superfície do fantoma no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.a.

Com base nos gráficos de evolução da temperatura verifica-se que o aumento consecutivo da potência do feixe laser origina o sucessivo aumento da temperatura na superfície do fantoma para cada intervalo de leitura. Para a potência de 0,03 W a temperatura à superfície do fantoma mantém-se aproximadamente constante ao longo dos 5 minutos de irradiação, variando o máximo de 0,2°C para o primeiro e dois últimos minutos de irradiação. Nos restantes minutos a variação foi de apenas 0,1°C. O aumento da potência do feixe laser para 0,37 W origina também um aumento da variação de temperatura e total em ambos os locais de medição da temperatura para cada intervalo de leitura, ao longo da irradiação.

As variações na superfície do fantoma atingem agora valores máximos de $0,8^{\circ}\text{C}$ para o terceiro minuto de irradiação, enquanto que o absorvedor registra variações máximas de $2,7^{\circ}\text{C}$ ao final do primeiro minuto. No caso do absorvedor verifica-se ainda uma diminuição dos valores de variação com o passar do tempo, sendo a menor variação de $0,3^{\circ}\text{C}$ ao se atingir o minuto 5 de irradiação. Desta forma, para a potência de $0,37\text{ W}$, a superfície do fantoma verifica uma variação de temperatura total de $2,8^{\circ}\text{C}$ e o interior do absorvedor uma variação total de $6,6^{\circ}\text{C}$. Para a potência do feixe laser de $0,76\text{ W}$ verifica-se um novo aumento dos valores de variações na superfície do fantoma e no interior do absorvedor. Assim, para a potência de $0,76\text{ W}$, a superfície do fantoma registra uma variação total de temperatura de $4,6^{\circ}\text{C}$. A Figura 6.10 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro registra a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termómetro de IV na experiência C.1.b. A variação da temperatura superficial do fantoma não é linear. Neste caso, a experiência inicia-se com a potência do feixe laser de $0,76\text{W}$ devido à avaria do Termómetro de IV mencionada anteriormente. Para esta potência, verifica-se um aumento consecutivo da variação de temperatura desde os $0,1^{\circ}\text{C}$ para os 2 primeiros minutos de irradiação, até aos $0,6^{\circ}\text{C}$, para os últimos 2 minutos de irradiação, perfazendo um aumento total de temperatura de $1,9^{\circ}\text{C}$. O aumento da potência do feixe laser para $1,10\text{ W}$ também origina um aumento dos valores de variação para valores compreendidos entre $0,4^{\circ}\text{C}$ e $0,8^{\circ}\text{C}$, originando um aumento total da temperatura de $3,1^{\circ}\text{C}$. As restantes potências também originam sucessivos valores de variação superiores. Desta forma, registam-se variações totais de temperatura de $3,9^{\circ}\text{C}$, $5,7^{\circ}\text{C}$ e $5,9^{\circ}\text{C}$ para as potências de $1,50\text{ W}$, $1,82\text{ W}$ e $2,30\text{ W}$ respetivamente.

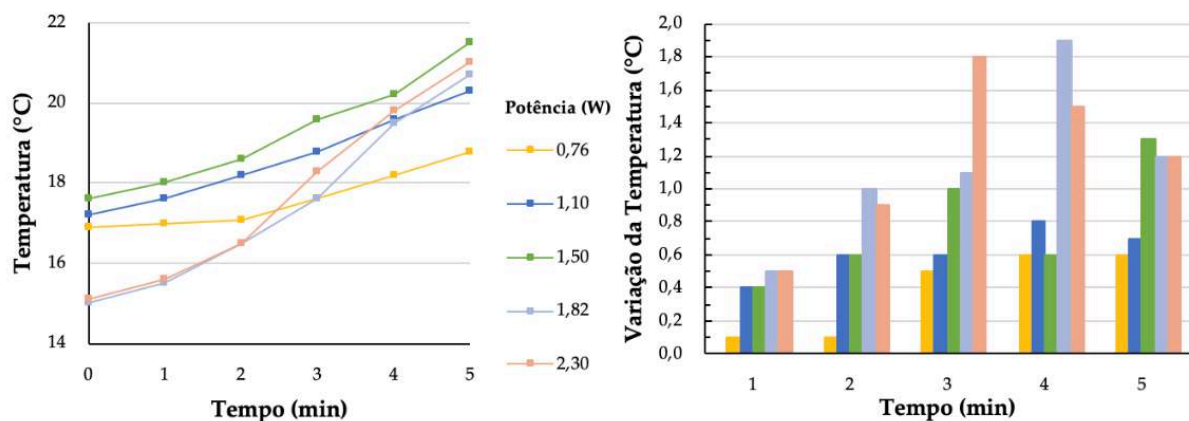


Figura 6.10: (a) Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.b. (b) Gráfico da variação da temperatura na superfície do fantoma no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.b.

A Figura 6.9 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro regista a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termómetro de IV na experiência C.1.c.

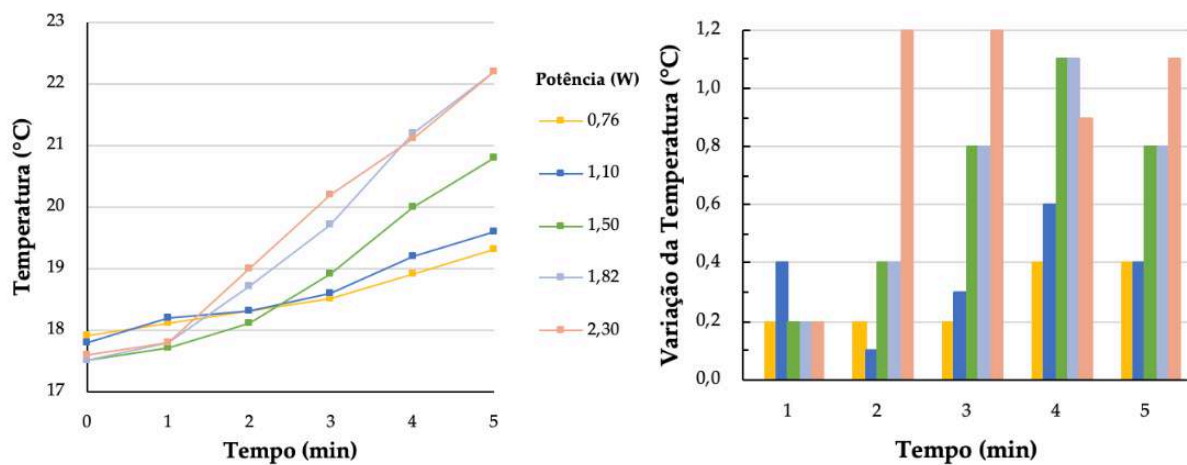


Figura 6.11: (a) Gráfico da evolução da temperatura na superfície do fantoma para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.c. (b) Gráfico da variação da temperatura na superfície do fantoma no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.c.

A superfície do fantoma regista variações inferiores às lidas no interior do absorvedor. O valor máximo da variação de temperatura verificada em cada ensaio aumenta com o aumento da potência do feixe laser até à potência de 1,82 W. Para a potência seguinte de 2,30 W verifica-se uma ligeira diminuição neste valor de 1,5°C para 1,2°C. No que toca à variação total de temperatura registada em cada ensaio, verifica-se um aumento com o aumento da potência do feixe laser até à potência de 1,50 W. Para a potência seguinte verifica-se a diminuição do valor de 6,2°C para 4,7°C. Para a potência 2,30 W, surgiram bolhas de ar na superfície do absorvedor, no final do minuto 4 de irradiação.

6.1.2 Termómetro Termopar

6.1.2.1 Fantoma C

A Figura 6.10 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro regista a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termopar para a experiência C.1.a.

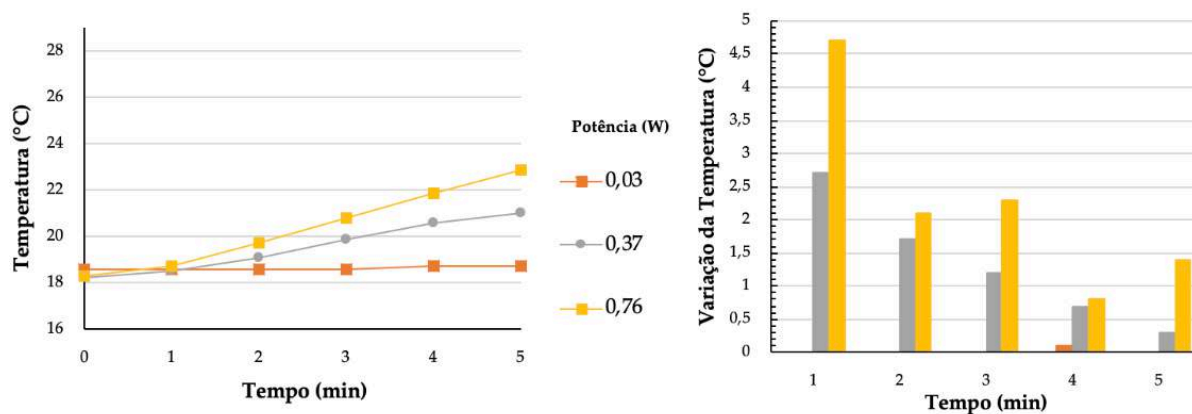


Figura 6.12: (a) Gráfico da evolução da temperatura no interior do absorvedor para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.a. (b) Gráfico da variação da temperatura no interior do absorvedor no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.a.

Com base nos gráficos de evolução da temperatura verifica-se que o aumento consecutivo da potência do feixe laser origina o sucessivo aumento da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura. Para a potência de 0,03 W a variação de temperatura para a mesma potência ocorre apenas ao fim do quarto minuto de irradiação e é de 0,1°C. O que perfaz um total de 0,8°C de variação total de temperatura para a superfície do fantoma e de 0,1°C para o interior do absorvedor, para a potência de 0,03 W. O aumento da potência do feixe laser para 0,37 W origina ainda uma diminuição dos valores de variação com o passar do tempo, sendo a menor variação de 0,3°C ao se atingir o minuto 5 de irradiação. Desta forma, para a potência de 0,37 W, a superfície do fantoma verifica uma variação de temperatura total de 2,8°C e o interior do absorvedor uma variação total de 6,6°C.

Para a potência do feixe laser de 0,76 W a variação é máxima após primeiro minuto de irradiação com o valor de 4,7°C, ocorrendo em seguida a diminuição deste valor para mínimos de 0,8°C no minuto 4 e por fim um aumento para 1,4°C no final da irradiação. Assim, para a potência de 0,76 W, o interior do absorvedor regista uma variação total de 11,3°C.

A Figura 6.10 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro regista a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termopar na experiência C.1.b. No interior do absorvedor verificamos que o aumento da potência do feixe laser até 1,50 W origina um aumento da variação total da temperatura. Para a potência inicial de 0,37 W os valores de variação não são superiores a 0,1°C enquanto que para a potência de 0,76 W verificamos uma variação máxima de 1°C para o minuto três de irradiação. No que toca à variação total de temperatura, a potência de 0,37 W atinge os 0,3°C e a potência de 0,76 W os 3,1°C. Ao aumentar a potência para 1,10 W e 1,50 W, o valor máximo da variação aumenta para 1,9°C e 2,3°C respetivamente, após o segundo minuto de irradiação em ambas as potências. Já a variação total de temperatura ao longo dos 5 minutos de irradiação para ambas as potências totaliza 5,4°C e 9,3°C. Após a potência de 1,50 W

verifica-se uma diminuição do valor máximo de variação da temperatura para $1,4^{\circ}\text{C}$ na potência de $1,82\text{W}$. Seguindo-se um novo aumento para $2,4^{\circ}\text{C}$ com a potência do feixe laser de $2,30\text{W}$. mente à variação total de temperatura, a potência de $1,82\text{W}$ regista $5,6^{\circ}\text{C}$ e a potência de $2,30\text{W}$, regista $8,4^{\circ}\text{C}$.

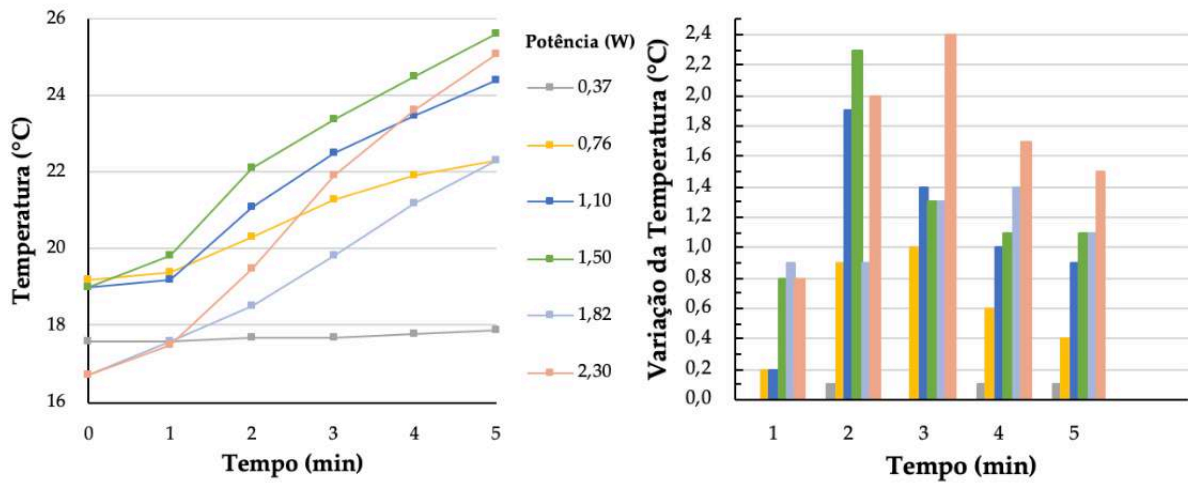


Figura 6.13: (a) Gráfico da evolução da temperatura no interior do absorvedor para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.b. (b) Gráfico da variação da temperatura no interior do absorvedor no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.b.

A Figura 6.10 apresenta dois gráficos dos quais o primeiro regista a evolução da temperatura e o segundo mostra a variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termopar na experiência C.1.c.

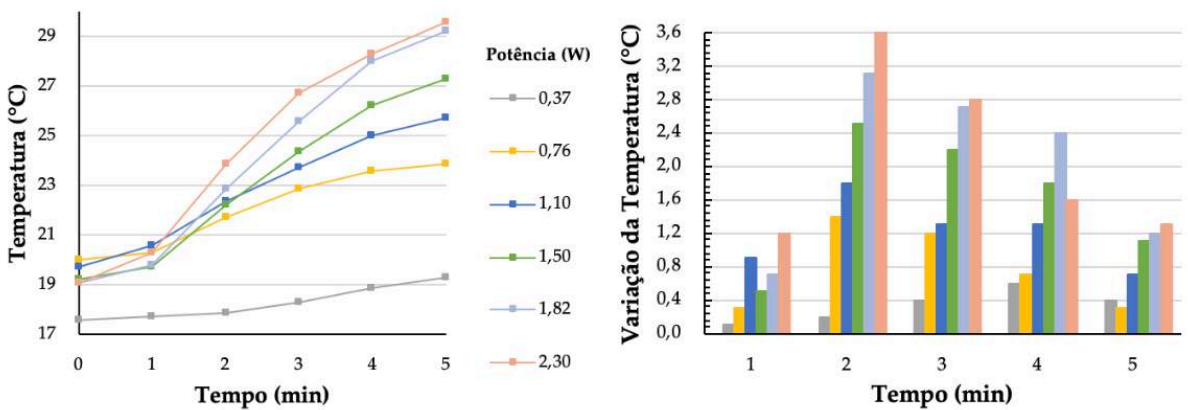


Figura 6.14: (a) Gráfico da evolução da temperatura no interior do absorvedor para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.c. (b) Gráfico da variação da temperatura no interior do absorvedor no final de cada intervalo de leitura para as diferentes irradiações realizadas durante a experiência C.1.c.

Para o caso da temperatura lida no interior do absorvedor, o aumento da potência do feixe laser origina o aumento do valor máximo da variação de temperatura em cada ensaio desde os $0,6^{\circ}\text{C}$ até aos $3,6^{\circ}\text{C}$ de variação. Verificamos ainda que para o interior do absorvedor, a maior variação de temperatura ocorre frequentemente para o segundo minuto de irradiação, seguindo-se uma diminuição dessa variação ao longo dos 5 minutos de irradiação. Adicionalmente, o maior valor de variação foi de $3,6^{\circ}\text{C}$ e foi

registado para a potência de 2,30 W, ao final do minuto 2 de irradiação. Em relação à variação total de temperatura no final de cada ensaio, verifica-se um aumento sucessivo desde os 1,7°C registados na potência 0,37 W até aos 10,5°C registados na potência 2,30 W.

Para a experiência realizada sobre o fantoma C.2 com espessura de 1 mm (experiência C.2.a) foi utilizada apenas uma potência de feixe laser durante 25 minutos de irradiação contínua. No final dos 25 minutos formaram-se bolhas de ar na superfície do absorvedor, tendo-se interrompido a experiência.

O gráfico da Figura 6.15 apresenta um gráfico da variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura realizada com recurso ao Termopar para a experiência C.2.a.

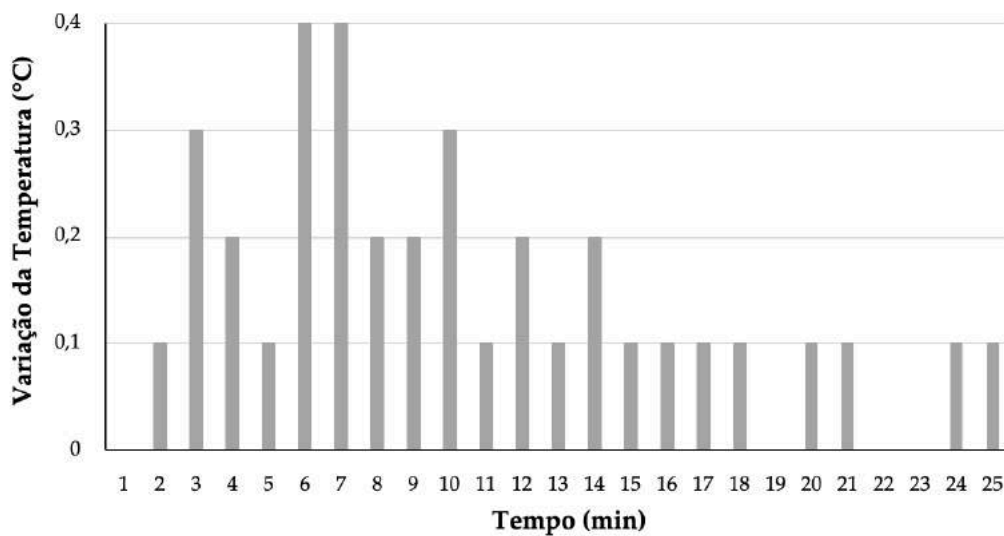


Figura 6.16: Variação da temperatura no interior do absorvedor para os 25 minutos de irradiação com a potência de 0,37 W sob o fantoma C.2.a.

Observando o gráfico anterior verifica-se que há um aumento da variação da temperatura até ao máximo de 0,4°C no minuto 7 de irradiação, seguindo-se uma diminuição até aos 0°C no minuto 19. Para os instantes finais da irradiação, nomeadamente a partir do minuto 15, a variação de temperatura ronda apenas os 0,1°C ou mesmo 0°C. A variação total de temperatura verificada no interior do absorvedor para as condições em estudo, no final dos 25 minutos de irradiação, foi de 3,6°C. A evolução da temperatura no interior do absorvedor ao longo da irradiação é registada no gráfico da Figura 6.16.

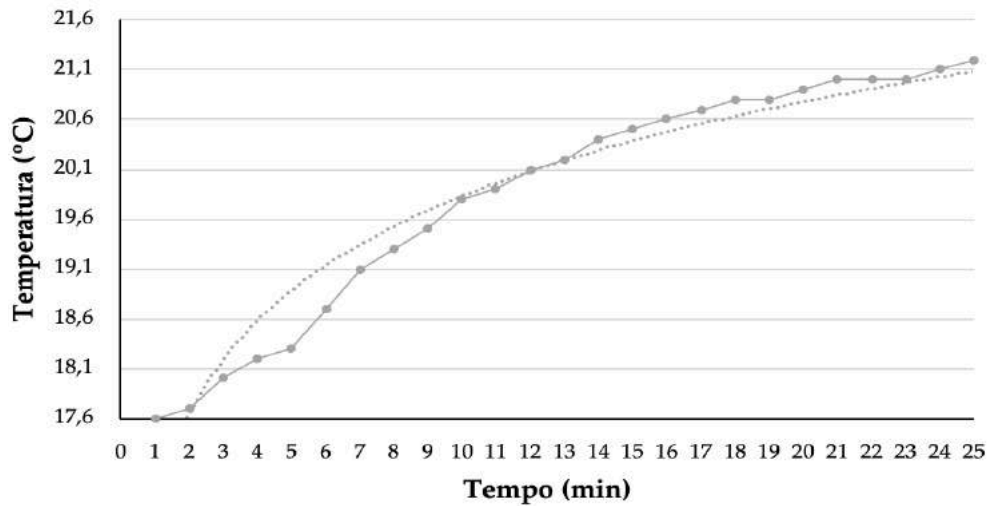


Figura 6.16: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.a. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Pelo gráfico anterior verificamos que os diferentes valores de temperatura no interior do absorvedor ao longo da irradiação apresentam um comportamento aproximado ao da linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.1 com um erro quadrático mínimo de 0,94.

$$y = 1,37\ln(x) + 16,69 \quad (6.1)$$

O ajuste obtido é relativamente bom, uma vez que o erro obtido é próximo do valor máximo 1,00. Adicionalmente, os valores de temperatura verificam um aumento rápido seguido de uma estabilização, comportamento este que é típico para uma linha de tendência logarítmica.

Por forma a melhor compreender o que ocorre em cada intervalo de aproximadamente 5 minutos da irradiação, foram construídas linhas de tendência da evolução dos dados para os diferentes intervalos ao longo de toda a irradiação. Como demonstrado no gráfico da Figura 6.17, a evolução da temperatura tem diferentes comportamentos nos diferentes intervalos considerados. Os comportamentos são identificados pela construção da linha de tendência para cada um dos respetivos intervalos.

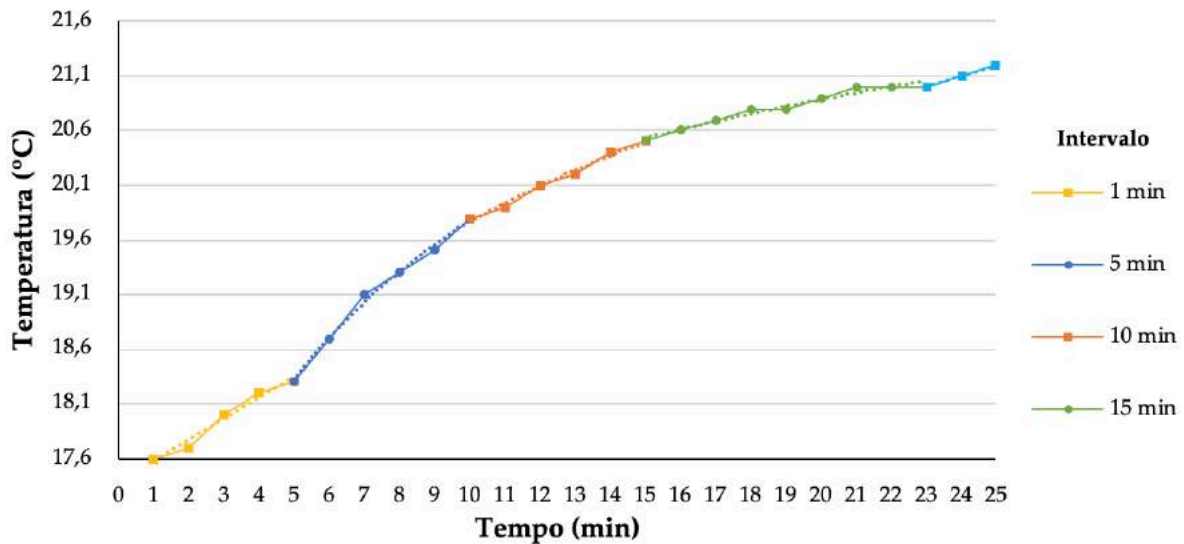


Figura 6.17: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.a. As linhas a pontilhado correspondem às linhas de tendências linear e logarítmica construídas com base nos valores de temperatura obtidos em cada intervalo.

Analisando o gráfico anterior, verifica-se que para o primeiro intervalo de 5 minutos considerado (representado no gráfico da Figura 6.17 com a linha amarela e a legenda “1 min”) o aumento da temperatura é linear e estável cuja evolução pode ser aproximada à linha de tendência linear definida pela equação 6.2 com o erro quadrático mínimo de 0,97.

$$y = 0,19x + 17,39 \quad (6.2)$$

No caso do segundo e terceiro intervalos considerados, a duração é também de 5 minutos (representados no gráfico com a linha azul e amarela e com a legenda de “5 min” e “10 min” respectivamente), mas o comportamento da evolução da temperatura, por sua vez, pode ser aproximado às linhas de tendência logarítmica definidas pelas equações 6.3 e 6.4 com erros mínimos de 0,99 em ambos os intervalos.

$$y = 2,10\ln(x) + 14,94 \quad (6.3)$$

$$y = 1,79\ln(x) + 15,63 \quad (6.4)$$

Em seguida, o quarto intervalo que se inicia no final do minuto 15 (representado no gráfico com a linha de cor verde e a legenda de “15 min”) tem a duração de 8 minutos e segue o mesmo comportamento aproximadamente logarítmico dos intervalos anteriores podendo ser aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.5 com um erro quadrático mínimo de 0,96.

$$y = 1,23\ln(x) + 17,20 \quad (6.5)$$

Por fim, considera-se um intervalo mais curto de apenas 3 minutos (representado no gráfico com a linha azul *cien* e com a legenda de “23 min”) cujo comportamento é novamente linear podendo ser aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.6 com um erro quadrático mínimo de aproximadamente 1,00.

$$y = 0,10x + 18,70 \quad (6.6)$$

No que respeita à variação da temperatura no interior do absorvedor para os diferentes intervalos de leitura ao longo da irradiação, atentemos no intervalo dos 15 aos 23 minutos de irradiação, nos quais a variação ronda apenas os $0,1^{\circ}\text{C}$ ou mesmo 0°C . Com base neste comportamento podemos inferir o estabelecimento de um equilíbrio no interior do absorvedor para o intervalo considerado, na medida em que a variação de temperatura no interior do absorvedor não é significativa comparativamente com as variações anteriormente registadas. Neste intervalo, o aumento total da temperatura foi de apenas $0,5^{\circ}\text{C}$, o que representa um aumento de apenas $0,063^{\circ}\text{C}$ por minuto. Por outro lado, nos últimos 2 minutos da irradiação surge um novo aumento de $0,1^{\circ}\text{C}$ por minuto. Este acontecimento poderá ser indicador da iminente cedência do fantoma que ocorreu logo no final dos 25 minutos de irradiação. Analisando o gráfico da Figura 6.16, em particular o intervalo inicial de 5 minutos, poderia esperar-se um aumento de temperatura superior que verificasse um maior grau de coincidência com a linha de tendência. Nestes primeiros minutos, o aumento de temperatura é reduzido, sendo que a partir do minuto 7 já se verifica um aumento mais acentuado e aproximadamente contínuo até ao minuto 21. Sabendo que a temperatura ambiente registada durante o ensaio em estudo foi de 19°C e que a temperatura inicial no interior do absorvedor era de $17,6^{\circ}\text{C}$, poderá haver uma influência da temperatura ambiente sobre a evolução da temperatura no interior do absorvedor nos primeiros minutos de irradiação até se atingir o equilíbrio, próximo do minuto 7.

Para a experiência realizada sobre o fantoma C.2.b foram utilizadas diferentes potências de feixe laser desde os $0,37\text{ W}$ até $1,10\text{ W}$, durante 25 minutos de irradiação contínua. Para a potência final de $1,10\text{ W}$, a irradiação durou apenas 12 minutos, devido à cedência do fantoma que ocorreu no final do minuto 12. A Figura 6.18 regista os valores da variação no interior do absorvedor para cada instante de leitura da irradiação sob a primeira potência utilizada de $0,37\text{ W}$ na experiência C.2.b.

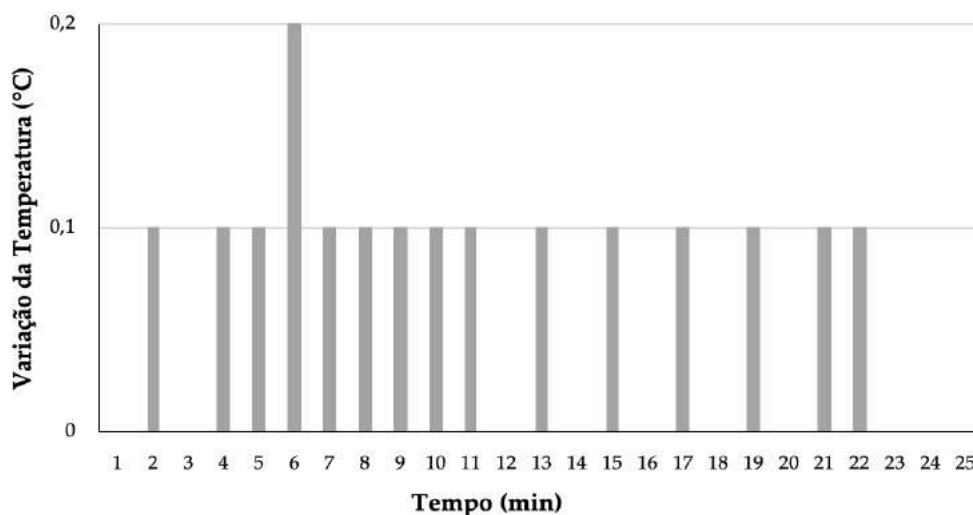


Figura 6.18: Variação da temperatura no inteiro do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.b.

Para a potência de 0,37 W, a variação de temperatura no interior do absorvedor não ultrapassou os 0,2°C que se verificaram apenas no final do minuto 6 de irradiação. Os restantes intervalos de tempo verificaram sempre variações de 0,1°C ou 0°C. Para os intervalos posteriores ao minuto 2 verifica-se o aumento médio de temperatura de 0,1°C por minuto até ao minuto 10 de irradiação, passando-se depois para um aumento de 0,1°C por cada dois minutos. No que respeita à variação de temperatura total para os 25 minutos de irradiação esta foi de 1,6°C.

O gráfico da Figura 6.19 regista a temperatura para cada intervalo de leitura ao longo da irradiação do fantoma com a potência de 0,37 W.

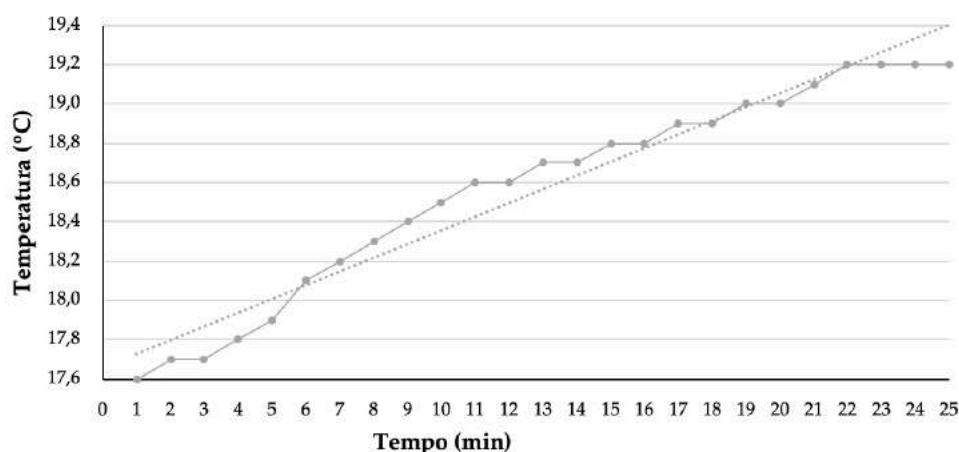


Figura 6.19: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.b. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência linear construída com base nos valores de temperatura.

A análise do gráfico anterior permite obter uma visão geral da variação da temperatura ao longo da irradiação. Como podemos verificar pela linha de tendência construída com base nos dados recolhidos definida pela equação 6.7 com um erro quadrático mínimo de 0,96 a evolução da temperatura ao longo da irradiação consiste num aumento aproximadamente linear da mesma.

$$y = 0,07x + 17,66 \quad (6.6)$$

No início da irradiação, o interior do fantoma verifica a temperatura de 17,6°C aumentando até aos 19,2°C, no final da irradiação.

Segue-se o aumento da potência do feixe laser para 0,76 W. O gráfico da Figura 6.20 regista as variações de temperatura para cada intervalo de leitura para a irradiação do fantoma com a potência de 0,76 W.

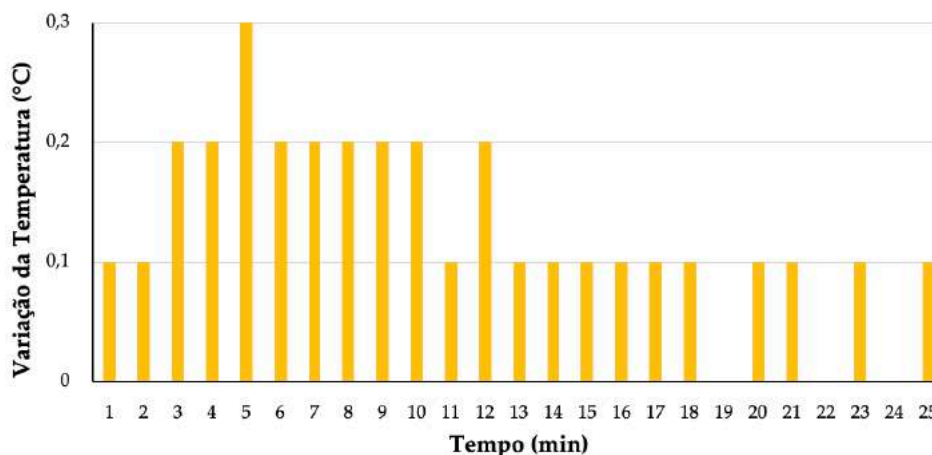


Figura 6.20: Variação da temperatura no inteiro do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência C.2.b.

Verificamos que a irradiação com a potência de 0,76 W originou variações de temperatura não superiores a 0,3°C, atingidos no final do minuto 5. Para os seguintes minutos, a variação da temperatura manteve-se nos 0,2°C até ao minuto 12, seguindo-se uma diminuição para os 0,1°C que se manteve constante até ao final dos 25 minutos de irradiação. Nos últimos 10 minutos da irradiação existem intervalos de leitura para os quais não ocorre qualquer variação, como são exemplo os minutos 19 e 22. De uma forma geral, para o ensaio em estudo, ocorre um aumento dos valores de variação de temperatura no interior do fantoma, seguido de uma diminuição. No que respeita à variação total da temperatura ao longo do ensaio, regista-se um aumento relativamente à variação verificada para a potência anterior, sendo este valor de 3,3°C para a potência de 0,76 W.

O gráfico da Figura 6.21 regista os valores de temperatura absoluta verificados em cada instante de leitura da temperatura para a irradiação total de 25 minutos sob a potência de 0,76 W.

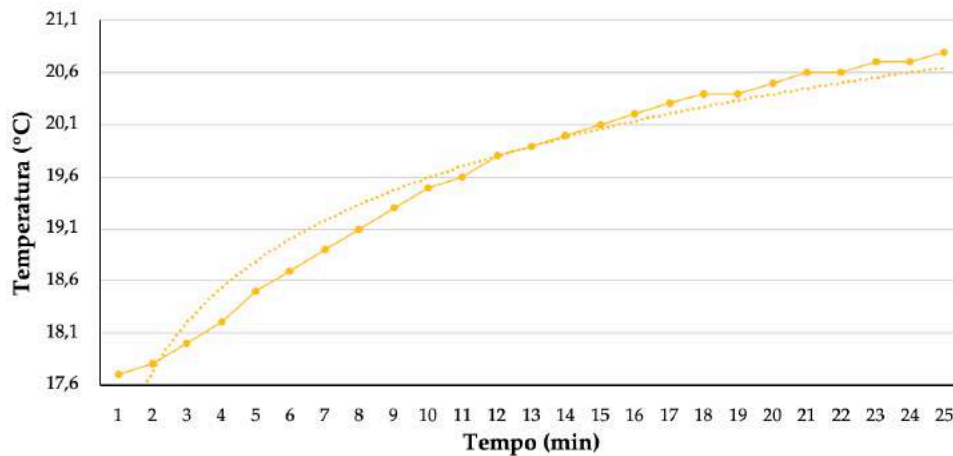


Figura 6.21: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência C.2.b. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Os valores de temperatura registados ao longo dos 25 minutos de irradiação para a potência de 0,76 W apresentam um comportamento que pode ser aproximado ao da linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.7 com um erro quadrático mínimo de 0,95.

$$y = 1,16\ln(x) + 16,93 \quad (6.7)$$

Verifica-se um aumento rápido da temperatura até ao minuto 12 aproximadamente, seguido de um aumento menos acentuado a partir deste mesmo minuto. Em termos de temperatura absoluta verifica-se que o interior do absorvedor iniciou com a temperatura de 17,6°C tendo atingido os 20,8°C no final dos 25 minutos de irradiação.

Por forma a compreender melhor a evolução da temperatura em diferentes intervalos de tempo da irradiação, o conjunto de dados anterior foi dividido em três intervalos distintos com comportamentos semelhantes no conjunto. Tal está representado abaixo no gráfico da Figura 6.22. Mais uma vez, a temperatura inicial no interior do absorvedor foi de 17,6°C. Para os 10 primeiros minutos da irradiação a temperatura verifica um aumento linear da até aos 19,5°C, que pode ser aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.8 com um erro quadrático associado de aproximadamente 1,00.

$$y = 0,21x + 17,42 \quad (6.8)$$

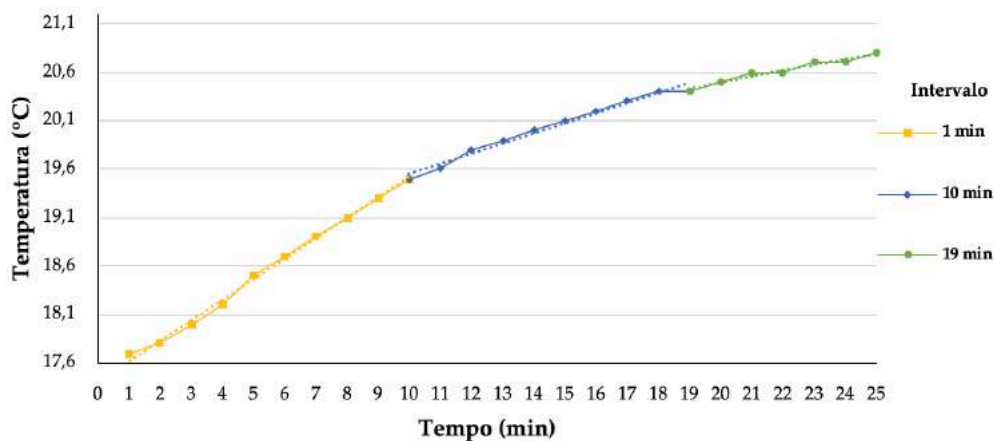


Figura 6.22: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência C.2.b. As linhas a pontilhado correspondem às linhas de tendência linear e logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Os 9 minutos seguintes da irradiação, registam também um aumento linear da temperatura até aos 20,4°C podendo este comportamento ser aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.9 com um erro mínimo de 0,98.

$$y = 0,10x + 18,51 \quad (6.9)$$

Por sua vez, nos últimos 6 minutos da irradiação, a evolução da temperatura registou um comportamento aproximado à linha de tendência linear definida pela equação 6.9 com um erro quadrático mínimo de 0,96, verificando-se uma variação total para este último intervalo de apenas 0,4°C.

$$y = 1,33\ln(x) + 16,50 \quad (6.10)$$

Verificamos assim que para os primeiros dois intervalos considerados, o aumento da temperatura ocorre a uma taxa superior ao verificado para o terceiro intervalo. A análise dos valores de temperatura absoluta em intervalos de tempo específicos permite constatar que a evolução da temperatura no interior do absorvedor regista um comportamento aproximadamente coincidente com o sucedido na irradiação anterior, excetuando a amplitude das variações.

Por fim, é utilizada a potência do feixe laser de 1,10 W cujas variações de temperatura no interior do absorvedor em cada intervalo de leitura estão reunidas no gráfico da Figura 6.23.

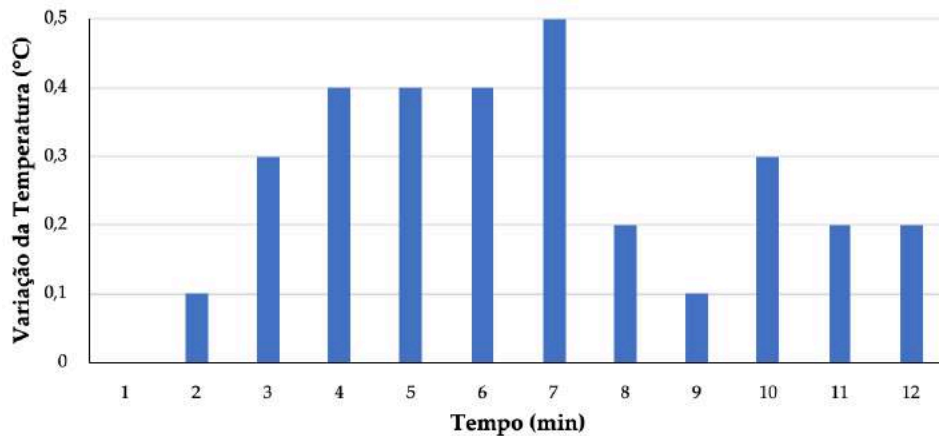


Figura 6.23: Variação da temperatura no inteiro do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 1,10 W realizada na experiência C.2.b.

A irradiação em estudo foi interrompida ao fim de 12 minutos devido ao surgimento de bolhas de ar na superfície do absorvedor. Este aumento da potência do feixe laser para 1,10 W origina maiores valores de variações de temperatura em cada intervalo de leitura, comparativamente com os verificados para a potência anterior. Para a potência de 1,10 W verifica-se que a variação de temperatura regista um aumento do seu valor até ao máximo de 0,5°C no minuto 7 de irradiação, seguido de uma diminuição até aos 0,1°C, no minuto 9. Segue-se um novo aumento dos valores de variação até aos 0,3°C, no minuto 10. Por outro lado, a variação total de temperatura registada no interior do absorvedor no final dos 12 minutos de irradiação foi de 3,1°C.

O gráfico da Figura 6.24 regista os valores absolutos de temperatura lidos para cada intervalo ao longo da irradiação sob a potência de 1,10 W.

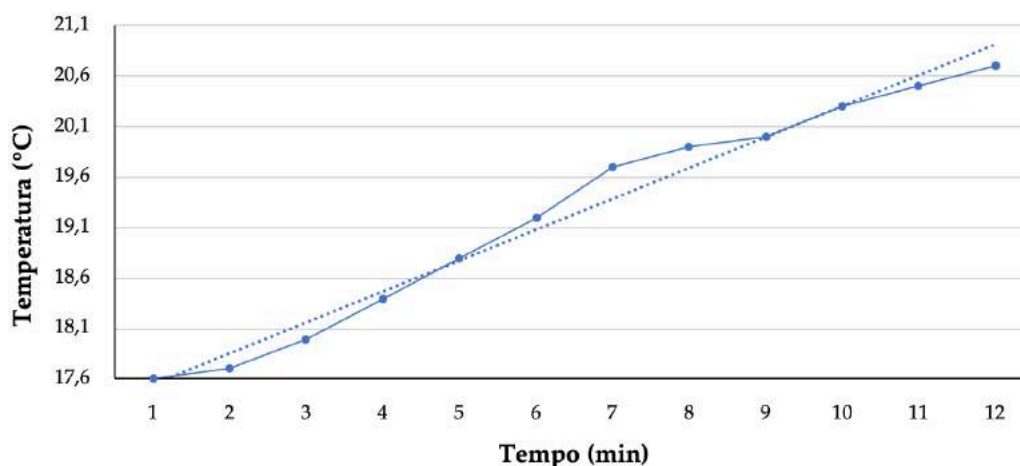


Figura 6.24: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 1,10 W realizada na experiência C.2.b. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência linear construída com base nos valores de temperatura.

Para a potência em estudo, os valores de temperatura registados ao longo da irradiação apresentam um comportamento linear aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.11 com um erro quadrático mínimo de 0,98.

$$y = 0,30x + 17,25 \quad (6.11)$$

Ao longo da irradiação verificou-se sempre um aumento de temperatura em cada intervalo de leitura superior ou igual a 0,1°C. Ainda que a irradiação tenha sido interrompida, o interior do absorvedor alcançou a temperatura de 20,7°C tendo começado com 17,6°C como as irradiações anteriores.

Analisando os resultados anteriormente apresentados, verifica-se que para a potência inicial de 0,37 W, a variação da temperatura no interior do absorvedor mantém-se constante nos 0,1°C por minuto logo após os 7 minutos de irradiação. Em particular, para os 3 últimos minutos da irradiação não ocorre qualquer variação da temperatura no interior do absorvedor, o que poderá indicar o estabelecimento do equilíbrio térmico entre o absorvedor e o feixe laser incidente. No caso da potência de 0,76 W o alcance do equilíbrio térmico torna-se evidente no final dos 12 minutos de irradiação. Após este instante, as variações de temperatura no final de cada minuto possuem valores reduzidos comparativamente com valor máximo registado para esta irradiação. Por sua vez, na irradiação com a potência de 1,10 W, não é possível antever o estabelecimento de um equilíbrio no interior do absorvedor, uma vez que a irradiação foi interrompida. Para a potência considerada, a evolução da temperatura ao longo da irradiação apresenta um aumento linear no tempo. No entanto, a variação de temperatura mínima verificada no final do minuto 9 logo após se ter atingido um máximo poderá estar relacionada com a cedência do fantoma que ocorreu de seguida.

De igual forma ao verificado na experiência anterior, na experiência realizada sobre o fantoma C.2 com espessura de 10 mm (experiência C.2.c) foram utilizadas diferentes potências de feixe laser desde os 0,37 W até 1,10 W, durante 25 minutos de irradiação contínua.

O gráfico da Figura 6.25 regista os valores da variação no interior do absorvedor para cada instante de leitura da irradiação sob a primeira potência utilizada de 0,37 W na experiência C.2.c.

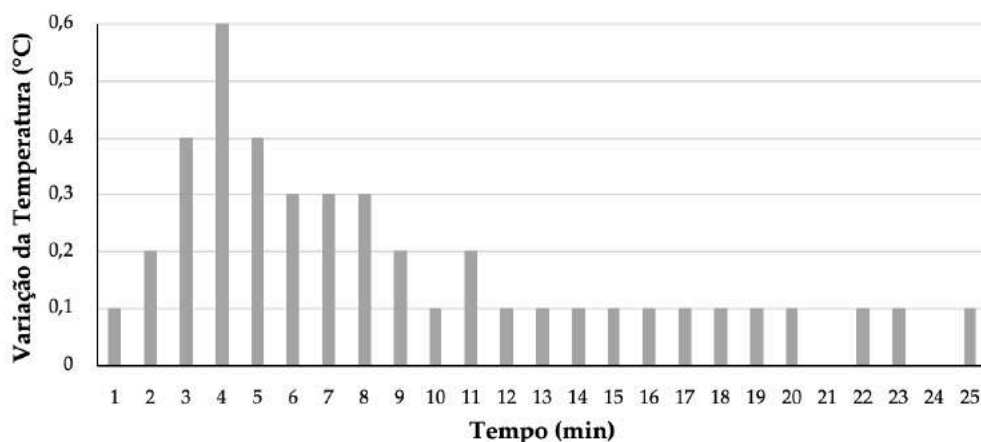


Figura 6.25: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.c.

No caso da irradiação com a potência de 0,37 W a variação de temperatura no interior do absorvedor atingiu o valor máximo de 0,6°C para o minuto 4 da irradiação. Verifica-se um aumento até este valor, seguido de uma diminuição até aos 0,1°C após os 12 minutos de irradiação. Após os 11 minutos de irradiação, a variação mantém-se constante nos 0,1°C. Adicionalmente, para os instantes 21 e 24 a variação é nula. Já a variação total de temperatura verificada no final da irradiação em estudo foi de 4,3°C. A evolução da temperatura no interior do absorvedor é registada no gráfico da Figura 14 para todos os intervalos de leitura ao longo da irradiação de potência de 0,37 W, sobre o feixe de espessura 10 mm.

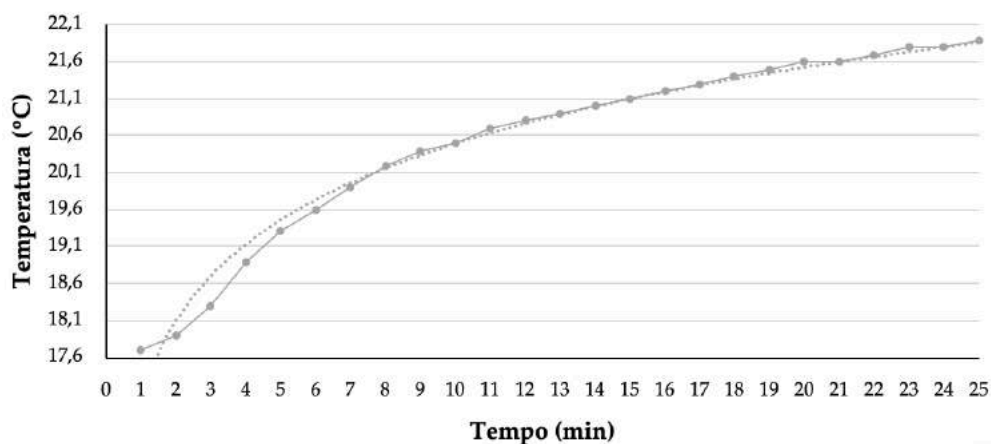


Figura 6.26: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.c. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Com base nos valores de temperatura em cada intervalo de leitura foi construída a linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.12 com o erro quadrático associado ao ajuste de 0,98.

$$y = 1,49\ln(x) + 17,07 \quad (6.12)$$

A análise dos mesmos permite identificar um aumento rápido dos valores da temperatura desde os 17,6°C iniciais até aos 20,5°C registados no minuto 10 da irradiação aproximadamente, seguindo-se um aumento mais lento no tempo até aos 21,9°C de temperatura final. Por sua vez, o aumento da potência do feixe laser para o valor de 0,76 W origina um novo aumento dos valores de variação da temperatura no final de cada intervalo de leitura, comparativamente com os registados na potência anterior. A evolução destes valores ao longo da irradiação é apresentada no gráfico da Figura 6.27.

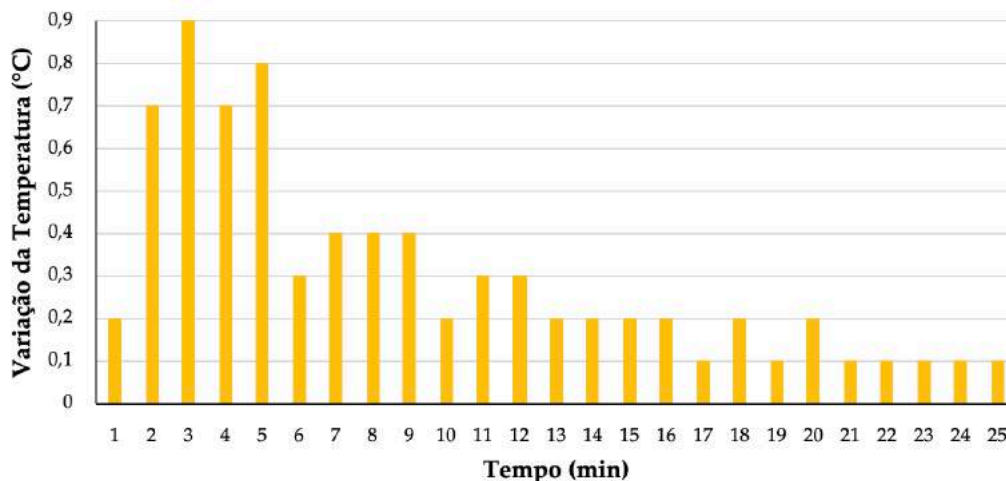


Figura 6.27: Variação da temperatura no inteiro do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência C.2.c.

O aumento da potência do feixe laser para o valor de 0,76 W provoca um aumento dos valores de variação da temperatura para o máximo de 0,9°C registados no final do minuto 3 de irradiação. Em média, os valores para a variação verificam um aumento até ao minuto 3 seguido de uma diminuição para os 0,1°C verificados no final do minuto 21 que se mantém constante para os últimos 5 minutos de irradiação. Após os primeiros 6 minutos de irradiação, a variação em cada intervalo difere apenas em $\pm 0,1^\circ\text{C}$. A variação total para a irradiação sob a potência de 0,76 W foi de 7,5°C. Valor este que é bastante superior ao obtido na potência anterior de 0,37 W.

O gráfico da Figura 6.28 reúne os valores de temperatura no interior do absorvedor registados no final de cada intervalo de leitura ao longo de toda a irradiação, sob a potência de 0,76 W.

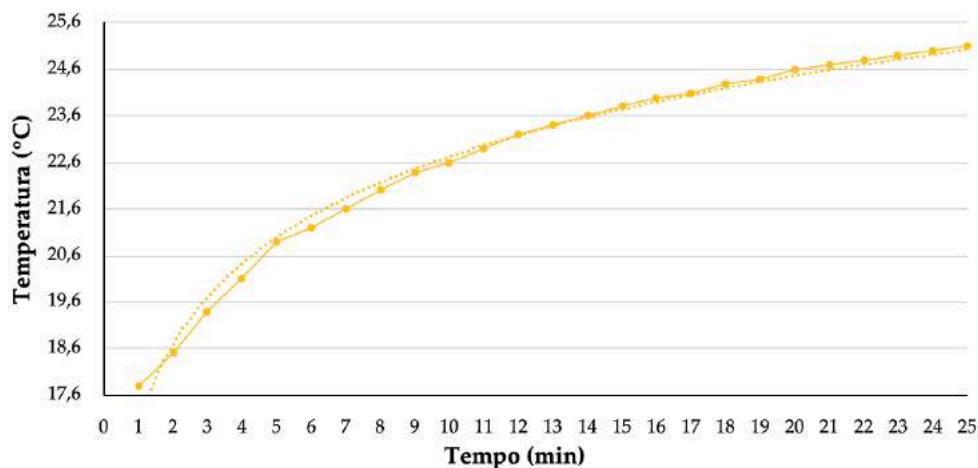


Figura 6.28: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência C.2.c. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Os valores de temperatura obtidos em cada intervalo de leitura apresentam um comportamento que pode ser aproximado à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.13 com um erro quadrático associado de 0,99.

$$y = 2,51\ln(x) + 16,95 \quad (6.13)$$

Para a potência de 0,76 W a temperatura inicial no interior do absorvedor é de 17,8°C e verifica um aumento rápido até aos 20,9°C, registados no minuto 5, seguido de um aumento menos acentuado até aos 22,6°C, registados no minuto 10 de irradiação. Por fim, a temperatura no interior do absorvedor continua a aumentar, mas agora a uma taxa inferior aos dois intervalos anteriores, atingindo-se os 25,1°C no final dos 25 minutos da irradiação. Temos assim, de um ponto de vista geral, uma taxa de variação de temperatura que vai diminuindo com o passar do tempo após os 10 minutos.

O comportamento logarítmico dos dados é corroborado pela linha de tendência construída que define um aumento inicialmente rápido e depois mais demorado.

Segue-se o aumento da potência do feixe laser para 1,10 W. Os valores de temperatura no interior do absorvedor registados ao longo da irradiação para cada intervalo de leitura, foram reunidos no gráfico da Figura 6.29.

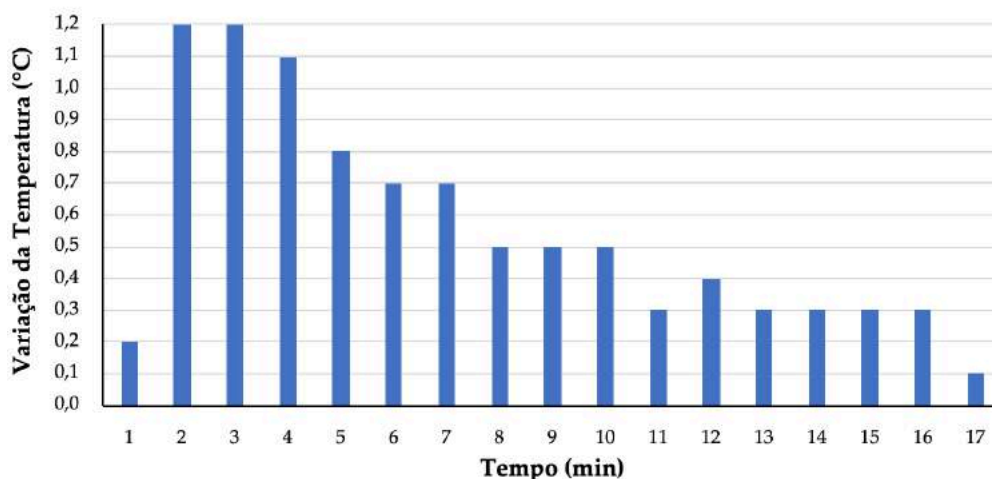


Figura 6.29: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 1,10 W realizada na experiência C.2.c.

Esta irradiação tem a duração de apenas 17 minutos, tendo sido interrompida devido ao surgimento de bolhas de ar visíveis na superfície do absorvedor no final do minuto 17. No final do segundo minuto de irradiação verifica-se um aumento máximo de temperatura no interior do absorvedor de 1,2°C. Seguidamente a este aumento verifica-se uma diminuição lenta do valor da variação no final de cada minuto até ao valor mínimo de 0,1°C registado para o minuto 17, prévio à formação das bolhas de ar na superfície do absorvedor. A variação total de temperatura verificada no interior do absorvedor para os 17 minutos de irradiação é de 9,4°C.

O gráfico da Figura 6.30 regista a evolução da temperatura ao longo da irradiação sob a potência de 1,10 W.

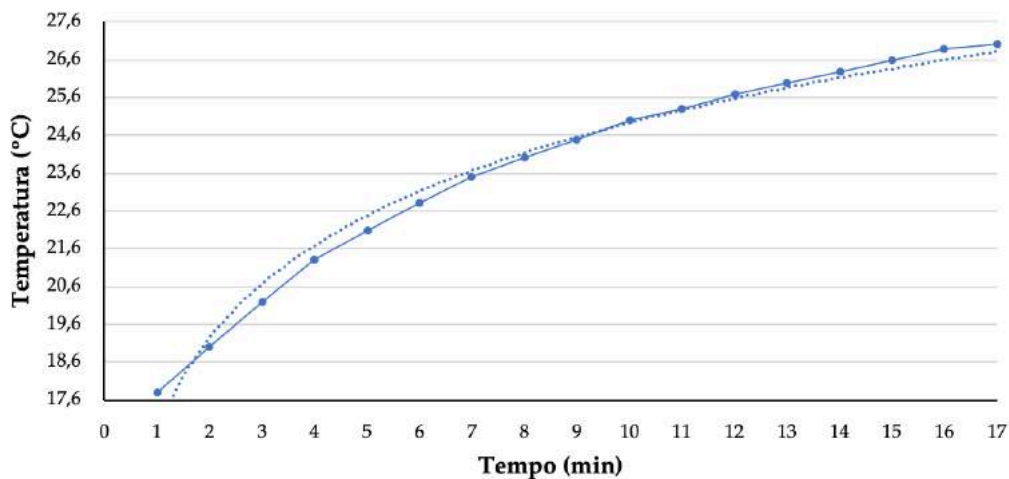


Figura 6.30: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 1,10 W realizada na experiência C.2.c. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura.

Com base nos dados de temperatura registados verifica-se que a evolução pode ser aproximada à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.14 com um erro quadrático de 0,98.

$$y = 3,54\ln(x) + 16,79 \quad (6.14)$$

A análise dos dados e a linha de tendência construída para a irradiação considerada, mostram a taxa de aumento da temperatura acentuada que se verifica nos primeiros 5 minutos de irradiação aproximadamente, nos quais se regista o aumento da temperatura no interior do absorvedor desde os 17,8°C iniciais até aos 22,1°C, no final do minuto 5. Após este intervalo a taxa de aumento continua elevada, no entanto verifica-se uma diminuição gradual da mesma para os intervalos de leitura seguintes. Esta diminuição ocorre apenas até ao minuto 11 da irradiação no qual se regista a temperatura de 25,3°C e a partir do qual surge um novo aumento da taxa de variação. Para o último intervalo de 6 minutos da irradiação que antecede a cedência do fantoma no final do minuto 17, o aumento da temperatura é mais rápido que o registado para o intervalo anteriormente considerado e verifica-se um aumento da temperatura no interior do absorvedor até ao valor final de 27°C.

Analisando os resultados anteriormente apresentados verifica-se que o aumento da potência do feixe laser origina o aumento da variação total de temperatura registada no interior do absorvedor. As três irradiações tiveram como temperatura inicial no interior do absorvedor, valores próximos de 17,8°C e verifica-se um alcance de temperatura final sucessivamente superior no final de cada irradiação. Tal acontece mesmo para a última potência utilizada de 1,10 W, cuja irradiação durou apenas 17 minutos, enquanto que as restantes tiveram a duração de 25 minutos. Para a potência inicial de 0,37 W, o comportamento logarítmico da evolução da temperatura culminou no alcance do equilíbrio térmico no interior do absorvedor após os 11 minutos de irradiação. Esta situação traduziu-se na reduzida variação

de temperatura nos últimos intervalos de leitura, registrando-se variações de apenas $0,1^{\circ}\text{C}$ ou mesmo 0°C . De igual forma, a evolução dos valores de temperatura registrados para a irradiação com a potência de $0,76\text{ W}$ registaram um comportamento logarítmico com uma taxa de variação elevada para os primeiros minutos, que diminui ao longo da irradiação. Neste caso, o equilíbrio parece ser atingido próximo do minuto 19 da irradiação com a taxa de aumento da temperatura constante em apenas $0,1^{\circ}\text{C}$ por minuto para este último intervalo de 6 minutos. Por fim, a potência de $1,10\text{ W}$ cuja duração da irradiação foi de apenas 17 minutos, registou também um comportamento logarítmico para a evolução dos valores de temperatura registrados no interior do absorvedor. Neste caso, não se regista o alcance do equilíbrio térmico no interior do absorvedor como verificado nas irradiações com as potências anteriores. No entanto, a temperatura final alcançada no interior do absorvedor é superior ao atingido nas duas últimas irradiações para um menor intervalo de duração, o que indica uma taxa de variação da temperatura superior para esta potência. Analisando o gráfico que reúne os valores de variação de temperatura podemos antever o estabelecimento do equilíbrio térmico, caso não tivesse ocorrido a cedência do fantoma, uma vez que após o minuto 12 de irradiação a variação registrada em cada intervalo de leitura fixa-se em $0,3^{\circ}\text{C}$ por minuto. Valor este que é relativamente inferior aos verificados nos intervalos anteriores para a mesma irradiação.

De um ponto de vista geral, todas as irradiações registam um aumento dos valores de variação da temperatura para os primeiros minutos da irradiação seguindo-se de uma diminuição até ao final da irradiação, indicando a aproximação do equilíbrio térmico no interior do absorvedor.

6.1.2.2 Fantoma D

Na experiência D.1.a a espessura do fantoma mantém-se fixa em 5 mm e a temperatura ambiente mantém-se constante nos 20°C , em ambas as irradiações. Na primeira irradiação, o fantoma é irradiado com a potência de feixe laser de $0,37\text{ W}$ e a temperatura inicial no interior do absorvedor é de $19,6^{\circ}\text{C}$. O gráfico da Figura 6.31 regista as variações de temperatura no interior do absorvedor a cada intervalo de leitura.

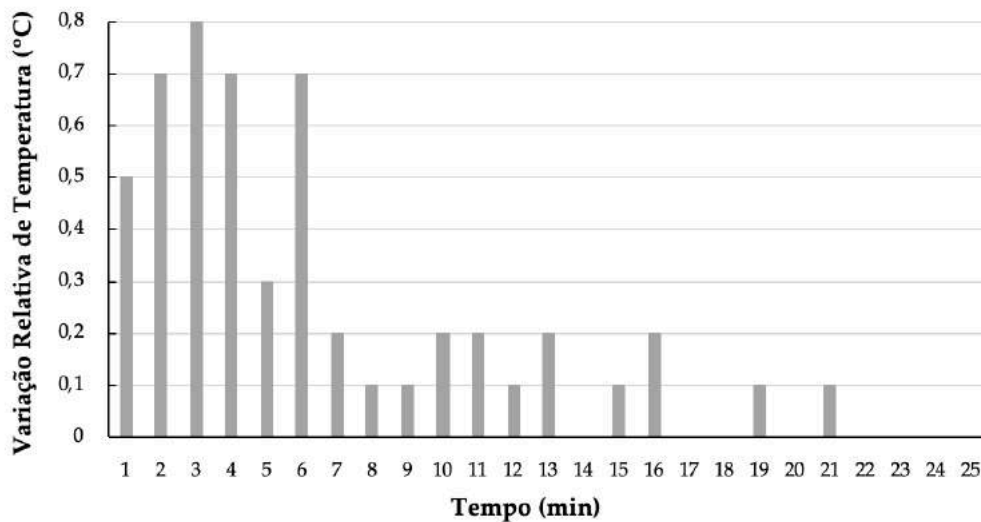


Figura 6.31: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura na irradiação com a potência de 0,37 W realizada para a experiência D.1.a.

Analisando o gráfico da figura 6.26 verifica-se que há um aumento da variação da temperatura nos primeiros minutos até ao máximo de 0,8°C no minuto 3 da irradiação, seguindo-se uma diminuição até aos 0°C no minuto 14. Para os minutos finais da irradiação, nomeadamente a partir do minuto 16, a variação de temperatura é de 0,1°C ou 0°C. A evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação é registada no gráfico da Figura 6.32.

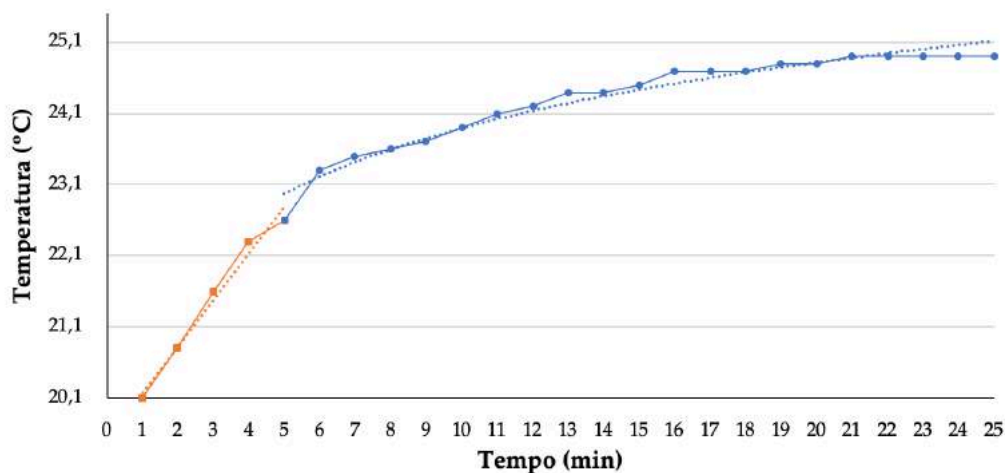


Figura 6.32: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência D.1.a. As linhas a pontilhado correspondem às linhas de tendência linear e logarítmica construídas com base nos valores de temperatura obtidos em cada intervalo.

A variação total de temperatura verificada no interior do absorvedor para as condições em estudo, no final dos 25 minutos de irradiação, foi de 5,3°C. Os valores de temperatura absoluta obtidos para a irradiação foram divididos em dois intervalos de tempo com comportamentos evolutivos da temperatura distintos. Para o primeiro intervalo de 5 minutos a temperatura aumenta 2,5°C, verificando-se um aumento linear definido pela equação 6.15 da linha de tendência e o erro quadrático mínimo de 0,98.

$$y = 0,65x + 19,53 \quad (6.15)$$

O segundo intervalo por sua vez, regista uma evolução da temperatura com comportamento logarítmico. Este segundo comportamento é definido pela equação 6.16 e o erro quadrático mínimo de 0,96.

$$y = 1,34\ln(x) + 20,82 \quad (6.16)$$

Segue-se o aumento da potência do feixe laser para 0,76 W e a irradiação inicia-se com a temperatura de 19,3°C no interior do absorvedor. Os valores da variação da temperatura no interior do absorvedor são reunidos no gráfico da Figura 6.33.

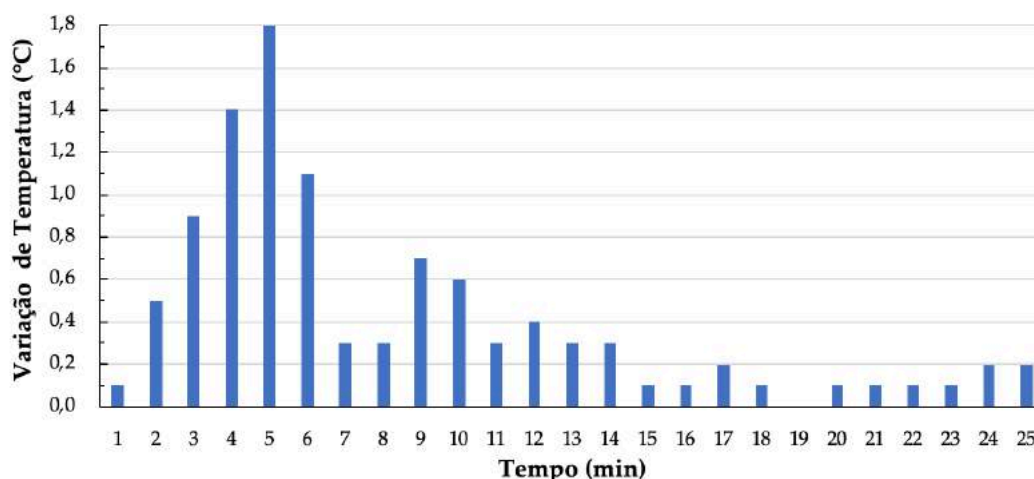


Figura 6.33: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura na irradiação com a potência de 0,76 W realizada para a experiência D.1.a.

Verifica-se pelo gráfico da Figura 6.33 que a variação máxima atingida para a potência de 0,76 W é de 1,8°C que ocorre no final do minuto 5 da irradiação, seguindo-se uma diminuição deste valor até 0°C no final do minuto 19. A partir deste minuto a variação assume valores de 0°C, 0,1°C e 0,2°C para os últimos 2 minutos da irradiação.

O gráfico da Figura 6.34 apresenta os valores de temperatura absoluta registados no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura. Mais uma vez, os dados foram divididos em dois intervalos com comportamento e duração distintos.

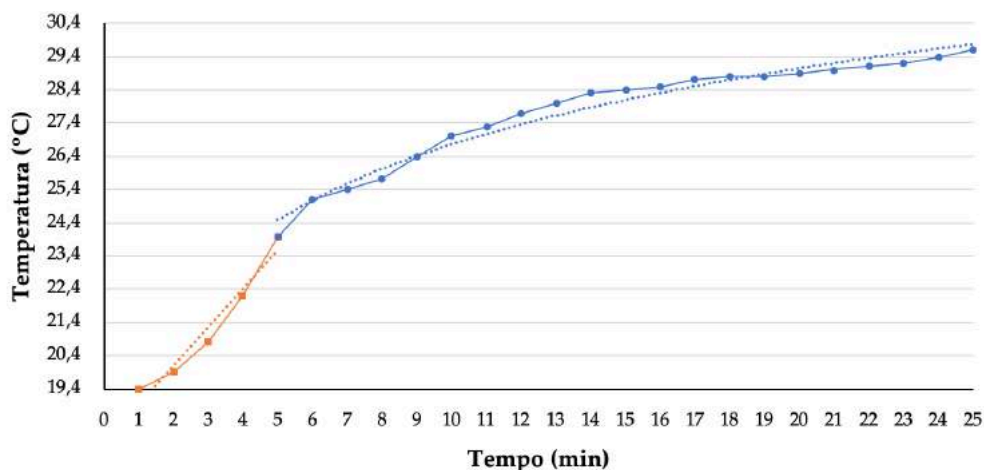


Figura 6.34: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência D.1.a. As linhas a pontilhado correspondem às linhas de tendências linear e logarítmica construídas com base nos valores de temperatura obtidos em cada intervalo.

A variação total de temperatura verificada para a potência de 0,76 W foi de 10,3°C. Verifica-se que a evolução da temperatura no primeiro intervalo considerado segue um comportamento linear com um aumento desde os 19,4°C até aos 24°C em apenas 5 minutos. Este comportamento é aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.17 com um erro quadrático de 0,95.

$$y = 1,15x + 17,81 \quad (6.17)$$

mente ao segundo intervalo considerado, este apresenta uma evolução da temperatura cujo comportamento é aproximado à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.18 com um erro quadrático de 0,97.

$$y = 3,30\ln(x) + 19,16 \quad (6.18)$$

Analisando os resultados anteriormente apresentados para a experiência D.1.a verifica-se que para os primeiros 3 minutos de irradiação de ambas as potências, as variações de temperatura registadas para a potência de 0,37 W são superiores às registadas na potência de 0,76 W. No entanto, após os 5 minutos de irradiação aproximadamente, a potência de 0,76 W regista maiores valores de variação em cada intervalo de leitura. Repare-se ainda que após alguns minutos de irradiação as variações de temperatura em cada intervalo diminuem significativamente e variam o seu valor em apenas 0,1°C. Tal poderá indicar o estabelecimento do equilíbrio térmico entre o interior do absorvedor e o feixe incidente de radiação laser. No caso da potência de 0,37 W, esse equilíbrio parece ser atingido próximo do final do minuto 8 de irradiação, enquanto que para a potência de 0,76 W o equilíbrio térmico ocorre próximo do minuto 15. Assim, o equilíbrio térmico no interior do absorvedor demora mais tempo a ser atingido no caso da maior potência. Verifica-se assim que um aumento da potência do feixe laser origina maiores valores de variação da temperatura no interior do absorvedor em cada intervalo de leitura. De igual forma, o aumento da potência origina um aumento da variação total de temperatura no interior do absorvedor

no final da irradiação. Ambos os gráficos de registo da evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor demonstram que essa mesma evolução se define por um aumento da temperatura com uma taxa de variação elevada, seguido de um aumento mais prolongado no tempo, i.e., com uma menor taxa de variação.

Na experiência D.1.b a espessura de fantoma entre o feixe laser e o absorvedor é fixada em 10 mm e a temperatura ambiente mantém-se constante nos 20°C, em ambas as irradiações. Na primeira irradiação, o fantoma foi irradiado com a potência de feixe laser de 0,37 W e a temperatura inicial no interior do absorvedor é de 19,6°C. O gráfico da Figura 6.35 regista as variações de temperatura no interior do absorvedor para a irradiação total.

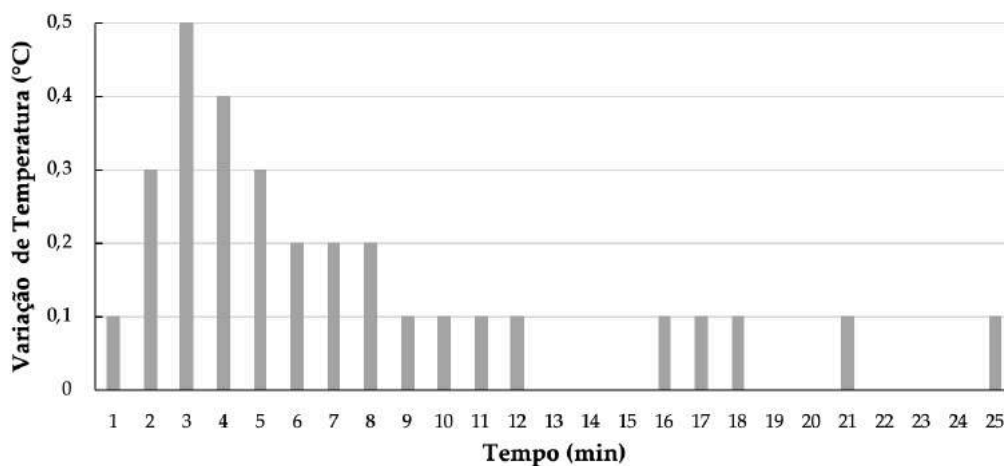


Figura 6.35: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura na irradiação com a potência de 0,37 W realizada para a experiência D.1.b.

Observando o gráfico verifica-se que há um aumento do valor da variação da temperatura até ao máximo de 0,5°C no minuto 3 de irradiação, seguindo-se uma diminuição até aos 0°C no minuto 13. Para os instantes finais da irradiação, nomeadamente a partir do minuto 14, a variação de temperatura é de 0,1°C ou mesmo 0°C. A evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação é registada no gráfico da Figura 6.36.

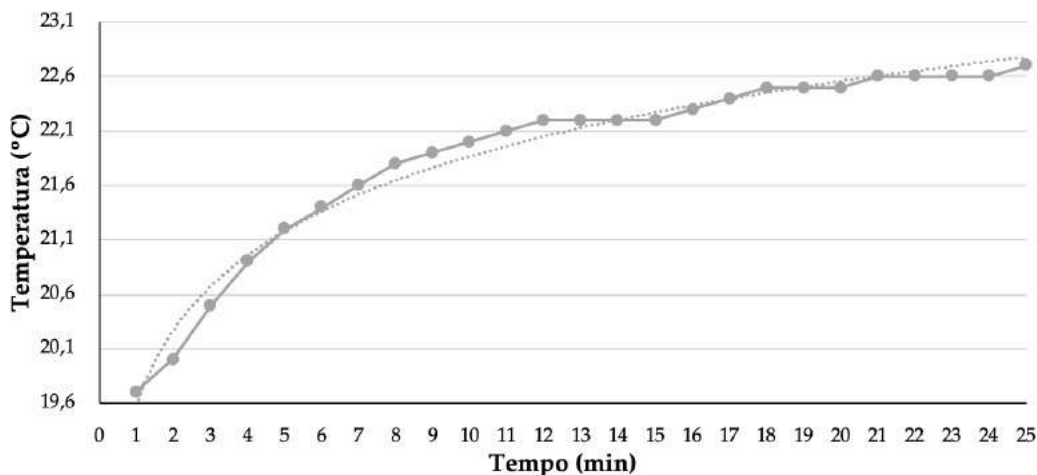


Figura 6.36: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência D.1.b. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

A variação total de temperatura verificada no interior do absorvedor para a irradiação de 0,37 W foi de 3,1°C. A evolução da temperatura ao longo da irradiação possui um comportamento logarítmico definido pela equação 6.5 com um erro quadrático de 0,19.

$$y = 0,99\ln(x) + 19,58 \quad (6.19)$$

Segue-se o aumento da potência do feixe laser para 0,76 W. A irradiação com 0,76 W inicia-se com a temperatura de 17,8°C no interior do absorvedor. Os valores da variação da temperatura no interior do absorvedor são reunidos no gráfico da Figura 6.37.

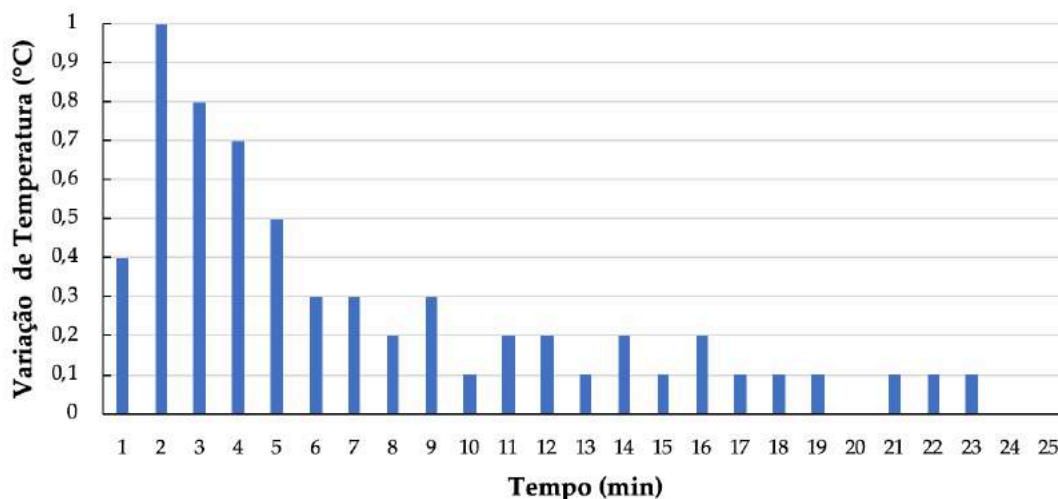


Figura 6.37: Variação da temperatura no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura na irradiação com a potência de 0,76 W realizada para a experiência D.1.b.

Verifica-se pelo gráfico anterior que o valor máximo de variação é de 1°C e ocorre no final do minuto 2 da irradiação, seguindo-se uma diminuição deste valor até 0,1°C no minuto 10 e até 0°C no minuto 20. A partir do minuto 17 da irradiação a variação toma valores de 0,1°C ou 0°C.

O gráfico da Figura 6.38 regista os valores de temperatura absoluta registados no interior do absorvedor para cada intervalo de leitura.

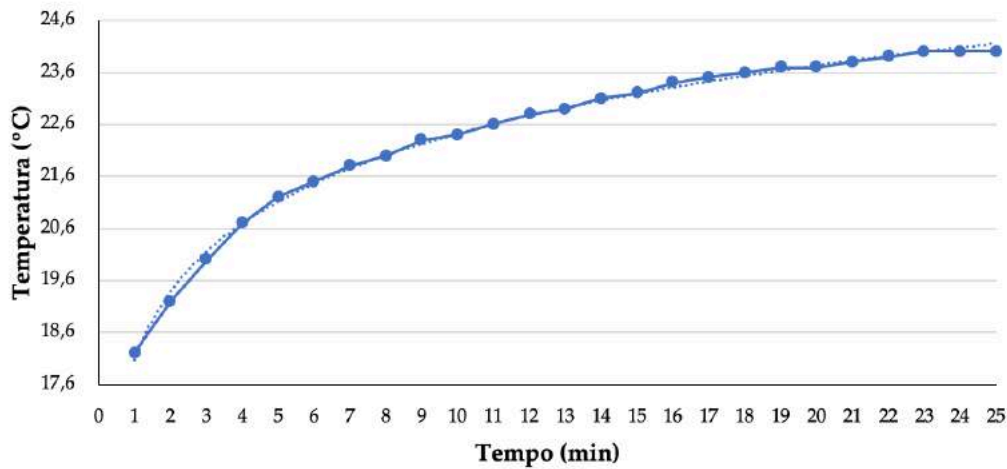


Figura 6.38: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência D.1.b. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

A variação total de temperatura verificada para a potência de 0,76 W foi de 6,2°C. A evolução da temperatura no interior do absorvedor ao longo dos 25 minutos de irradiação com a potência de 0,76 W é aproximada à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.20 com o erro quadrático mínimo próximo de 1,00.

$$y = 1,89\ln(x) + 18,08 \quad (6.20)$$

Analisando os resultados anteriormente apresentados para a experiência D.1.b verifica-se que na experiência D.1.b os valores de variação de temperatura registados para a potência de 0,76 W são superiores às registadas na potência de 0,37 W em todos os intervalos de leitura. Inclusive, o valor máximo de variação atingido na irradiação de potência 0,76 W é o dobro do alcançado na irradiação com 0,37 W. No entanto, após o minuto 9 e 17 das irradiações com 0,37 W e 0,76 W, ambas as irradiações registam variações de apenas 0,1°C ou mesmo 0°C. O que poderá indicar, para cada irradiação, o atingir do equilíbrio térmico no interior do absorvedor. Consta-se com este resultado que o equilíbrio térmico no interior do absorvedor demora mais tempo a ser atingido no caso da maior potência. O aumento da potência origina um aumento da variação total de temperatura no interior do absorvedor verificado no final da irradiação. Ambos os gráficos de registo da evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor para as diferentes potências, demonstram que essa mesma evolução se define por um aumento da temperatura com uma taxa de variação elevada, seguido de um aumento mais prolongado no tempo, i.e., com uma menor taxa de variação, comportamento este aproximado ao de uma equação logarítmica.

Na experiência D.1.c. a espessura de fantoma é fixada em 14 mm e a temperatura ambiente para a experiência em estudo mantém-se constante em 20°C. Na primeira irradiação, o fantoma foi irradiado ao longo de 25 minutos com a potência de feixe laser de 0,37 W e a temperatura inicial no interior do absorvedor é de 19,4°C. O gráfico da Figura 6.39 regista as variações de temperatura no interior do absorvedor para a cada intervalo de leitura.

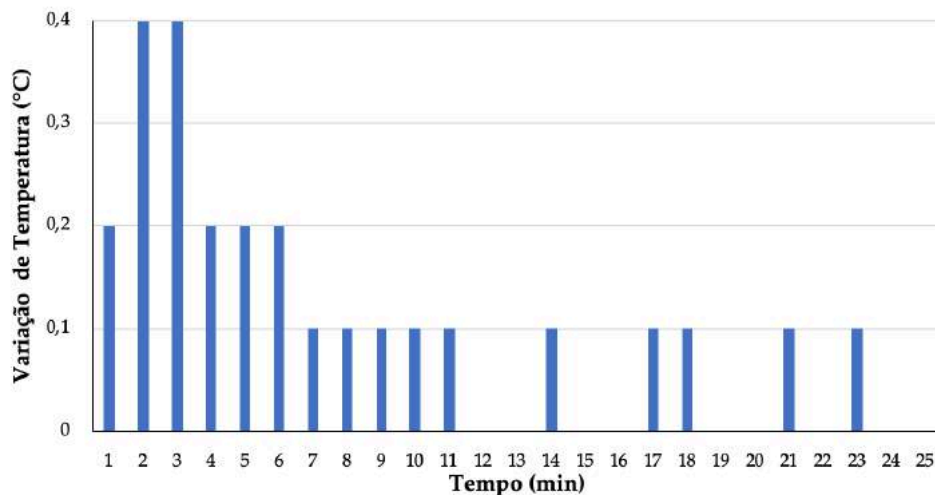


Figura 6.39: Variação da temperatura no interior do absorvedor para os 25 minutos de irradiação com a potência de 0,37 W para a experiência D.1.c.

Como mostra o gráfico anterior, a variação máxima para a potência de 0,37 W é de 0,4°C e ocorre para os minutos 2 e 3 da irradiação. Este valor máximo diminui depois até aos 0°C no minuto 12. A partir deste minuto a variação de temperatura no interior do absorvedor oscila entre 0°C e 0,1°C.

A evolução da temperatura no interior do absorvedor ao longo da irradiação é registada no gráfico da Figura 6.40.

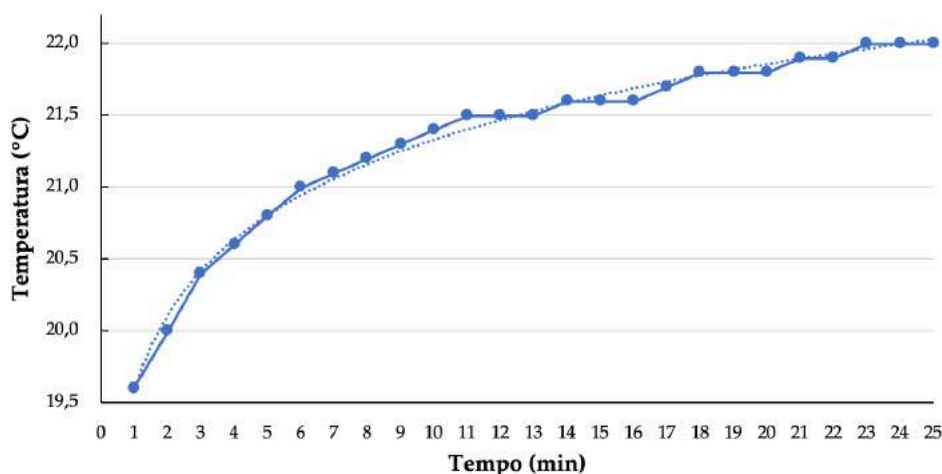


Figura 6.40: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência D.1.c. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

A variação total de temperatura verificada no interior do absorvedor, no final dos 25 minutos de irradiação, foi de 2,6°C. Verifica-se pelo gráfico que a evolução da temperatura no interior do absorvedor sobre a irradiação de potência 0,37 W apresenta um comportamento logarítmico aproximado à linha de tendência definida pela equação 6.21 com um erro quadrático mínimo próximo de 1,00.

$$y = 0,76\ln(x) + 19,58 \quad (6.21)$$

O aumento da potência do feixe laser para 0,76 W origina maiores valores de variação em cada intervalo de leitura como mostra o gráfico da figura 6.41.

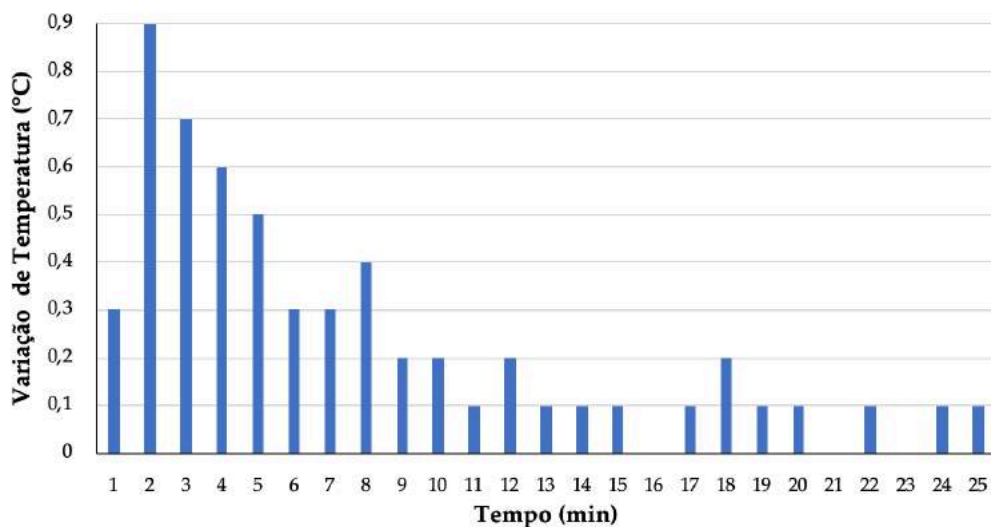


Figura 6.41: Variação da temperatura no interior do absorvedor para os 25 minutos de irradiação com a potência de 0,76 W para a experiência D.1.c.

A irradiação inicia-se com uma temperatura de 19,1°C no interior do absorvedor. O valor máximo de variação atinge-se logo ao minuto 2 da irradiação e é de 0,9°C. Segue-se depois uma diminuição deste valor até ao mínimo de 0°C no minuto 16 da irradiação. Após este instante, a temperatura no interior do absorvedor sofre variações de 0°C ou 0,1°C por minuto. O gráfico da Figura 6.42 regista a evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação de 25 minutos com a potência de 0,76 W.

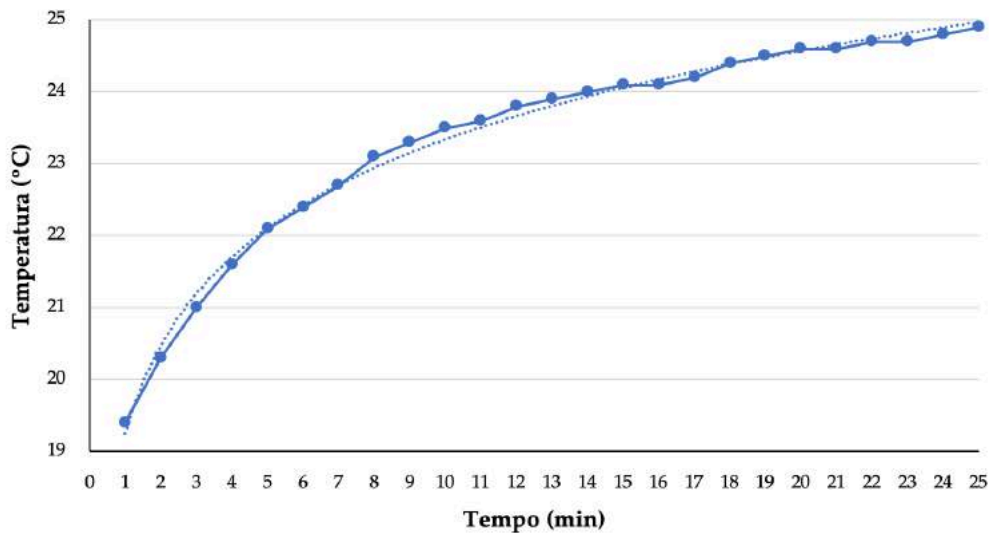


Figura 6.42: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência D.1.c. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

Para os 25 minutos totais da irradiação, verifica-se uma variação total da temperatura de 5,8°C. Analisando o gráfico verifica-se que a evolução da temperatura nesta irradiação possui um comportamento aproximado à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.22 com um erro quadrático mínimo de aproximadamente 1,00.

$$y = 1,78\ln(x) + 19,25 \quad (6.22)$$

Analisando os resultados apresentados anteriormente para a experiência D.1.c constata-se mais uma vez que o aumento de potência do feixe laser resulta em maiores valores de variação da temperatura em cada intervalo de leitura. Da mesma forma que o sucedido na experiência D.1.b, o aumento da potência laser origina um aumento do tempo necessário para ocorrer o equilíbrio térmico no interior do absorvedor. Adicionalmente, a variação total de temperatura registada para a potência de 0,76 W foi superior à verificada para a potência de 0,37 W. Por outro lado, ambas as evoluções da temperatura absoluta no interior do absorvedor apresentam comportamentos logarítmicos com uma elevada taxa de aumento da temperatura nos primeiros minutos da irradiação, seguindo-se uma diminuição desta taxa de variação que se manifesta pelo atingir do equilíbrio térmico no interior do absorvedor.

Na experiência D.1.d a espessura de fantoma entre o feixe laser e o absorvedor é fixada em 19 mm e a temperatura ambiente mantém-se constante nos 20°C em ambas as irradiações. Na primeira irradiação, o fantoma foi irradiado ao longo de 25 minutos com a potência de feixe laser de 0,37 W e a temperatura inicial no interior do absorvedor é de 19,3°C. O gráfico da Figura 6.43 regista as variações de temperatura no interior do absorvedor a cada intervalo de leitura.

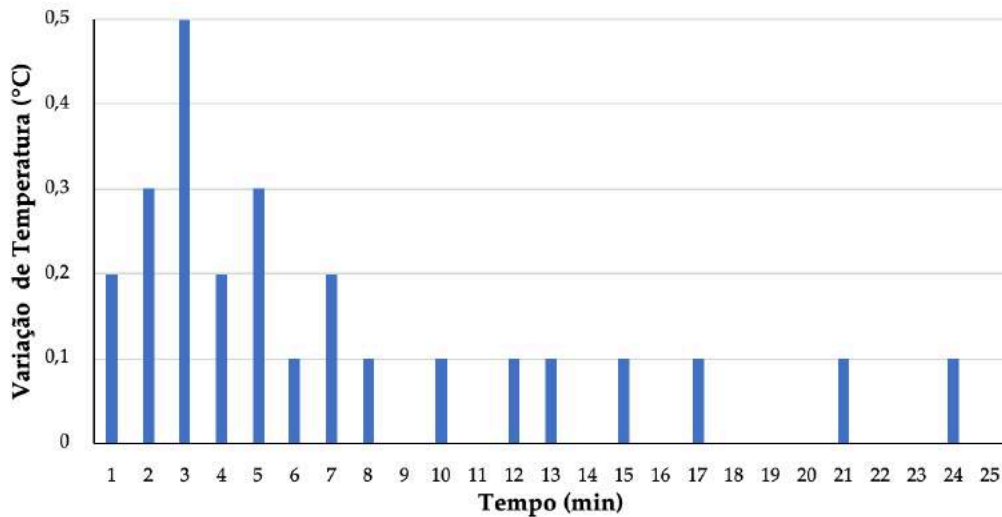


Figura 6.43: Variação da temperatura no interior do absorvedor para os 25 minutos de irradiação com a potência de 0,37 W para a experiência D.1.d.

Como mostra o gráfico da Figura 6.44, o valor máximo da variação ocorre para os 2 minutos de irradiação e é de 0,5°C. Após este intervalo o valor diminui até ao mínimo de 0°C no minuto 9 da irradiação. O gráfico da Figura 6.45 regista a evolução da temperatura absoluta ao longo de toda a irradiação.

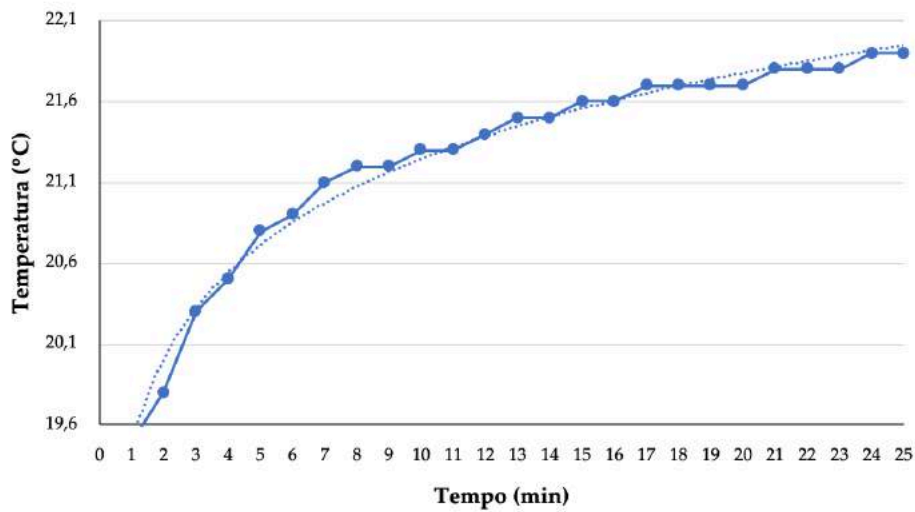


Figura 6.44: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,37 W realizada na experiência D.1.d. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência logarítmica construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

Ao longo de toda a irradiação verifica-se uma variação total da temperatura de 2,6°C. A análise do gráfico da Figura 6.44 permite constatar o comportamento logarítmico da evolução da temperatura que é aproximado à linha de tendência logarítmica definida pela equação 6.23 com um erro quadrático mínimo de 0,99.

$$y = 0,77\ln(x) + 19,48 \quad (6.23)$$

O aumento da potência do feixe laser para 0,76 W origina novos aumentos dos valores da variação em cada intervalo de leitura. A temperatura inicial no interior do absorvedor é de 19,5°C. O gráfico da

Figura 6.45 apresenta a variação da temperatura no interior do absorvedor em cada intervalo de leitura da irradiação.

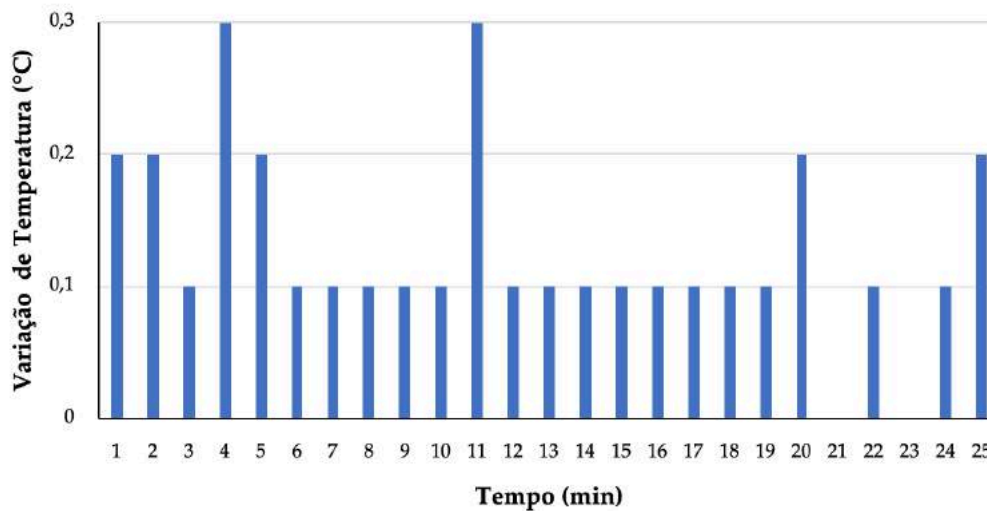


Figura 6.45: Variação da temperatura no interior do absorvedor para os 25 minutos de irradiação com a potência de 0,76 W para a experiência D.1.d.

Verificam-se valores de variação máximos de 0,3°C para os minutos 4 e 11 da irradiação. Os restantes intervalos de leitura registam variações muito baixas entre 0°C e 0,2°C. O gráfico da Figura 6.46 apresenta a evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor no final de cada intervalo de leitura.

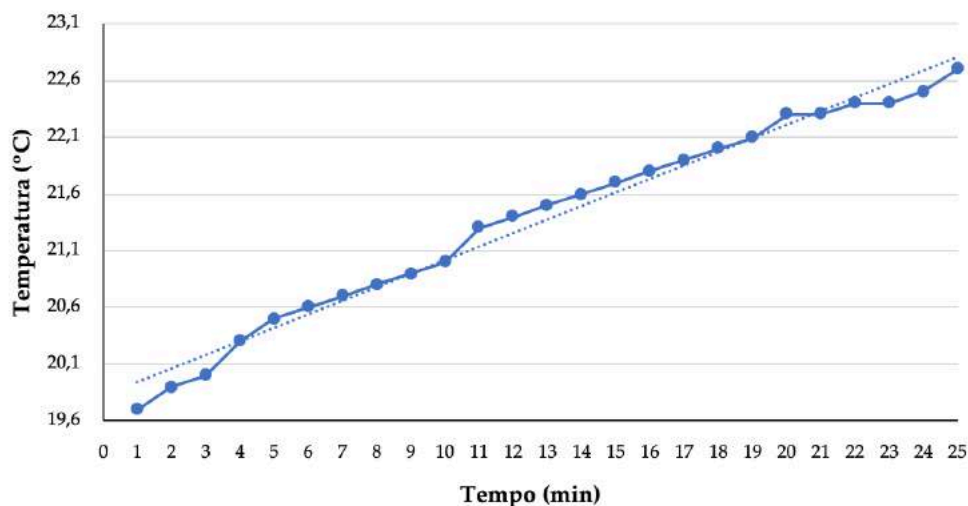


Figura 6.46: Evolução da temperatura absoluta no interior do absorvedor ao longo da irradiação com a potência de 0,76 W realizada na experiência D.1.d. A linha a pontilhado corresponde à linha de tendência linear construída com base nos valores de temperatura obtidos no tempo.

A variação total da temperatura ao longo desta irradiação foi de 3,2°C.

A evolução da temperatura no interior do absorvedor regista um comportamento aproximado ao da linha de tendência linear definida pela equação 6.24 com um erro quadrático mínimo de 0,98.

$$y = 0,12x + 19,82 \tag{6.24}$$

Analisando os resultados apresentados anteriormente para a experiência D.1.d. verifica-se mais uma vez que o aumento da potência do feixe laser resulta no aumento do valor máximo da variação nos intervalos de leitura e conseqüentemente num aumento da variação total da temperatura no final da irradiação. No entanto, para a irradiação com a potência de 0,76 W a temperatura registou um aumento linear ao longo da irradiação, enquanto que a potência de 0,37 W registou um comportamento logarítmico semelhante ao sucedido nas experiências anteriores.

6.1.3 Sensor de fibra óptica

Uma vez que a construção dos sensores de fibra óptica não permitiu a criação de uma reta de calibração passível de ser aplicada em todas os sinais lidos nas diferentes irradiações realizadas sobre as diferentes versões do fantoma, os sensores de fibra óptica não puderam ser utilizados como instrumento metrológico absoluto da temperatura no interior do absorvedor e no fantoma. Posto isto, enquanto os resultados obtidos com recurso ao Termopar são valores absolutos de temperatura no interior do absorvedor, os resultados obtidos com os sensores de fibra óptica consistem em sinais elétricos recolhidos com recurso à OSA (do inglês, *Optical Spectrum Analyser*) com deslocamentos do sinal no comprimento de onda. Assim, a aplicação dos sensores de fibra óptica no projeto apresentado visa estudar um método metrológico que permita detetar variações de temperatura no interior do absorvedor ou no fantoma em resultado da interação da radiação laser incidente com ambos.

Os gráficos obtidos na Figura 6.47 reúnem os sinais recolhidos com recurso ao sensor de fibra óptica MMI nos diversos intervalos de tempo para as irradiações com potência de 0,76 W nas experiências D.3.a (imagem (a)) e D.4.a (imagem (b)).

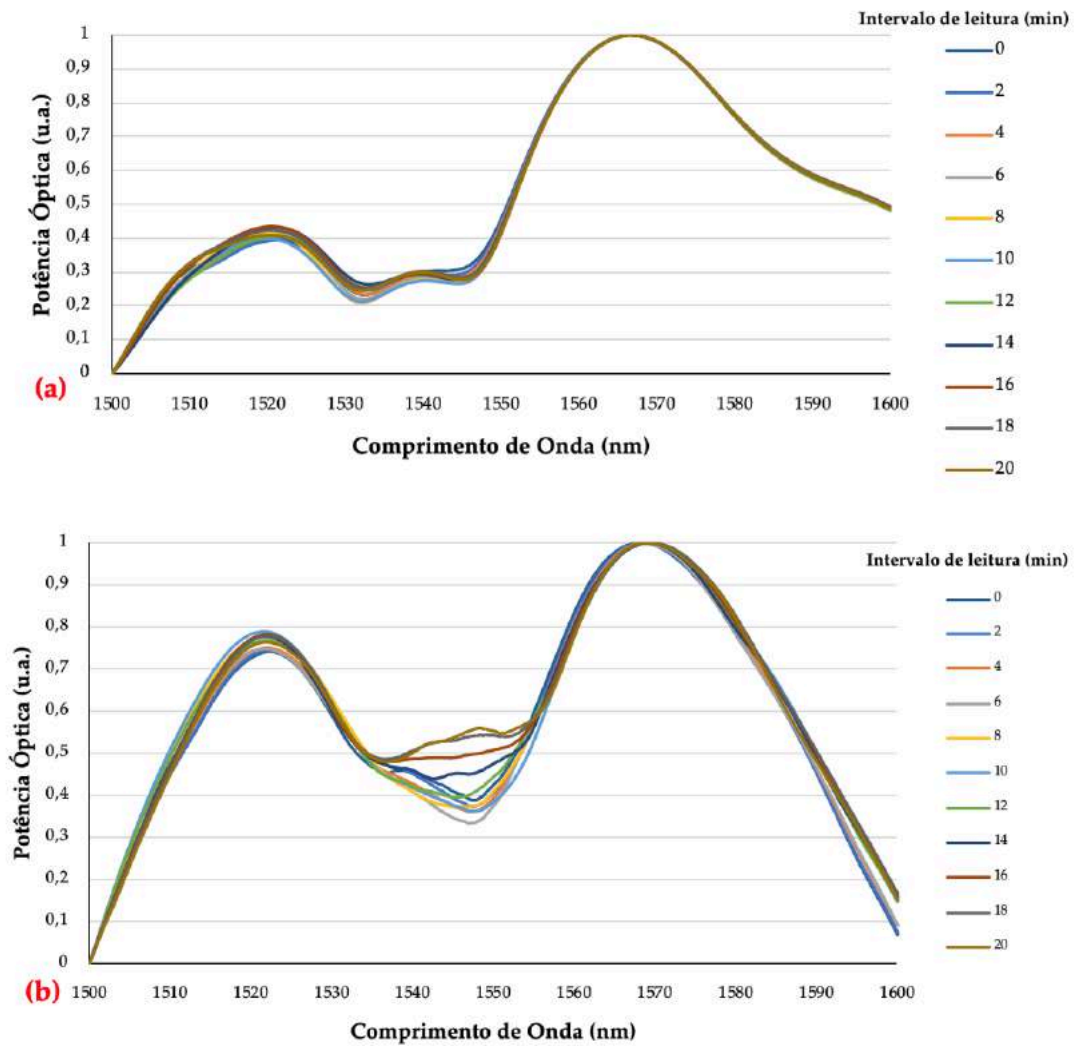


Figura 6.47: Gráficos dos sinais recolhidos para as irradiações com potências de 0,76 W nas experiências D.3.a (a) e D.4.a (b).

A irradiação contínua do fantoma origina variações no sinal fornecido pelo sensor com alterações do formato do mesmo. Pode aferir-se que o intervalo 1530 nm a 1550 nm corresponde à zona de maior sensibilidade do sensor, no entanto tal não se verifica pois o sinal recolhido com recurso ao sensor vai alterando o seu formato ao longo das diferentes experiências realizadas sobre a mesma e sobre diferentes versões do fantoma D. Tal acontecimento é comprovável com a análise da Figura 6.47 que mostra a clara variação em formato do sinal recolhido para os diferentes fantomas D.3 e D.4.

Uma vez que todos os resultados recolhidos com recurso ao sensor de fibra óptica originaram sinais distintos e até de variação aleatória, a análise deste instrumento não foi aprofundada neste projeto. Posteriormente serão apresentadas sugestões de abordagens ao estudo deste instrumento por forma a alcançar melhores resultados.

6.2 Imagiologia

Esta categoria apresenta os resultados obtidos pelos instrumentos imagiológicos. Desta forma, a categoria reúne os resultados adquiridos com recurso ao Termómetro de IV, à câmara de telemóvel e à câmara USB.

6.2.1 Termómetro de IV

Com recurso ao Termómetro de IV foram registados termogramas da superfície dos fantasmas A, B e C.

6.2.1.1 Fantoma A

A Figura 6.48 reúne os termogramas registados para os instantes de leitura da temperatura na superfície do fantoma A.1. Na extremidade esquerda da figura encontra-se a escala de cores utilizada pelo Termómetro em que a cor preta corresponde ao menor valor de temperatura lido em cada termograma e a cor branca corresponde ao valor máximo.

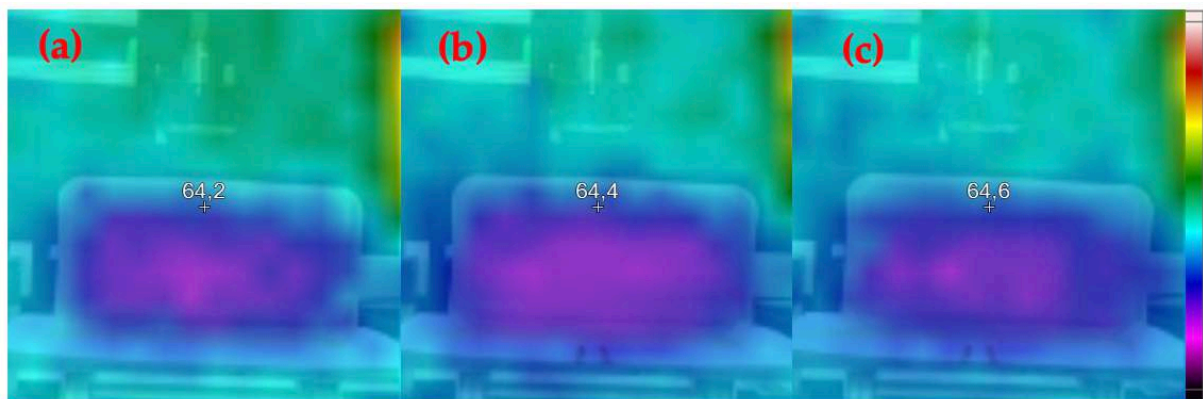
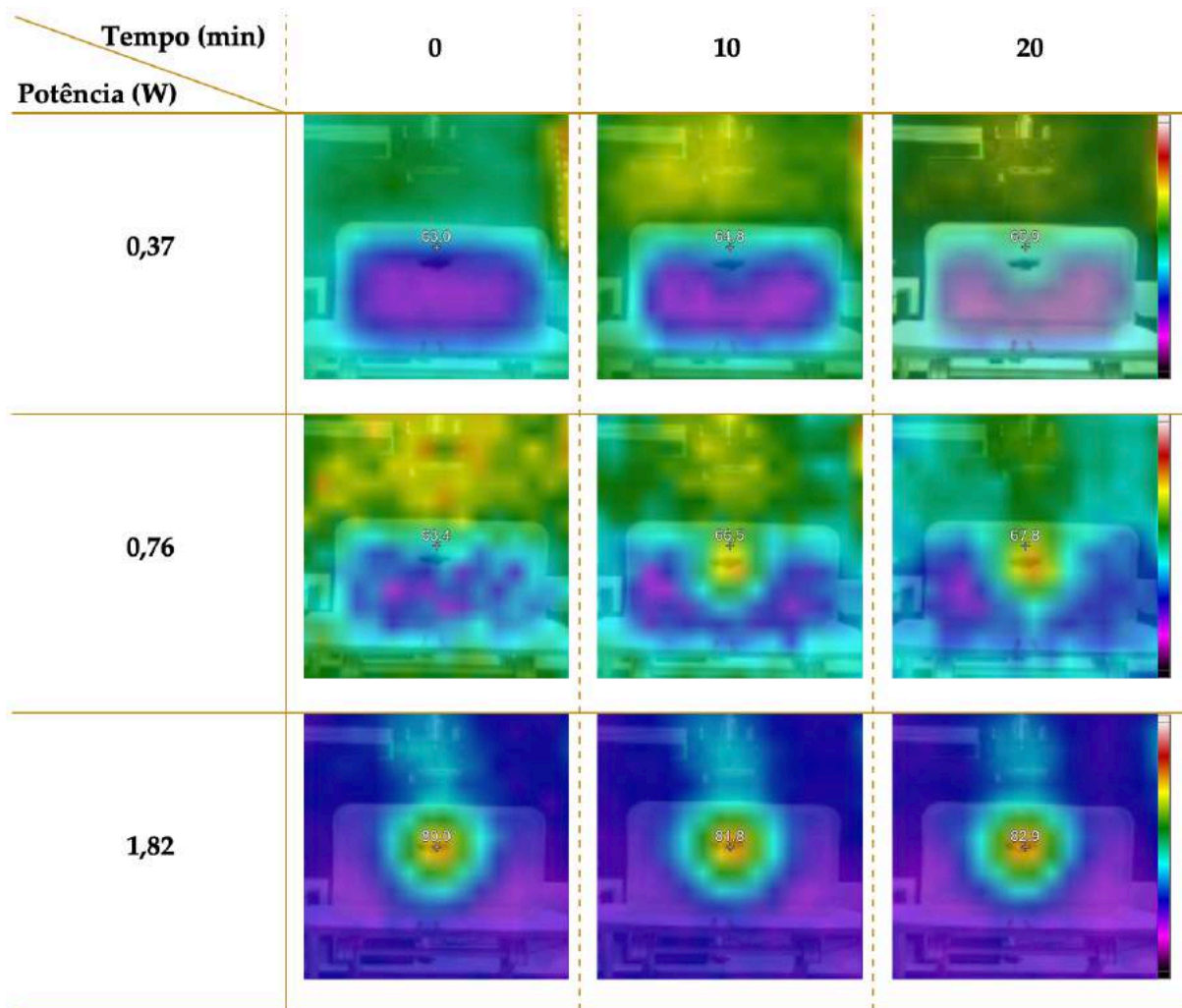


Figura 6.48: Registos termográficos do Termómetro de IV para a superfície do fantoma nos minutos 0 (a), 10 (b) e 20 (c) de irradiação sob o feixe laser de potência 0,03 W. Os valores de temperatura junto à mira do Termómetro (representada pela cruz branca) estão em unidades Fahrenheit.

A Tabela 6.2 reúne os termogramas registados para os diferentes instantes de leitura da temperatura na superfície do fantoma A.2 para as potências de 0,37 W, 0,76 W e 1,82 W. Cada linha de três termogramas da Tabela corresponde a um valor de potência do feixe laser e cada coluna a um instante de leitura da temperatura diferentes. Foi verificado que para a potência de 0,03 W não existe variação do código de cores nos termogramas registados nos diferentes instantes da irradiação, pelo que esta potência não foi considerada nos resultados.

Tabela 6.2: Cada linha da tabela reúne um conjunto de três termogramas registados nos minutos 0, 10 e 20 da irradiação por uma determinada potência. A escala de cores usada pelo Termómetro de IV, comum a todos os termogramas, é apresentada no lado direito de cada linha de termogramas.

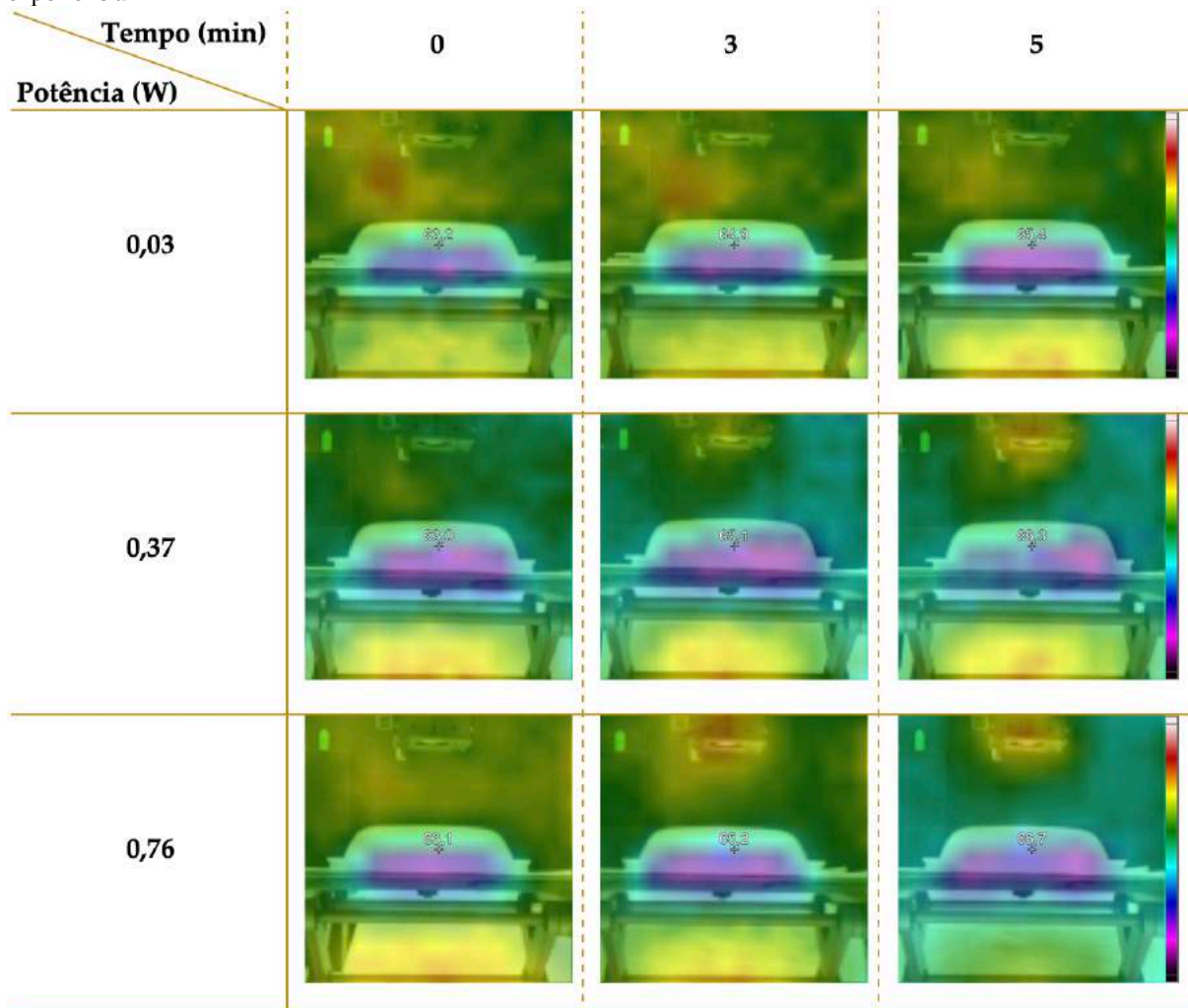


Atentando apenas no ponto **b** considerado nesta experiência, verifica-se que há uma variação das cores predominantes ao longo da irradiação e com o aumento da potência do feixe laser. A cor roxa dá lugar aos tons azul *ciên* e posteriormente avermelhados. Estes resultados são indicadores de um aumento da temperatura no absorvedor. Em particular, para a potência de 1,82 W a zona correspondente ao ponto **b** surge com o tom mais próximo do vermelho de todos os termogramas recolhidos. Sabendo que o orifício surgiu na zona do ponto **b** antes dos 20 minutos de irradiação com a potência de 1,82 W, pode-se antever que o aparecimento da cor laranja do termograma correspondente ao minuto 10 da irradiação poderia ser indicador deste pico de temperatura que resultou na cedência do fantoma. O aumento da potência do feixe laser para o valor de 0,76 W origina termogramas com resolução inferior aos obtidos para a potência anterior. Verifica-se ainda que a zona envolvente do absorvedor varia entre instantes de irradiação diferentes e entre diferentes potências do feixe laser. Este resultado surge devido à alteração dos valores máximo e mínimo registados pelo Termómetro de IV entre os diferentes termogramas. Esta variação provoca uma alteração da atribuição de cor a cada temperatura no termograma e por isso o código de cores final entre diferentes termogramas é distinto.

6.2.1.2 Fantoma B

A Tabela 6.3 reúne os termogramas recolhidos após os intervalos de 0, 10 e 20 minutos para as potências de 0,03 W, 1,50 W e 3,13 W utilizadas na experiência B.1.1.

Tabela 6.3: Termogramas registados nos instantes de irradiação 0, 10 e 20 para as diferentes potências utilizadas na experiência B.1.1.



Considerando apenas as potências de feixe laser de 0,03 W, 0,37 W e 0,76 W verifica-se que há variação dos padrões de cor nos termogramas dos diferentes instantes correspondentes a cada potência.

Atentando na zona central da imagem onde se encontra o fantoma, apenas nos termogramas correspondentes à potência do feixe de 0,37 W nos instantes 10 e 20 minutos da irradiação se verifica o surgimento da cor azul *cien* em detrimento da cor roxa que indica um aumento de temperatura naquela zona. Em cada um dos termogramas é visível a superior temperatura ambiente que se verifica em torno do fantoma e a inferior temperatura a que se encontra o fantoma.

Para a experiência B.1.2 os resultados termográficos foram semelhantes aos obtidos na experiência B.1.1 na medida em que, as variações nos padrões de cor não são conclusivas comparando termogramas de diferentes potências. Desta forma, como exemplo ilustrativo dos resultados obtidos nesta segunda

experiência foi escolhida a potência 2,3 W e os termogramas recolhidos após os intervalos de 0, 10 e 20 minutos nesta irradiação foram reunidos na Figura 6.49.

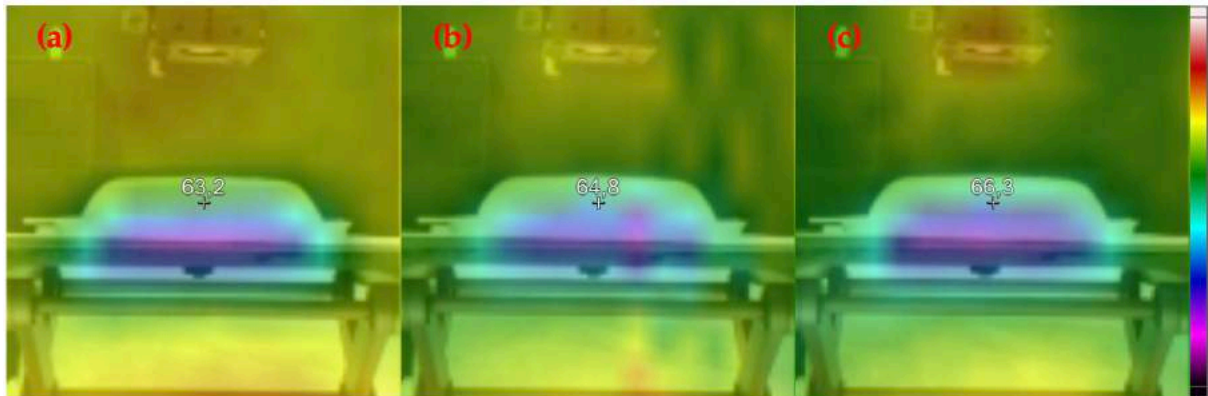


Figura 6.49: Termogramas recolhidos para a irradiação com a potência 2,3W realizada na experiência B.1.2 nos minutos de irradiação 0 (a), 10 (b) e 20 (c).

Neste conjunto de termogramas é visível o aumento da temperatura junto da mira do Termómetro de IV para os primeiros 10 minutos de irradiação com o surgimento da cor azul *cien* junto à mira do termograma (a) para o termograma (b). Os dois últimos termogramas não possuem uma variação no código de cores conclusiva na medida em que, esperar-se-ia um aumento da temperatura na zona próxima da mira que não é verificada na variação de cores apresentada nos dois termogramas (b) e (c). Isto porque, a cor azul *cien* do termograma (b) dá lugar à cor roxa no termograma (c) o que indicaria uma diminuição da temperatura naquela zona.

Os termogramas recolhidos na experiência B.2.1 para a irradiação com a potência de 0,03 W na experiência B.2.1 não se mostram conclusivos, na medida em que a alteração do código de cores não é significativa. Por outro lado, a irradiação do mesmo fantoma com a potência de 0,76 W resulta em termogramas cuja variação do código de cores entre termogramas permite algumas conclusões. A Figura 6.50 reúne os termogramas recolhidos para a irradiação realizada na experiência B.2.1 com a potência de 0,76 W.

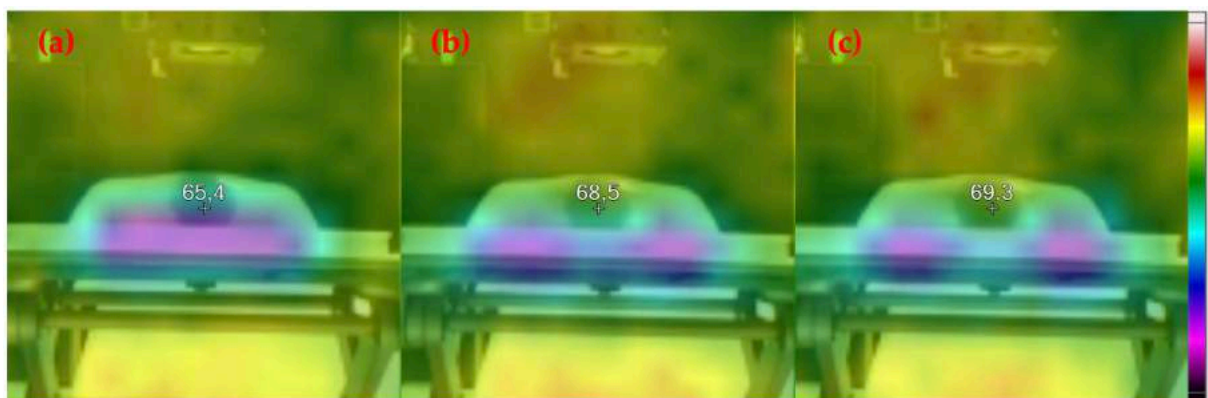


Figura 6.50: Termogramas recolhidos na irradiação com a potência 0,76 W, recolhidos na experiência B.2.1 para os minutos de irradiação 0 (a), 10 (b) e 20 (c).

Os termogramas registrados para os diferentes instantes da irradiação com a potência de 0,76 W mostram um aumento de temperatura na zona de incidência do feixe laser, em particular no absorvedor. A cor roxa presente no termograma (a) dá lugar à cor azul *cien* no termograma (c) indicando o aumento de temperatura naquela zona do fantoma.

De igual forma, os termogramas registrados para cada intervalo de leitura da irradiação com a potência de 1,10 W evidenciam também o aumento de temperatura na zona do fantoma atingida pelo feixe laser. Esse aumento verifica-se com o surgimento de um tom cada vez mais próximo da cor laranja na zona da imagem próxima da mira do Termómetro que corresponde à zona de fantoma no qual se propaga o feixe laser. A Figura 6.51 reúne os termogramas registrados para os intervalos de leitura de 0, 10 e 20 minutos recolhidos na irradiação com 1,50 W.

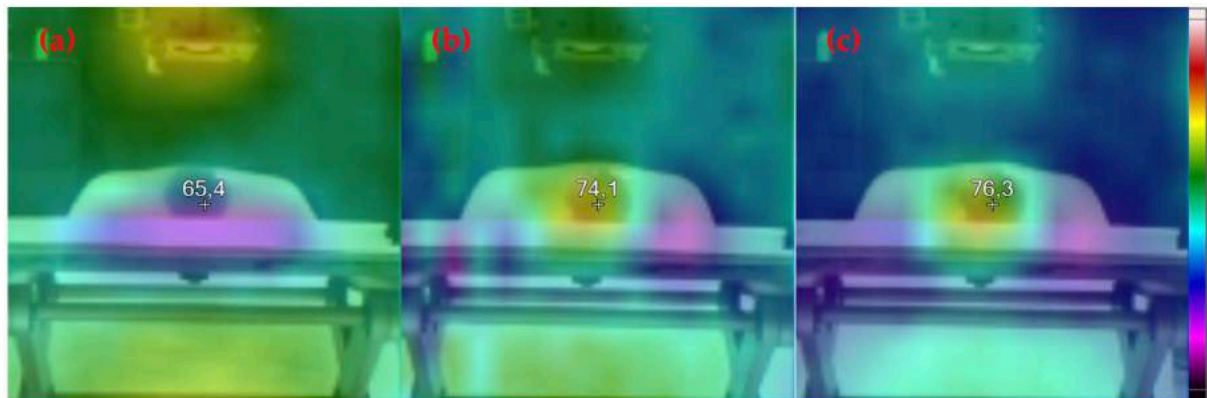


Figura 6.51: Termogramas recolhidos no decorrer da irradiação com a potência de 1,50 W na experiência B.2.1. Os termogramas (a), (b) e (c) correspondem aos intervalos de leitura 0, 10 e 20 minutos respetivamente.

A análise do código de cores de cada termograma evidencia o surgimento da cor laranja na área próxima da mira, em especial para os termogramas correspondentes ao final dos 10 e 20 minutos da irradiação. Verifica-se ainda que nos dois últimos termogramas surgem as cores amarela e vermelha na zona inferior esquerda do absorvedor, o que indica um ponto máximo de temperatura. Este acontecimento poderá ser indicador da cedência do fantoma naquele local, no entanto dada a localização visivelmente inacessível deste pico máximo de temperatura, não é possível afirmar com certeza.

Para a potência de 1,82 W, devido à interrupção de irradiação antes de se atingirem os 20 minutos inicialmente definidos, apenas dois termogramas correspondentes aos minutos 0 e 5 foram recolhidos e apresentados na Figura 6.52.

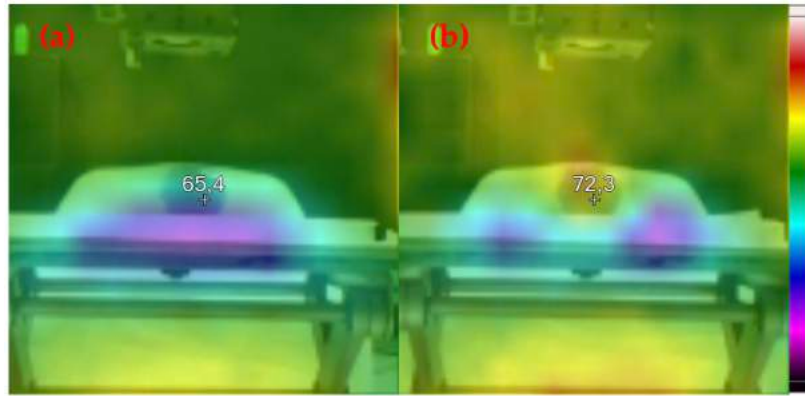


Figura 6.52: Termogramas recolhidos no decorrer da irradiação com a potência de 1,82 W na experiência B.2.1. Os termogramas (a) e (b) correspondem aos intervalos de leitura 0 e 5 minutos respetivamente.

Os dois termogramas recolhidos sugerem o aumento da temperatura na zona de incidência do feixe laser, em particular, no absorvedor com o surgimento da cor laranja no absorvedor no segundo termograma.

Nas irradiações realizadas na experiência B.2.2 foram definidas potências compreendidas entre 0,03 W e 1,50 W. Os termogramas recolhidos na irradiação com a potência de 0,03 W possuem o mesmo código de cores não permitindo concluir sobre a variação de temperatura ao longo desta irradiação.

De igual forma, os termogramas recolhidos na irradiação com a potência de 1,50 W (ver Figura 6.53), também não permitem concluir sobre a variação da temperatura ao longo da mesma na medida em que, não há uma alteração de cores detetável na zona do fantoma entre os diferentes termogramas.



Figura 6.53: Termogramas recolhidos no decorrer da irradiação B.2.2 sob irradiação da potência 1,50 W. Os termogramas (a), (b) e (c) correspondem aos intervalos de leitura 0, 10 e 20 minutos respetivamente.

6.2.1.3 Fantoma C

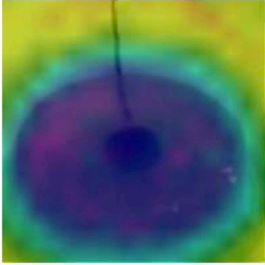
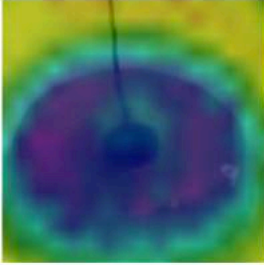
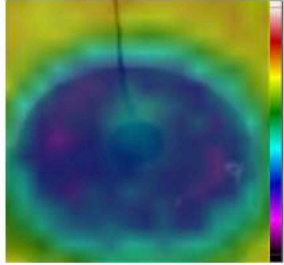
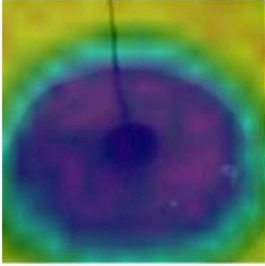
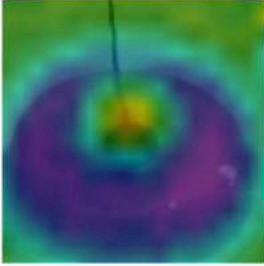
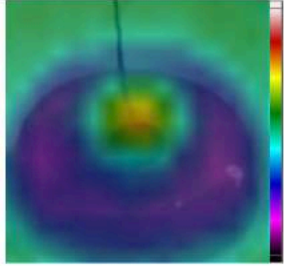
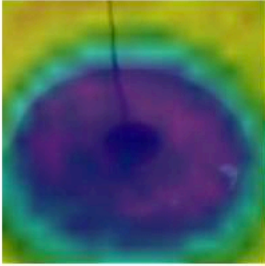
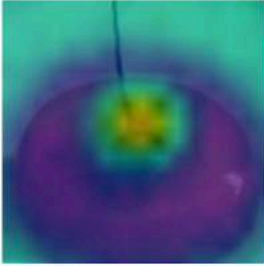
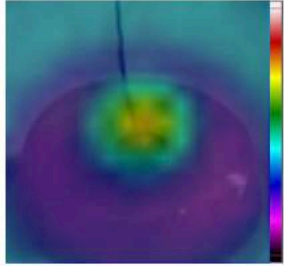
A experiência C.1.a (espessura em fantoma de 1 mm) incluiu irradiações com potências entre 0,03 W e 0,76 W. Na irradiação com a potência 0,76 W o fantoma diminuiu rapidamente a sua espessura, deixando em contacto com o ar e consequentemente em contacto direto com o feixe laser, a superfície do absorvedor, tendo-se interrompido a experiência. Ao longo desta experiência a temperatura ambiente mantém-se constante nos 22°C.

A Tabela 6.4 reúne os termogramas registrados para todos os intervalos de leitura de cada irradiação do ensaio em estudo. Em cada irradiação foram registrados três termogramas correspondentes aos intervalos de leitura aos 0, 3 e 5 minutos da irradiação. Para a potência inicial de 0,03 W, os termogramas registrados apresentam uma pequena variação no código de cores registrado que confirma o aumento de temperatura verificado na superfície do fantoma com os resultados numéricos. O aumento total da temperatura na superfície do fantoma foi de 0,8°C e tal é identificável na zona central do termograma, sobre a área do absorvedor, com o surgimento progressivo da cor azul marinho. Adicionalmente, o aumento da temperatura ao final dos 3 minutos de irradiação foi de 0,4°C e tal é perceptível no segundo termograma do conjunto correspondente com a alteração do código de cores comparativamente com o primeiro termograma do conjunto. O aumento da potência para o valor de 0,37 W provocou um aumento das variações e totais de temperatura em ambos os locais de medida. Para além do surgimento da cor azul marinho na zona mais central do termograma, logo após os 3 minutos de irradiação, surge ainda um tom alaranjado também no centro do termograma. Para a potência de 0,37 W verifica-se um aumento da variação total da temperatura no interior do absorvedor bastante elevado comparativamente à potência anterior: de 0,1°C para 6,6°C. Desta forma, o surgimento do tom alaranjado poderá ter influência da temperatura elevada que se verifica no interior do absorvedor. Estes resultados imagiológicos vão de encontro aos resultados numéricos obtidos também com recurso ao Termómetro de IV e os termogramas mostram-se assim uma ferramenta útil na monitorização da temperatura superficial do fantoma. Por fim, para a potência de 0,76 W, o código de cores registrado nos três termogramas retrata um aumento claro da temperatura na zona central da imagem onde sabemos ser o local de incidência do feixe laser. No entanto, comparando o código de cores deste conjunto de termogramas com o código de cores do conjunto de termogramas anterior para a potência de 0,37 W, não são visíveis diferenças relevantes que permitam traduzir a maior variação total de temperatura verificada para a potência de 0,76 W. Ainda assim, podemos afirmar que para as condições definidas nesta irradiação, os termogramas recolhidos pelo Termómetro de IV constituem uma ferramenta viável de monitorização qualitativa da temperatura.

Todas as irradiações na experiência em estudo foram realizadas à temperatura ambiente constante de 22°C, no entanto, é possível reparar que para as potências de 0,37 W e 0,76 W os termogramas correspondentes aos minutos 3 e 5 de irradiação possuem um código de cores envolvente do fantoma diferente do registrado para o instante 0 da irradiação, em particular para o conjunto da potência de 0,76 W. Tendo em conta o funcionamento o Termómetro de IV para apresentação do código de cores em cada

termograma, podemos antever que a temperatura do ar envolvente do fantoma seja afetada pelo feixe laser de forma considerável, resultando numa variação do código de cores apresentado no termograma.

Tabela 6.4: Conjunto de termogramas registados para a experiência C.1.a. Cada linha da tabela reúne o conjunto de três termogramas registados nos minutos 0, 3 e 5 da irradiação a uma dada potência. A escala de cores usada pelo Termómetro de IV é apresentada no lado direito de cada linha.

Tempo (min)	0	3	5
Potência (W)			
0,03			
0,37			
0,76			

A experiência realizada sobre o fantoma C.1.b (espessura de 5 mm) incluiu irradiações com potências entre 0,03 W e 2,30 W. A temperatura ambiente manteve-se constante nos 22°C à exceção da irradiação de 0,03 W que foi realizada a 19°C.

A Tabela 6.5 reúne os termogramas registados para todos os intervalos de leitura de cada irradiação sob o fantoma de 5 mm de espessura. Em cada irradiação foram registados três termogramas correspondentes aos intervalos de leitura de 0, 3 e 5 minutos.

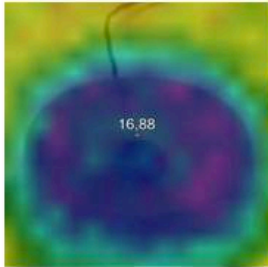
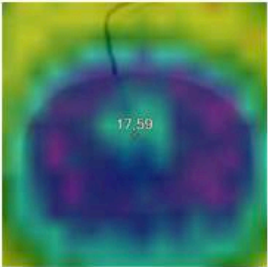
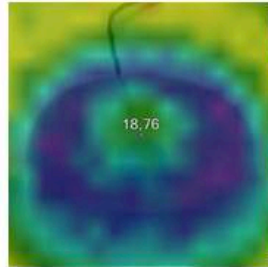
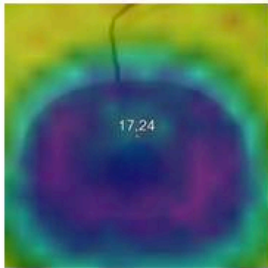
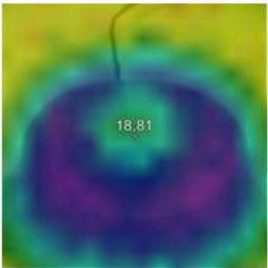
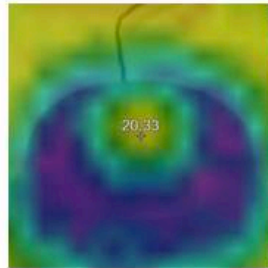
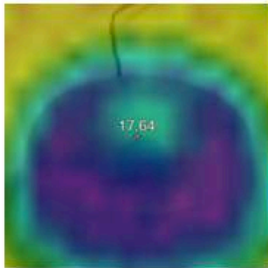
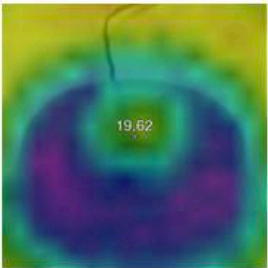
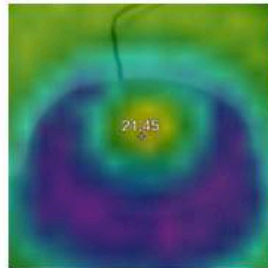
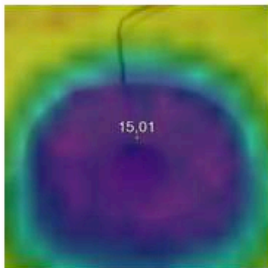
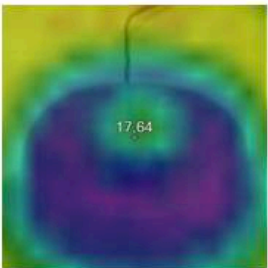
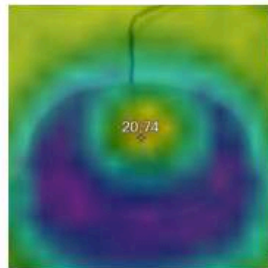
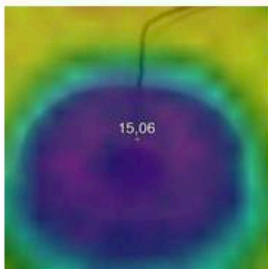
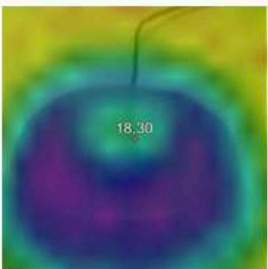
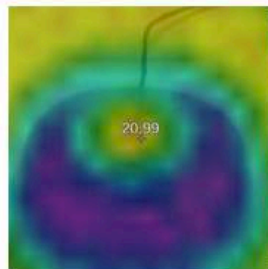
Para a potência de 0,76 W, a superfície do fantoma verifica uma variação total de 1,9°C e o interior do absorvedor uma variação de 3,1°C. Na zona central dos termogramas, no local de incidência do feixe laser, surge a cor azul marinho que para o final do minuto 5 dá lugar à cor verde. Esta variação de cor

traduz o aumento de temperatura registado. A variação de $0,7^{\circ}\text{C}$ verificada no final dos 3 minutos de irradiação é também visível no terceiro termograma do conjunto para a irradiação com $0,76\text{ W}$.

A potência de $1,10\text{ W}$ por sua vez, provocou um aumento de $1,4^{\circ}\text{C}$ na superfície do fantoma para os primeiros 3 minutos de irradiação e um aumento total de temperatura de $3,1^{\circ}\text{C}$ ao longo de toda a irradiação. Esta variação de temperatura é identificável na variação do código de cores registado nos termogramas recolhidos no final dos minutos 0, 3 e 5. Comparativamente ao conjunto de termogramas anteriores, correspondentes à potência de $0,76\text{ W}$, também é possível identificar a variação total superior que se verificou na potência de $1,10\text{ W}$ com o surgimento de um tom mais próximo do amarelo no último termograma recolhido para este segundo conjunto de termogramas. O aumento da potência do feixe laser para o valor de $1,50\text{ W}$ originou um novo aumento da temperatura superficial do fantoma em $3,9^{\circ}\text{C}$. Este acontecimento é identificável nos termogramas com o surgimento da cor amarelo na zona central da imagem no local de incidência do feixe laser sobre o fantoma. Também para a potência do feixe laser de $1,82\text{ W}$ o aumento de temperatura registado é corroborado pelos termogramas recolhidos para os minutos 0, 3 e 5 de irradiação. Esta potência origina um aumento da temperatura superficial do fantoma em $3,9^{\circ}\text{C}$ para a irradiação total. Finalmente e de igual forma, a potência do feixe laser $2,30\text{ W}$ origina um aumento da temperatura superficial do fantoma que também é identificável nos termogramas registados ao longo da irradiação para os minutos 0, 3 e 5.

Concluindo, assente-se mais uma vez a viabilidade da utilização dos termogramas como meio de monitorização qualitativa da temperatura superficial do fantoma.

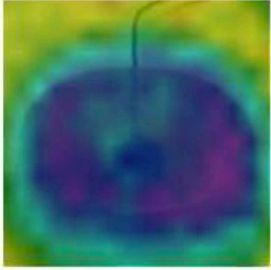
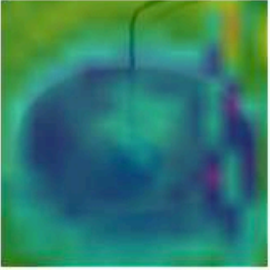
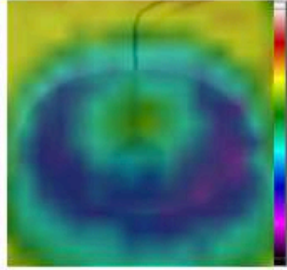
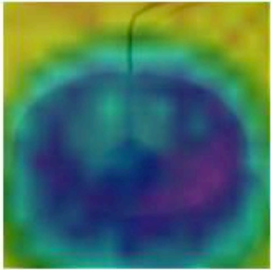
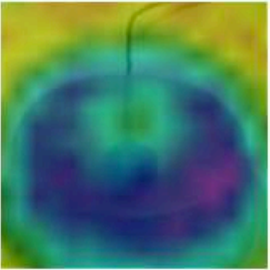
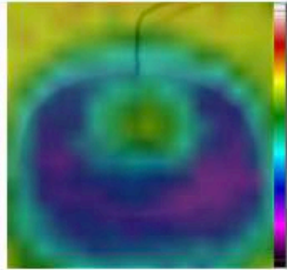
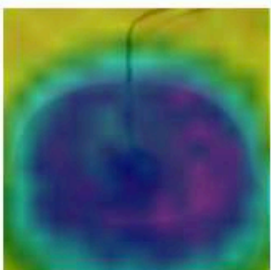
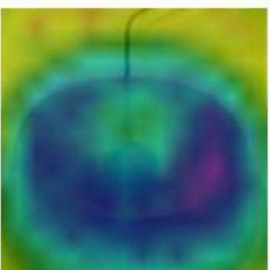
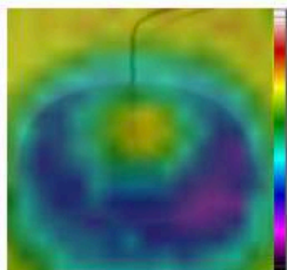
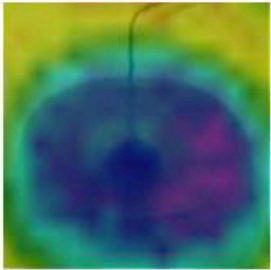
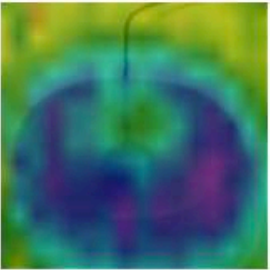
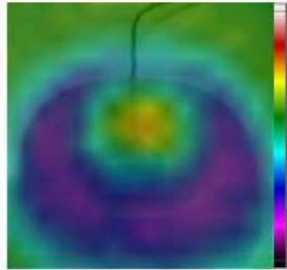
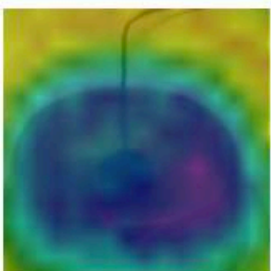
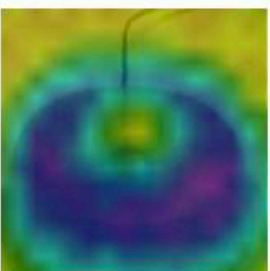
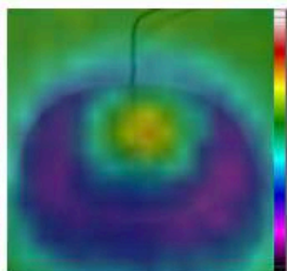
Tabela 6.5: Conjunto de termogramas registrados para a experiência C.1.b. Cada linha da tabela reúne o conjunto de três termogramas registrados nos minutos 0, 3 e 5 da irradiação a uma dada potência. A escala de cores usada pelo Termómetro de IV é apresentada no lado direito de cada linha.

Tempo (min) / Potência (W)	0	3	5
0,76			
1,10			
1,50			
1,82			
2,30			

Para experiência C.1.c realizada sobre o fantoma C.1 (espessura de 10 mm), a monitorização da temperatura na superfície do fantoma não é realizada para a potência de 0,37 W devido à avaria do Termómetro de IV. Assim, foram registadas apenas as temperaturas superficiais do fantoma para as irradiações a partir da potência 0,76 W. A temperatura ambiente varia entre os 19°C e os 22°C.

A Tabela 6.6 reúne todos os termogramas recolhidos para a experiência em estudo, sendo que para cada valor de potência foram recolhidos três termogramas nos minutos 0, 3 e 5 da irradiação. A análise individual do conjunto de três termogramas para cada potência permite, em todos os conjuntos, identificar na zona central do termograma o aumento de temperatura que se verifica em todas as potências. Adicionalmente, a observação dos termogramas correspondentes ao minuto 3 de irradiação para as diferentes potências permite-nos identificar qual das potências verificou maior variação no intervalo considerado. Por exemplo, atentando aos termogramas correspondentes ao minuto 5 de irradiação para as potências de 1,10 W e 1,50 W, verificamos que o termograma da potência 1,50 W possui um tom avermelhado na área central da imagem que não é visível no termograma da potência 1,10 W. Sabendo que em ambas as potências, a temperatura superficial inicial do fantoma era aproximadamente a mesma e que a potência de 1,50 W provocou uma maior variação total da temperatura ao longo da radiação, podemos inferir uma maior temperatura final na superfície do fantoma para esta potência, o que é observável também nos termogramas.

Tabela 6.6: Conjunto de termogramas registados para a experiência C.1.b. Cada linha da tabela reúne o conjunto de três termogramas registados nos minutos 0, 3 e 5 da irradiação a uma dada potência. A escala de cores usada pelo Termómetro de IV é apresentada no lado direito de cada linha.

Tempo (min) / Potência (W)	0	3	5
0,76			
1,10			
1,50			
1,82			
2,30			

6.2.2 Câmara de telemóvel

A câmara de telemóvel permitiu registar imagens da difusão do feixe laser provocada pela sua interação com o fantoma. Este instrumento é utilizado em todos os fantasmas construídos para o projeto.

6.2.2.1 Fantoma A

O registo de imagens com recurso à câmara de telemóvel foi significativo para o fantoma A.2 na medida em que, a difusão do feixe laser, ficou visível nas imagens recolhidas com a câmara do telemóvel e a partir da potência de 0,76 W. A Figura 6.54 apresenta uma fotografia da difusão do feixe laser que incide na lateral do fantoma A.2 e se propaga até à porção de Tinta da China. A circunferência oval tracejada a vermelho delimita o trajeto do feixe laser desde a sua saída do colimador até atingir a porção de Tinta.

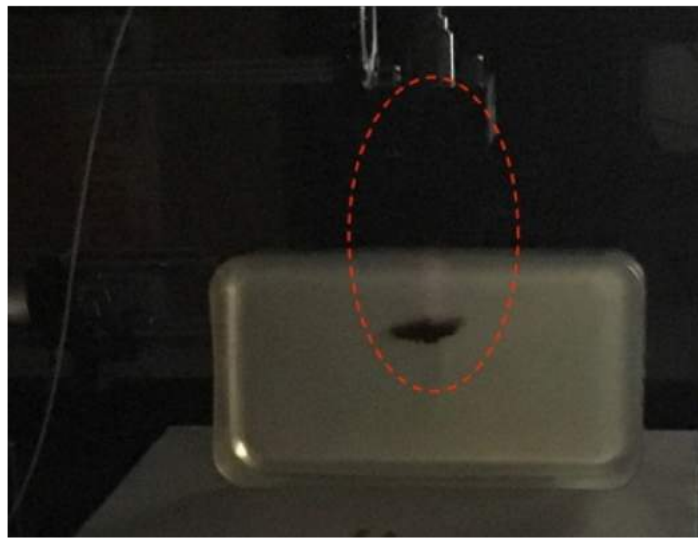


Figura 6.54: – Imagem da difusão do feixe laser no interior do fantoma registada com recurso à câmara de telemóvel. O trajeto do feixe laser é delimitado pela circunferência oval a tracejado vermelho. O feixe é visível logo acima da porção de Tinta da China, próximo do centro da circunferência oval.

Esta imagem foi captada com as luzes do laboratório desligadas, no entanto tal não resultou numa diferença significativa de aumento da visibilidade do feixe através da câmara de telemóvel. Por outro lado, a olho nu a diferença já é significativa na medida em que a cor vermelha da difusão do feixe é mais intensa.

6.2.2.2 Fantoma B

Nas experiências realizadas com o fantoma B.1 foram registadas algumas imagens da difusão do feixe laser resultado da interação com o fantoma recorrendo à câmara de telemóvel. A Figura 6.55 mostra duas imagens dessa mesma difusão em irradiações distintas na experiência 1 do fantoma B.1.

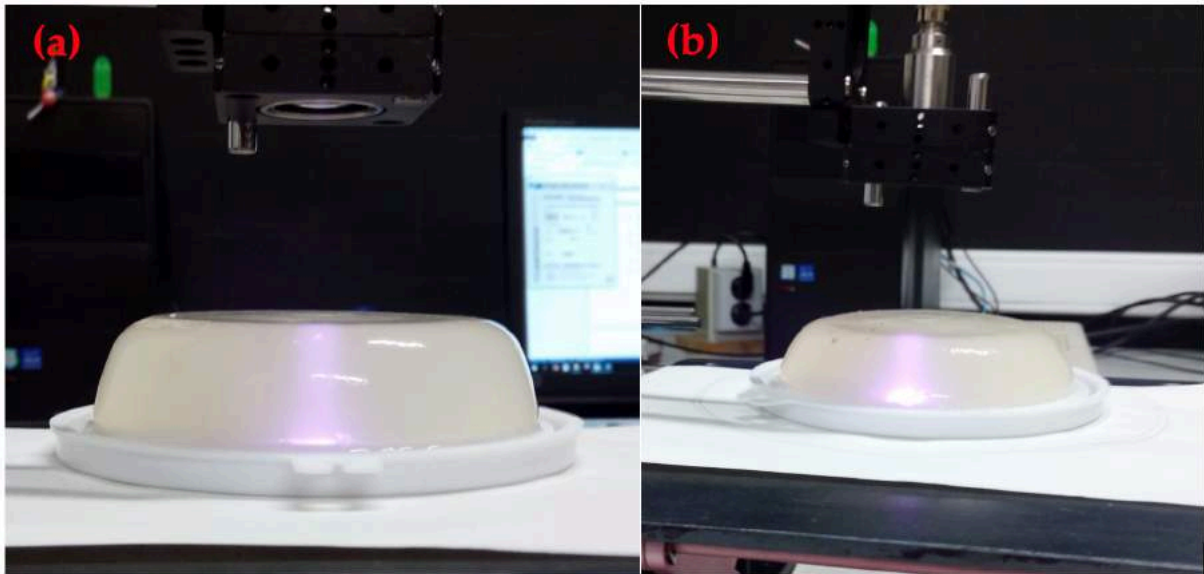


Figura 6.55: Imagens da difusão do feixe laser no interior do fantoma B.1 durante a experiência 1 sob irradiação com potências de 0,37 W (a) e 1,50 W (b).

As imagens mostram um claro aumento da intensidade da cor a que surge a difusão do feixe laser com o aumento da potência de 0,37 W para 1,50 W. Adicionalmente, ainda que as imagens não tenham sido recolhidas com a câmara na mesma posição, parece haver a saturação da imagem junto à base do fantoma para a potência de 1,50 W (ver Figura 6.54 (b)) com o surgimento de uma mancha de cor branca nessa zona.

No caso das experiências realizadas com o fantoma B.2 também foram registadas algumas imagens do feixe e dos resultados da sua incidência no fantoma com os absorvedores incorporados. A Figura 6.56 mostra o feixe laser a incidir sobre o fantoma na experiência B.2.1 com a irradiação de 0,37 W.

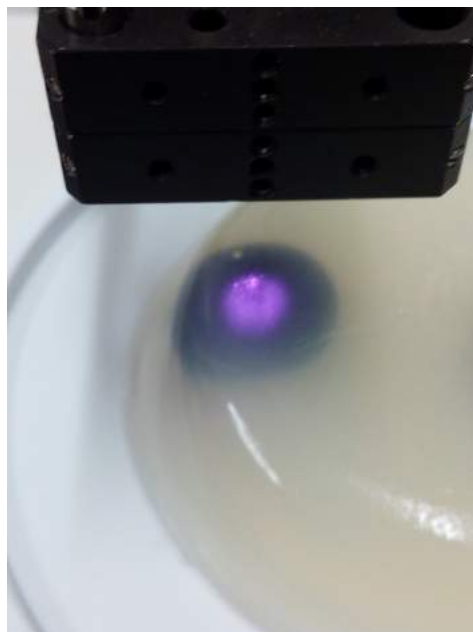


Figura 6.56: Imagem da difusão do feixe laser a incidir sobre o fantoma B.2 na experiência 1 com a potência de 0,37 W.

Para a potência de 1,82 W, após os 5 minutos de irradiação, iniciou-se a deformação da superfície do fantoma que se traduziu no surgimento de bolhas de ar e de uma ligeira concavidade com 2,5 mm de diâmetro. Esta irradiação foi então interrompida.

A Figura 6.57 mostra o fantoma B.2 sob irradiação da potência de 1,82 W sendo visível (imagem (a)) o surgimento de uma deformação com a maior luminosidade na superfície do absorvedor e a concavidade resultante da deformação do fantoma (imagem (b)).

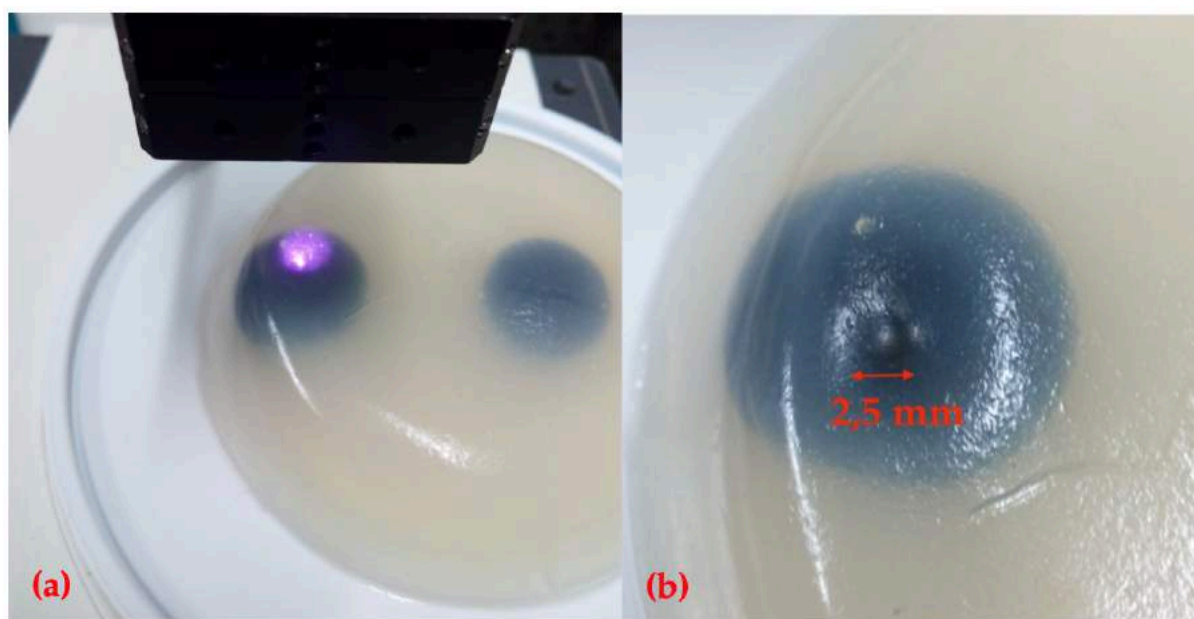


Figura 6.57: Imagens do fantoma B.2 sob irradiação de 1,82 W na experiência 2. Na imagem (a) é visível a difusão provocada pela interação entre o feixe laser e o fantoma e na imagem (b) mostra-se a deformação resultante que tem formato concavo de um sulco com 2,5 cm de diâmetro.

Adicionalmente, na experiência B.2.2 também podemos ver a difusão do feixe laser com recurso à câmara de telemóvel como mostra a 6.58.

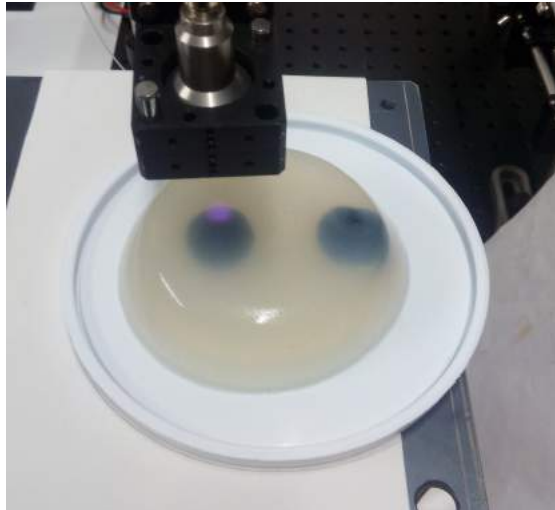


Figura 6.58: Imagem do fantoma B.2 sob irradiação do feixe laser com potência de 0,37 W.

6.2.2.3 Fantoma C

Na experiência C.1.a, na irradiação com a potência de 2,30 W, surgiram bolhas de ar na superfície do absorvedor, no final do minuto 4 de irradiação destacadas na Figura 6.58 com a seta a vermelho.

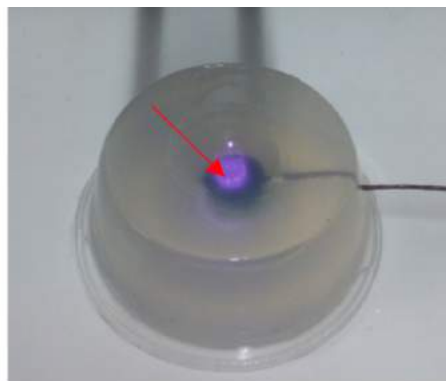


Figura 6.59: Imagem da difusão do feixe laser com potência de 2,30 W sobre o fantoma B.1.c. Formam-se bolhas de ar na superfície do absorvedor destacadas com a seta a vermelho na zona central da imagem sobre a superfície do fantoma. No lado direito da imagem é visível o fio do Termopar a atravessar o fantoma e entrar no absorvedor.

Na experiência C.2.a realizou-se apenas uma irradiação com a potência de 0,37 W. A Figura 6.60 permite observar com clareza a difusão do feixe laser ao interagir com a espessura de 1 mm de fantoma e ao incidir na superfície do absorvedor.

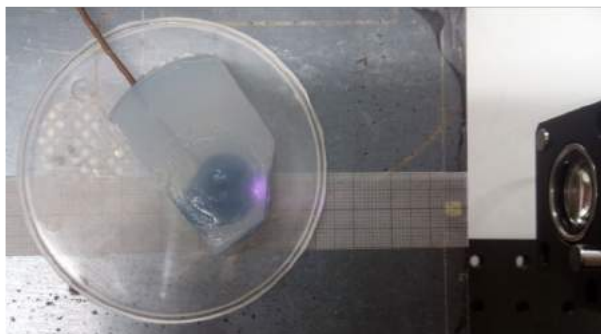


Figura 6.60: O fantoma com 1 mm de espessura é irradiado com o feixe laser de potência 0,37 W. O Termopar no interior do absorvedor regista a evolução da temperatura.

O Termopar é também visível a atravessar o fantoma e entrar no interior do absorvedor. Após incidir na superfície do absorvedor a difusão sofrida pelo feixe deixa de ser visível, o que indica que toda a radiação é depositada na espessura de 1 mm de fantoma e na esfera absorvedora.

No caso da experiência C.2.b as potências utilizadas para as diferentes irradiações foram de 0,37 W a 1,10 W. A Figura 6.61 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara de telemóvel no início de cada irradiação com as potências de 0,37 W (a), 0,73 W (b) e 1,10 W (c) sobre o fantoma de espessura 5 mm.

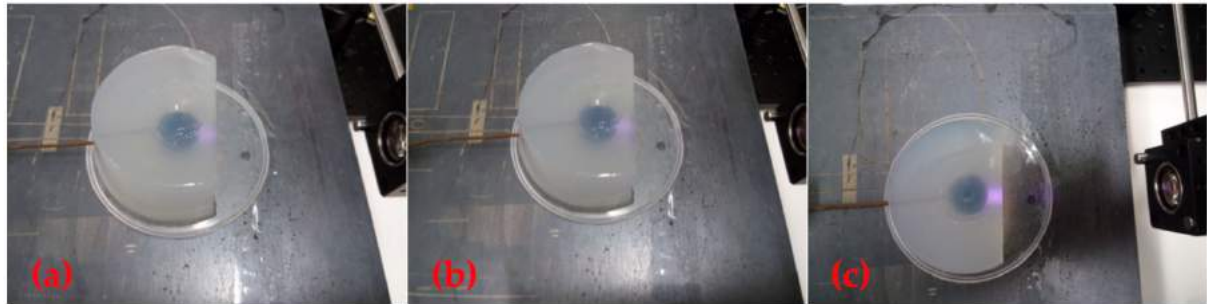


Figura 6.61: Imagens da difusão do feixe laser a incidir na superfície do fantoma de 5 mm de espessura e em seguida na superfície do absorvedor provocada pela interação do fantoma com as potências de 0,37 W (a), 0,76 W (b) e 1,10 W (c), recolhidas com recurso à câmara de telemóvel.

Nas imagens recolhidas é clara a difusão do feixe laser provocada pela sua interação com o fantoma. Verifica-se em todas as imagens correspondentes às diferentes potências que após a superfície oposta do absorvedor, não surge a difusão do feixe laser, o que indica que a deposição da radiação ocorre toda entre a superfície de incidência do feixe laser no fantoma e a esfera absorvedora. Atentando na zona de incidência do feixe laser no fantoma, verifica-se que o aumento da potência do feixe laser de 0,76 W para 1,10 W é identificável com o surgimento de maior luminosidade na cor roxa a que surge a difusão do feixe laser na imagem correspondente à última potência, comparativamente com a luminosidade das duas imagens restantes (a) e (b) na mesma zona da imagem.

Por fim, na experiência C.2.c foram utilizadas as potências de 0,37 W a 1,10 W. A Figura 6.62 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara de telemóvel no início de cada irradiação com as potências de 0,37 W (a), 0,73 W (b) e 1,10 W (c) sobre o fantoma de espessura 10 mm.

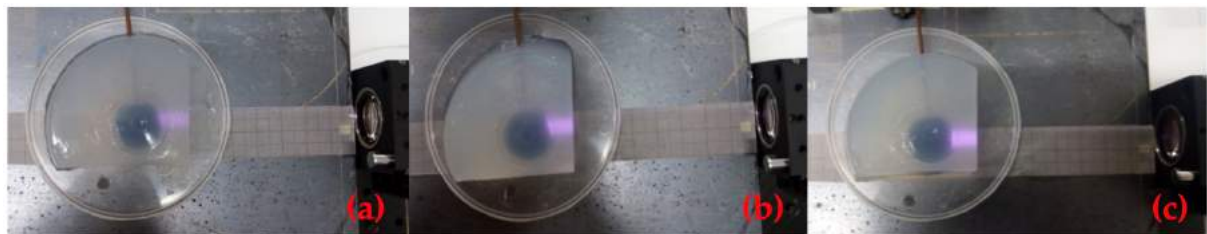


Figura 6.62: Imagens da difusão do feixe laser a incidir na superfície do fantoma de 10 mm de espessura e em seguida na superfície do absorvedor provocada pela interação do fantoma com as potências de 0,37 W (a), 0,76 W (b) e 1,10 W (c), recolhidas com recurso à câmara de telemóvel.

As diferentes imagens obtidas permitem, de forma clara, identificar o aumento da potência do feixe laser desde a potência de 0,37 W na imagem (a) da Figura até à potência máxima utilizada de 1,10 W representada na imagem (c). Tal é visível na zona de incidência do feixe laser, mais uma vez com o aumento da luminosidade da cor roxa que identifica a difusão sofrida pelo feixe laser ao incidir no fantoma de espessura 10 mm. Mais uma vez, o feixe não atravessa a esfera absorvedora e toda a radiação incidente é concentrada no trajeto que inclui o fantoma de 10 mm e a esfera absorvedora de 1,75 cm de diâmetro.

6.2.2.4 Fantoma D

A Figura 6.63 representa a imagem recolhida para o ensaio em estudo com recurso à Câmara do telemóvel na experiência D.1.a.

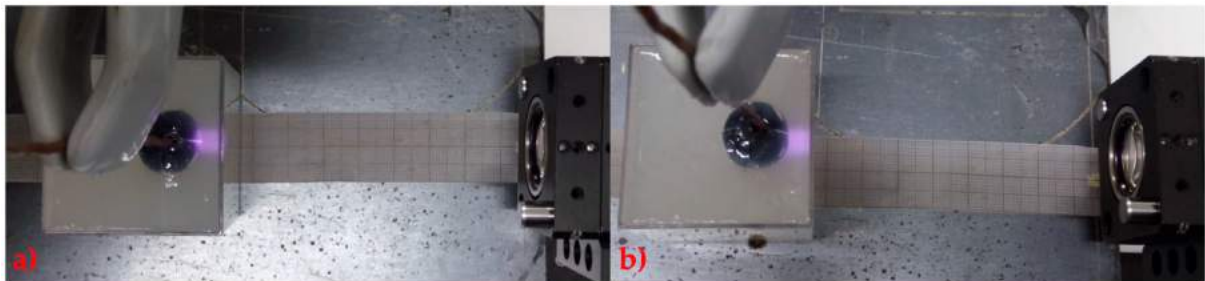


Figura 6.63: O fantoma com 5 mm de espessura é irradiado com o feixe laser de potência 0,37 W (imagem a) e com a potência de 0,76 W (imagem b). O Termopar no interior do absorvedor regista a evolução da temperatura.

A figura permite observar com clareza a difusão do feixe laser ao interagir com a espessura de 10 mm de fantoma e ao incidir na superfície do absorvedor para ambas as potências utilizadas. O Termopar é também visível a entrar no orifício do absorvedor. Após incidir na superfície do absorvedor a difusão sofrida pelo feixe deixa de ser visível, o que indica que toda a radiação é depositada na espessura de 5 mm de fantoma e na esfera absorvedora. Através das duas imagens da figura não é claro o aumento de potência do feixe laser de 0,37 W para 0,76 W e tal poderá dever-se à acumulação da difusão do feixe laser na curta espessura de fantoma entre a superfície de incidência e a superfície do absorvedor.

A Figura 6.64 representa a imagem recolhida para o ensaio em estudo com recurso à Câmara do telemóvel na experiência D.1.b.

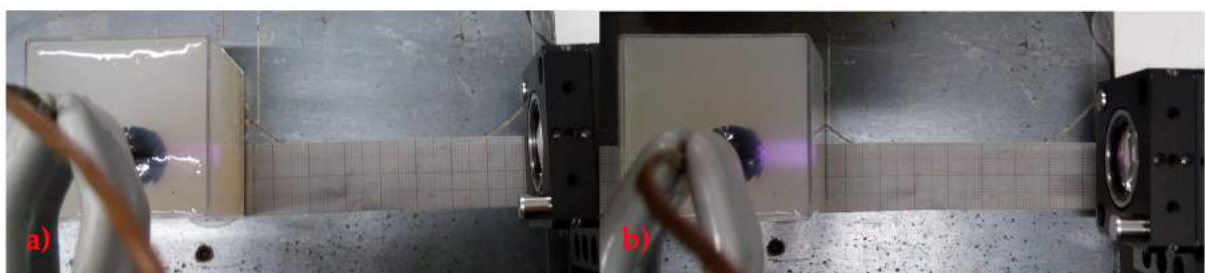


Figura 6.64: O fantoma com 10 mm de espessura é irradiado com o feixe laser de potência 0,37 W (imagem a) e com a potência de 0,76 W (imagem b). O Termopar no interior do absorvedor regista a evolução da temperatura.

A figura mostra de forma clara a difusão do feixe laser provocada pela interação do mesmo com o fantoma. Através das duas imagens da figura é claro o aumento de potência do feixe laser de 0,37 W para 0,76 W.

Comparando o resultado obtido em ambas as experiências D.1.a e D.1.b para a propagação do feixe laser no fantoma, podemos afirmar que uma espessura superior a 5 mm permite uma melhor distinção das duas potências em uso. Para a mesma área de fantoma, menor potência significa menor Irradiância (ver equação 2.3) que se traduz na menor quantidade de fótons a atingir o sensor da câmara de telemóvel.

A Figura 6.65 representa a imagem recolhida para o ensaio em estudo com recurso à Câmara do telemóvel na experiência D.1.c.

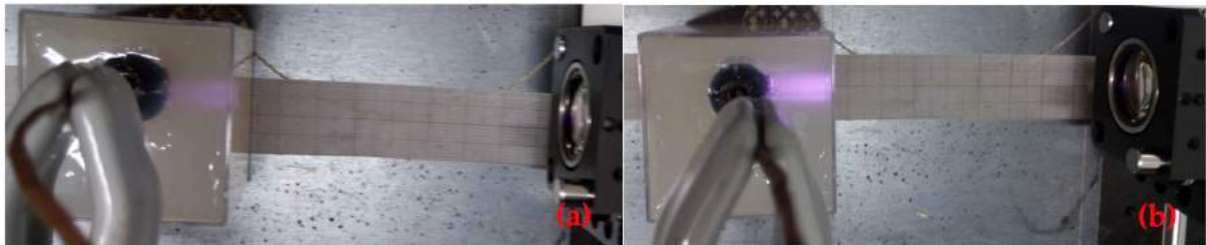


Figura 6.65: O fantoma com 14 mm de espessura é irradiado com o feixe laser de potência 0,37 W (imagem a) e com a potência de 0,76 W (imagem b). O Termopar no interior do absorvedor regista a evolução da temperatura.

A figura mostra de forma clara a difusão do feixe laser provocada pela interação do mesmo com o fantoma. A comparação das duas imagens da figura mostra o aumento de potência do feixe laser de 0,37 W para 0,76 W.

A Figura 6.66 representa a imagem recolhida para o ensaio em estudo com recurso à Câmara do telemóvel na experiência D.1.d.

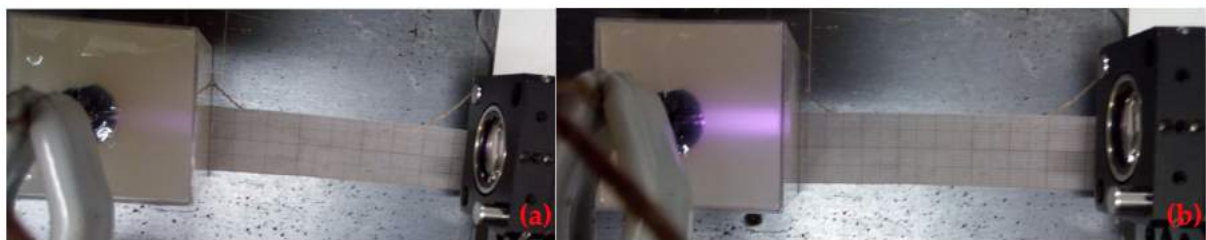
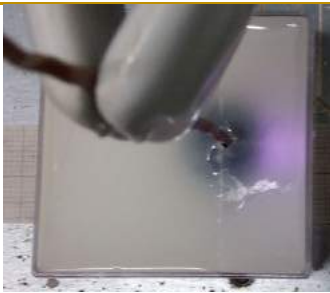
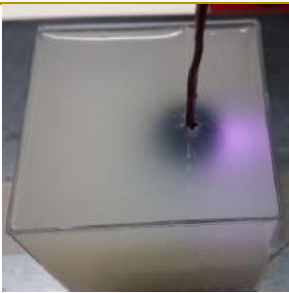
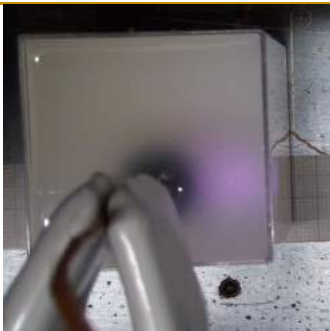



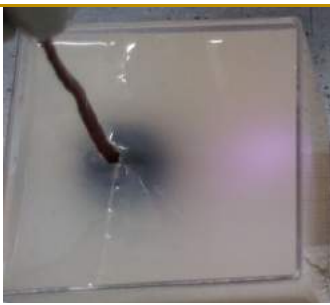



Figura 6.66: O fantoma com 19 mm de espessura é irradiado com o feixe laser de potência 0,37 W (imagem a) e com a potência de 0,76 W (imagem b). O Termopar no interior do absorvedor regista a evolução da temperatura.

A figura mostra de forma clara a difusão do feixe laser provocada pela interação do mesmo com o fantoma. A comparação das duas imagens da figura mostra o aumento de potência do feixe laser de 0,37 W para 0,76 W.




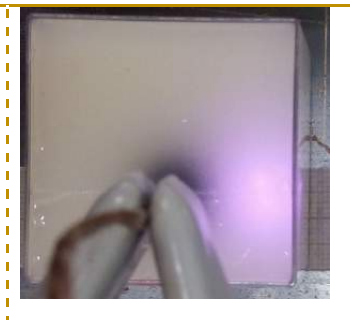

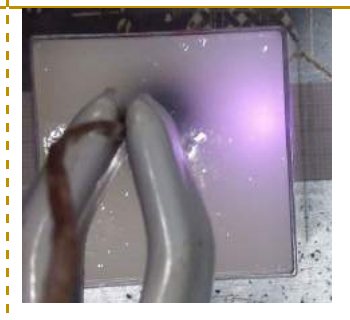
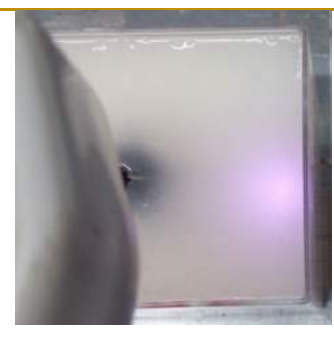

A Tabela 6.7 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara de telemóvel nas duas irradiações para cada uma das experiências realizadas sobre o fantoma D.2.

Tabela 6.7: Imagens recolhidas nas duas irradiações realizadas sobre as várias espessuras do fantoma D.2.

	Potência (W)	0,37	0,76
Espessura (mm)			
5			
10			
14			
19			

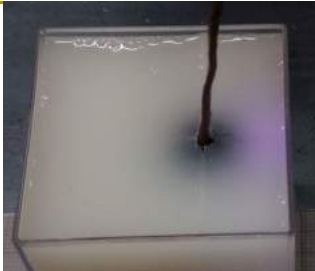







A Tabela 6.8 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara de telemóvel nas duas irradiações para cada uma das experiências realizadas sobre o fantoma D.3.

Tabela 6.8: Imagens recolhidas nas duas irradiações realizadas sobre as várias espessuras do fantoma D.3.

Potência (W)	0,37	0,76
Espessura (mm)		
5		
10		
14		
19		

A Tabela 6.9 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara de telemóvel nas duas irradiações para cada uma das experiências realizadas sobre o fantoma D.4.

Tabela 6.9: Imagens recolhidas nas duas irradiações realizadas sobre as várias espessuras do fantoma D.4.

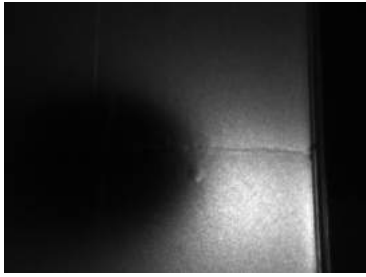
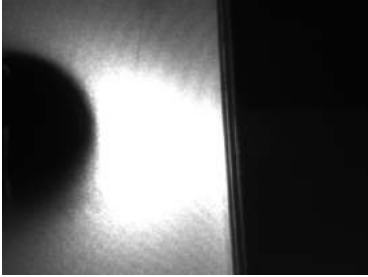
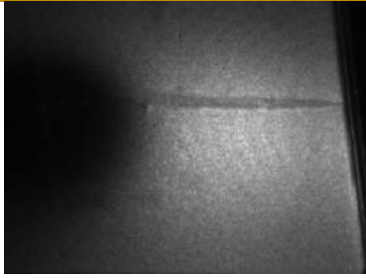
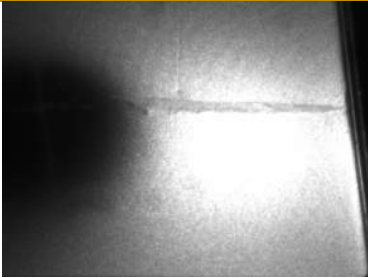
Potência (W)	0,37	0,76
Espessura (mm)		
5		
10		
14		
19		

6.2.1 Câmara USB

6.2.1.1 Fantoma D


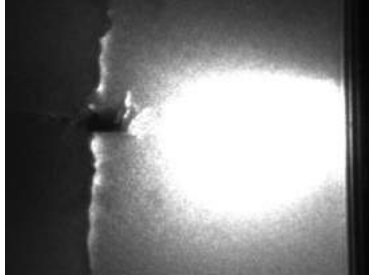

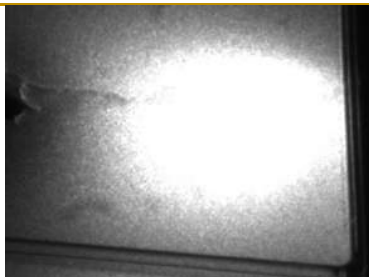

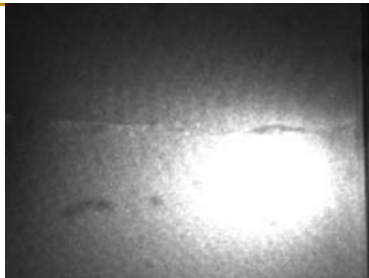

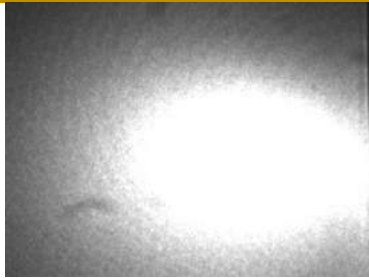
A Tabela 6.10 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara USB nas duas irradiações para apenas as experiências D.2.a e D.2.b realizadas sobre o fantoma D.2.

Tabela 6.10: Imagens da propagação do feixe laser no fantoma D.2 recolhidas com a câmara USB.

Potência (W)	0,37	0,76
Espessura (mm)		
5		
10		





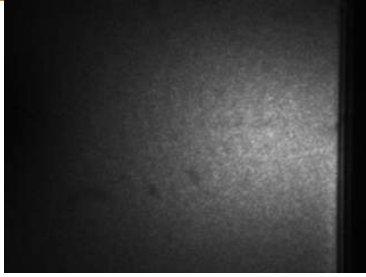
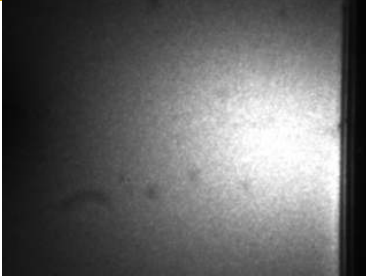
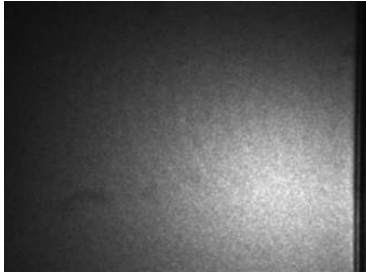
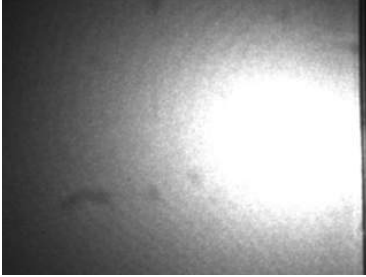
A Tabela 6.11 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara USB nas duas irradiações para as experiências realizadas sobre o fantoma D.3.

Tabela 6.11: Imagens da propagação do feixe laser no fantoma D.2 recolhidas com a câmara USB.

Potência (W)	0,37	0,76
Espessura (mm)		
5		
10		
14		
19		

A Tabela 6.12 reúne as imagens recolhidas com recurso à câmara USB nas duas irradiações para as experiências realizadas sobre o fantoma D.4.

Tabela 6.12: Imagens da propagação do feixe laser no fantoma D.2 recolhidas com a câmara USB.

Espessura (mm)	Potência (W)	
	0,37	0,76
5		
10		
14		
19		

6.3 Análise comparativa

6.3.1 Instrumentos Metrológicos

6.3.1.1 Termómetro de IV e termómetro Termopar

Nas diversas experiências conduzidas ao longo do estudo, o Termopar teve sempre como função a metrologia da temperatura no interior no absorvedor, enquanto que o Termómetro de IV foi utilizado para medir a temperatura superficial do fantoma no ponto de incidência do feixe laser. A utilização destes dois instrumentos em simultâneo permite inferir sobre a propagação do feixe laser no interior do

fantoma até alcançar o absorvedor através do cálculo da diferença entre as temperaturas registadas pelo Termopar e pelo Termómetro de IV. Este resultado permite inferir sobre a quantidade de radiação que alcança o absorvedor ou que por outro lado sofre dispersão no meio túrbido onde se propaga. Assim, depreende-se que estes dois instrumentos complementam a utilização um do outro e permitem resultados mais conclusivos sobre a propagação do feixe laser no interior do fantoma do que obter-se apenas a temperatura na superfície do fantoma ou no interior do absorvedor. A Figura 6.67 mostra a diferença de 2,5°C que se regista entre o interior do absorvedor e a superfície do fantoma, no local de incidência do feixe laser no início da experiência C.1.c.



Figura 6.67: Imagem dos dois instrumentos Termómetro de IV e Termopar durante a experiência C.1. Na imagem é visível o fio do Termopar a atravessar o fantoma e a entrar no absorvedor.

6.3.1.2 Sensor de fibra óptica

A comparação dos resultados obtidos com o sensor de fibra óptica não é passível de uma análise direta na medida em que, como já mencionado, os resultados obtidos tanto pelo Termopar como pelo Termómetro de IV são valores absolutos de temperatura. Enquanto que, os resultados possíveis com o sensor de fibra óptica construído para o projeto consistem em variações de temperatura ao longo das diversas irradiações. Por outro lado, o sensor de fibra óptica foi colocado no interior do absorvedor e na espessura de fantoma irradiada pelo feixe laser, a uma profundidade de aproximadamente 8 mm. Assim, apenas é possível comparar os resultados obtidos pelo sensor com os obtidos pelo Termopar.

6.3.2 Instrumentos Imagiológicos

6.3.2.1 Termómetro de IV e câmara de telemóvel

No fantoma A.2, antes de se dar por terminada a irradiação com a potência de 1,82 W surgiu um orifício à superfície do fantoma localizado no centro da porção de Tinta da China, próximo do ponto **b** considerado ao longo da experiência. O orifício é visível a olho nu, assim como a difusão do feixe laser no seu interior, indicado pela seta vermelha na Figura 6.68 (a).

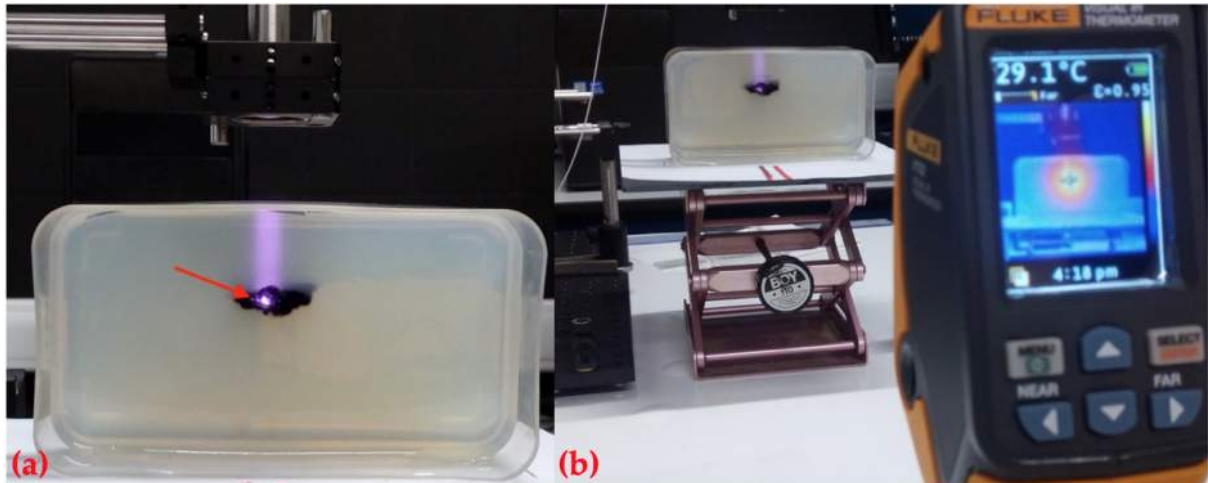


Figura 6.68: Imagem da difusão do feixe laser em contacto com o fantoma registada com a câmara do telemóvel. A difusão do feixe laser é visível também no interior da porção de Tinta da China. O orifício é localizado com a seta a vermelho em (a). O Termómetro de IV em (b) permite registar imagens ilustrativas das variações de temperatura nos pontos **a** e **b** considerados.

As imagens apresentadas na Figura 6.68 permitem comparar os instrumentos Termómetro de IV e câmara de telemóvel, enquanto meios imagiológicos de avaliação do comportamento do feixe laser no interior do fantoma A.2. Verificamos que ambos os instrumentos notificam a existência de uma anomalia localizada no ponto **b**, no entanto, apenas a câmara de telemóvel (imagem (a)) permite obter uma imagem clara da propagação do feixe laser no interior do fantoma e posteriormente no interior da porção de tinta. Para as experiências realizadas com o fantoma A, o Termómetro de IV não permite observar a difusão do feixe no interior do fantoma nem da porção de tinta, antes ou após surgir o orifício. Os termogramas recolhidos para a experiências A.1 e A.2 não permitem uma análise conclusiva da variação da temperatura num determinado ponto, em resultado da irradiação, baseada apenas no código de cores criado em cada termograma. As temperaturas máxima e mínima nos termogramas variam entre termogramas de diferentes instantes da irradiação e por isso as cores atribuídas a cada valor de temperatura também. Assim, os termogramas não permitem uma análise conclusiva do comportamento da radiação laser no interior do fantoma baseada apenas no código de cores criado nos diferentes termogramas. Em termos de instrumento imagiológico, a câmara de telemóvel representa, para a experiência

com o fantoma A, um instrumento de avaliação do comportamento do feixe laser no interior do fantoma mais eficiente que o Termómetro de IV.

No que respeita aos resultados obtidos com o fantoma B.1 foram registadas algumas imagens com recurso à câmara de telemóvel que permitem estabelecer algumas comparações entre os dois instrumentos considerados. A Figura 6.69 mostra as imagens recolhidas para a experiência 1 sobre o fantoma B.1 em irradiações com diferentes potências do feixe laser.

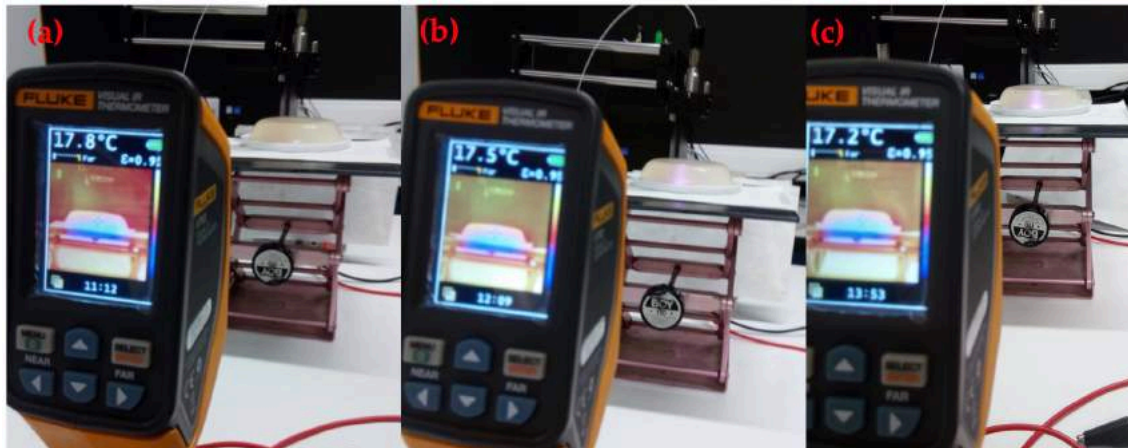


Figura 6.69: Imagens recolhidas com recurso à câmara do telemóvel durante as irradiações com potências de 0,03 W (a), 0,76 W (b) e 1,50 W (c) sobre o fantoma B.1.

A Figura 6.69 reúne três imagens de três irradiações distintas sobre o fantoma B.1. As duas imagens (b) e (c) mostram a difusão do feixe laser ao incidir no fantoma de forma clara nas imagens recolhidas com a câmara de telemóvel, no entanto, nos termogramas recolhidos pelo Termómetro de IV bem como nas imagens apresentadas tal não é visível em qualquer potência do feixe utilizada para as irradiações realizadas. Os termogramas recolhidos com recurso ao Termómetro de IV não permitem uma análise comparativa da evolução da temperatura no interior do fantoma entre diferentes termogramas, pela razão já mencionada de que o tratamento das imagens realizado pelo Termómetro de IV depende apenas da temperatura máxima e mínima a serem captadas pelo Termómetro. Assim, mais uma vez, a câmara de telemóvel consiste num instrumento imagiológico de considerável sucesso para avaliara a propagação do feixe laser no interior do fantoma, enquanto que o Termómetro de IV permite apenas uma análise conclusiva se individual a cada termograma.

Por sua vez, os resultados imagiológicos obtidos para o fantoma C demonstram mais uma vez que a câmara de telemóvel constitui uma boa ferramenta da avaliação da propagação do feixe laser no fantoma ao permitir uma imagem direta do mesmo, enquanto que os termogramas recolhidos com recurso ao Termómetro de IV não fornecem uma imagem direta do feixe, mas um variar do código de cores dos mesmos em resultado do aumento da temperatura. A Figura 6.70 apresenta a imagem da difusão do

feixe captada pela câmara do telemóvel e o termograma criado pelo Termómetro de IV para o mesmo fantoma.

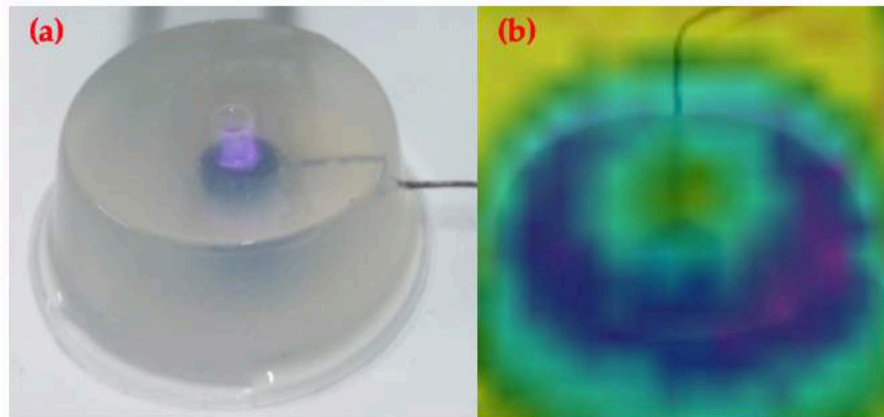



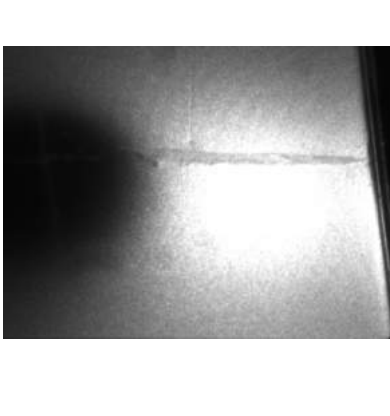


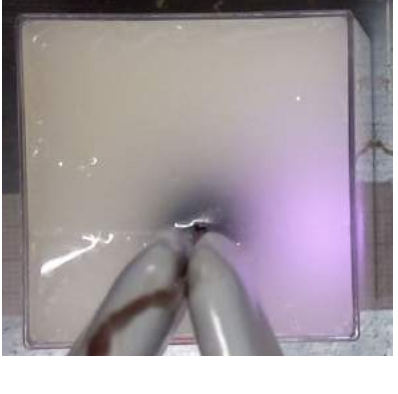

Figura 6.70: (a) Imagem da difusão do feixe laser sobre o fantoma C.1. (b) Imagem do Termómetro de IV a captar a imagem do fantoma C.1.

Verifica-se mais uma vez que o termograma captado pelo Termómetro de IV não permite observar diretamente o feixe laser a incidir no fantoma e posteriormente no absorvedor, no entanto a distribuição da temperatura é diferenciável através do termograma. Desta forma, verifica-se que também no fantoma C a câmara do telemóvel funciona como uma ferramenta útil da análise da propagação do feixe laser no fantoma enquanto que o Termómetro de IV permite apenas avaliar a distribuição da temperatura na superfície do fantoma através do código de cores criado.

6.3.2.2 Câmara de telemóvel e câmara USB

Os resultados imagiológicos obtidos com estas duas câmaras permitem em ambos os casos a observação direta da difusão do feixe laser no interior do fantoma, mesmo que com diferentes coeficientes de difusão do fantoma. Como mencionado anteriormente, a câmara USB foi utilizada apenas sobre o fantoma D nas versões 2, 3 e 4. A Tabela 6.14 reúne imagens obtidas com os dois instrumentos para as diferentes concentrações de Intralípidos no fantoma D, na irradiação com 0,76 W realizada na espessura de 10 mm de fantoma.

Tabela 6.13: Imagens recolhidas pela câmara de telemóvel e pela câmara USB para as irradiações com potência de 0,76 W realizadas nas experiências D.2.b, D.3.b e D.4.b

Instrumento Versão do fantoma	Câmara telemóvel	Câmara USB
D.2		
D.3		
D.4		

6.4 Fantomas

6.4.1 Fantoma A

A construção do fantoma A permitiu tirar algumas conclusões. Nomeadamente, a presença da porção de Tinta da China incorporada no interior do fantoma origina uma deposição localizada e elevada de energia que resulta na cedência visível do fantoma com o surgimento de um orifício. Verifica-se ainda que a porção de Tinta da China incorporada não permite qualquer transmissão da radiação através de

si, uma vez que após o feixe laser alcançar a porção de tinta não é visível nenhuma radiação no trajeto seguido inicialmente pelo feixe como se pode constatar na imagem (a) da Figura 6.67.

Por forma a melhorar o estudo realizado sobre o fantoma A, as condições de execução das duas experiências sobre o fantoma devem garantir a variação da superfície de incidência do feixe laser bem como a porção da fantoma que se faz atravessar pelo laser. Desta forma, garantir-se-á que a cedência do fantoma se ocorrer, dever-se-á unicamente à acumulação de energia proveniente de uma dada potência e não pela acumulação de micro deformações ou pelo surgimento de correntes de convecção resultado das irradiações prévias. Adicionalmente, a posição escolhida para o Termómetro de IV deverá ser tal que nenhuma fonte de calor esteja presente no campo de visão do Termómetro para além do feixe laser.

6.4.2 Fantoma B

As experiências realizadas sobre o fantoma B.1 permitem analisar a influência da espessura de fantoma entre o trajeto do feixe laser no fantoma e a superfície de leitura do Termómetro de IV. Os resultados para ambas as experiências registaram semelhantes temperaturas iniciais e finais para a superfície do fantoma. No entanto, para a experiência B.1.1 o valor máximo de temperatura foi de $19,3^{\circ}\text{C}$, enquanto que para a experiência B.1.2 foi de $19,8^{\circ}\text{C}$. Seria de esperar que um aumento da espessura de fantoma entre o laser e a superfície de leitura resultasse numa diminuição da temperatura lida, uma vez que maior espessura de fantoma causaria maior difusão dos fotões no meio até alcançarem a superfície de leitura. Mas tal não sucedeu, houve inclusive um aumento da temperatura de $0,5^{\circ}\text{C}$. Verificamos ainda que para os mesmos intervalos de leitura, a experiência B.1.2 (com maior espessura de fantoma) registou maiores variações de temperatura para todas as potências utilizadas, i.e., em cada intervalo de leitura as diferentes potências laser originaram maiores variações de temperatura para a experiência B.1.2 do que para a experiência B.1.1.

Por outro lado, a comparação das duas experiências realizadas sobre o fantoma B.2 permite comparar a influência que a presença de um corpo absorvedor concentrador da radiação num dado ponto a uma dada distância da superfície de leitura da temperatura, tem sobre a evolução da temperatura superficial do fantoma ao longo das diferentes irradiações. Neste grupo de experiências, é possível verificar que um aumento da espessura do fantoma origina uma elevada diminuição da variação absoluta da temperatura à superfície do fantoma. Verificamos ainda que as temperaturas finais verificadas na experiência 1 são bastante superiores às obtidas na experiência 2. Ainda que as temperaturas de início para ambas as experiências com as correspondentes potências tenham uma diferença de aproximadamente 1°C , verificamos grandes diferenças nas temperaturas finais obtidas, comparando as diferentes espessuras de fantoma. Em particular, para a potência de $1,50\text{ W}$, a temperatura final é superior na experiência 1 em

5°C, comparativamente à experiência 2. No que respeita às variações em ambas as experiências, podemos confirmar que a menor variação de temperatura nos diferentes instantes de leitura se verifica na experiência 2. Em ambas as experiências, o intervalo com maior variação de temperatura registada para as diferentes potências corresponde sempre aos primeiros 5 minutos de irradiação.

A comparação das experiências B.1.1 e B.2.1 permite inferir sobre a influência da presença da esfera absorvedora na evolução da temperatura superficial do fantoma sob diferentes irradiações. Verifica-se que a presença da esfera absorvedora originou maior variação de temperatura ao longo das irradiações. No entanto, a presença da esfera absorvedora apenas permitiu o aumento da potência do feixe laser até 1,82 W, enquanto a irradiação do fantoma de configuração simples (experiência B.1.1) alcançou a potência de 3,13W sem originar deformação do fantoma. A maior variação de temperatura superficial ocorre para os primeiros 5 minutos de irradiação em ambas as experiências. A variação de temperatura que ocorre para a potência de 0,03 W é semelhante em ambas as experiências, sendo de 0,5°C para a experiência B.1.1 e de 0,6°C para a experiência B.2.1.

De igual forma, a análise das experiências B.1.2 e B.2.2 permite compreender a influência da presença da esfera absorvedora mantendo constante a espessura de fantoma entre o feixe laser e a superfície de leitura da temperatura. Verifica-se mais uma vez que a presença da esfera absorvedora impede o aumento da potência laser para potências superiores a 1,50 W sem deformar o fantoma. Atentando apenas nos valores de potência comuns aos dois ensaios (potências entre 0,03 W e 1,50 W) nota-se que para as potências 0,03 W, 0,37 W e 0,76 W a maior variação de temperatura superficial do fantoma verifica-se para a experiência B.1.2 para os primeiros 5 minutos de irradiação, tendo-se verificado temperaturas superficiais finais mais elevadas do que na experiência B.2.2. Por sua vez, para as potências 1,10 W e 1,50 W verificamos maiores variações ao longo de toda a experiência B.2.2, resultando numa maior temperatura final superficial do fantoma comparativamente à experiência B.1.2. Assim podemos afirmar que a presença da esfera absorvedora permite atingir um determinado valor de temperatura com menor potência no feixe laser para o mesmo tempo de irradiação. A presença da esfera provoca o aumento da temperatura superficial para 19,7°C com a potência de 1,10 W enquanto que na ausência da esfera (experiência B.1.2) a superfície do fantoma apenas atinge a temperatura próxima de 19,7°C para a potência de 2,36 W.

Conclui-se assim que o estudo do fantoma B, não permite um estudo direto da propagação do feixe laser no interior do fantoma, no entanto a construção deste fantoma permite tirar algumas conclusões sobre o Termómetro de IV e sobre a difusão que o fantoma provoca sobre o feixe laser na presença e na ausência de um corpo absorvedor.

Por forma a melhorar os resultados obtidos com ambos os instrumentos Termómetro de IV e câmara de telemóvel utilizados com o fantoma B, devem ser tidos em consideração alguns aspetos na construção do fantoma. Nomeadamente, o formato escolhido para o fantoma não permite que o fantoma mantenha as mesmas dimensões ao longo de todo o estudo uma vez que ao ser desenformado a ação da gravidade faz com que o fantoma aumente o diâmetro das suas faces circulares e diminua em altura. Adicionalmente, a espessura entre os corpos absorvedores e a superfície de incidência do feixe laser não permite captar imagens da difusão do feixe no interior do fantoma com recurso à câmara de telemóvel, pelo que esta situação deve ser contornada. Por fim, a superfície do fantoma escolhida para realizar a leitura da temperatura com o Termómetro de IV não permite avaliar a temperatura na zona de incidência do feixe laser ou da porção de fantoma atravessada pelo laser e tal como no fantoma anterior a posição do Termómetro de IV também não permite a captação de termogramas isolados de fontes de calor externas.

6.4.3 Fantoma C

O fantoma C possui um formato diferente dos anteriores e o principal objetivo com a construção deste fantoma consiste em avaliar a influência da espessura de fantoma atravessada pelo feixe laser até atingir o absorvedor sobre a evolução da temperatura no interior do absorvedor em conjunto com os valores lidos à superfície. Para as duas versões do fantoma C.1 e C.2 foram adotados diferentes procedimentos experimentais que resultaram na alteração das condições de fronteira para o fantoma C.1 com a variação da posição do absorvedor no fantoma e na alteração do formato do fantoma para o fantoma C.2 com o seccionamento do mesmo. Por outro lado, ambos os fantasmas garantem a variação das superfícies de incidência do feixe laser no fantoma e absorvedor para as diferentes espessuras de fantoma consideradas, mantendo-se constantes para irradiações de diferentes potências. Esta última questão não foi explorada por tornar inviável o estudo ao ser necessária a construção de um número impraticável de fantasmas.

Apresenta-se de seguida uma análise dos resultados metrológicos obtidos com recurso ao Termómetro de IV e ao Termopar sobre o fantoma C.1. Esta comparação permite comprovar a complementaridade que os resultados destes dois instrumentos oferecem ao serem avaliados em simultâneo.

A análise da evolução da temperatura na superfície do fantoma para as três espessuras só é possível para as potências de 0,76 W em diante, o que consiste em apenas uma irradiação para a experiência C.1.a, na medida em que esta foi a potência máxima suportada pelo fantoma antes de ocorrer a cedência do mesmo. É possível comparar o comportamento da radiação laser no interior do fantoma para as três experiências realizadas sobre o fantoma C.1 com a potência de 0,76 W. Para as potências seguintes

apenas é possível a comparação entre as experiências C.1.b e C.1.c. Para esta última comparação tem-se em consideração as irradiações até à potência máxima de 2,30 W.

A variação de temperatura total verificada na superfície do fantoma para a potência de 0,76 W diminui com o aumento da espessura do fantoma. Para a experiência C.1.a verifica-se um aumento da temperatura superficial de 4,6°C, para a experiência C.1.b mm o aumento é de 1,9°C e para a experiência final C.1.c o aumento é de 1,4°C. No interior do absorvedor o mesmo não se verifica. O aumento da espessura do fantoma nas experiências C.1.a para a C.1.b verifica uma diminuição na variação total de temperatura de 11,3°C para 3,1 °C e o aumento da espessura da experiência C.1.b para C.1.c origina um aumento do valor da variação total da temperatura de 3,1°C para 3,9°C.

Atentando agora nas duas experiências C.1.b e C.1.c nas irradiações de potências superiores a 0,76 W, a variação total da temperatura na superfície do fantoma segue sempre o padrão de diminuição com o aumento da espessura do fantoma para as diferentes potências. Para a potência de 1,10 W verifica-se a menor diminuição na medida em que, para a experiência C.1.b ocorre uma variação total de temperatura de 3,1°C e na experiência C.1.c essa mesma variação é de 1,8°C. As restantes potências verificam diferenças entre os valores de variação menores, mas aumentam com o aumento da espessura do fantoma, ocorrendo uma diferença de 0,6°C para a potência de 1,50 W, 1°C para a potência 1,82 W e 1,3°C para a potência de 2,30 W. No interior do absorvedor, o panorama é o oposto, i.e., para o aumento da espessura do fantoma verifica-se um aumento da variação total de temperatura no interior do mesmo. O aumento da potência do feixe laser verifica também um aumento da diferença entre os valores de variação total para as duas espessuras até à potência de 1,82 W. Assim, para a potência de 1,10 W, a experiência C.1.b regista uma variação total de 5,4°C no interior do absorvedor e experiência C.1.c verifica 6°C de variação, o que se traduz numa diferença de 1,4°C entre as variações. Com o aumento da potência para 1,50 W esta diferença aumenta para 1,5°C, na potência de 1,82 W a diferença é de 4,5°C e para a potência de 2,30 W a diferença diminui para 2,1°C. Esta súbita diminuição de diferença nos valores de variação total da temperatura poderá estar relacionada com o posterior surgimento de bolhas de ar na superfície do absorvedor que decorreu sob a irradiação da potência de 2,30 W para a experiência C.1.c. Verificamos pela análise dos dados que a variação total de temperatura registada para a potência de 1,82 W foi de 10,1°C e para a potência de 2,30 W foi de 10,5°C.

A construção do fantoma C também padece de algumas melhorias necessárias para obter melhores resultados com os instrumentos utilizados no estudo do mesmo. Em particular, a posterior alteração das dimensões do fantoma C.2 resulta em diferentes formatos de fantoma de gel a rodear o absorvedor. Esta situação pode afetar os resultados de forma imprevisível, principalmente os valores de temperatura

recolhidos no interior do absorvedor. Como é possível constatar pelos resultados apresentados para as duas versões do fantoma C, algumas diferenças nos valores de temperatura registados para o interior do absorvedor são perceptíveis sobretudo a partir da potência 0,76W.

6.4.4 Fantoma D

A construção do fantoma D resultou da tentativa de contornar de forma viável todos os aspetos negativos dos fantomas anteriormente apresentados, por forma a alcançar um protótipo de fantoma experimentalmente exequível e reproduzível. A alteração do formato dos fantomas anteriormente apresentados que ocorria com o passar do tempo, após o desenformar do fantoma, mostrou-se um aspeto negativo e que poderia resultar na alteração dos resultados de forma imprevisível. Assim, o fantoma D possui na sua constituição o molde cúbico feito de Poliestireno que ajuda a manter a estrutura do fantoma estável ao longo de todas as experiências. A localização escolhida para o absorvedor no interior do molde permite o estudo de 4 espessuras distintas sem haver necessidade de alterar o formato do fantoma. A construção do fantoma D mostrou-se ser a mais viável, no entanto, não foi possível contornar a evaporação do fantoma que resultava na diminuição do seu volume e que era perceptível após algumas horas da sua total solidificação. Um estudo foi dirigido por forma a averiguar a taxa de evaporação do fantoma D.3 e verificou-se que este diminui $1,6 \text{ cm}^3$ nas primeiras 5h após a total solidificação, o que se pode traduzir numa evaporação de $0,5\% / \text{hora}$. Após 24 horas da sua total solidificação, a taxa de evaporação do fantoma diminui para $0,31\% / \text{hora}$.



7 Conclusão

Este capítulo apresenta as principais conclusões do projeto, em particular sobre os resultados obtidos com os diferentes instrumentos utilizados. Adicionalmente apresentam-se sugestões de trabalho a realizar no futuro na sequência do projeto aqui apresentado.

Este projeto teve como principal objetivo explorar diferentes métodos de análise da interação da radiação laser com os meios biológicos túrbidos. Os instrumentos utilizados forneceram resultados imagiológicos com a captação de imagens e termogramas dos diversos fantasmas construídos e resultados metroológicos com a medição da temperatura em diferentes pontos do fantoma. Os resultados imagiológicos permitiram uma análise direta da propagação do feixe laser no meio e os resultados metroológicos permitiram avaliar de forma indireta essa mesma propagação. Com mais ou menos sucesso, pode-se afirmar que todos os instrumentos avaliados neste projeto providenciaram resultados conclusivos e passíveis de análises significativas sobre a interação da radiação laser com os meios biológicos túrbidos. Considerando todos os resultados e análises apresentadas, bem como a comparação estabelecida entre os diferentes instrumentos, é possível distinguir-se o melhor instrumento para cada tipo de análise pretendida. Assim, no caso dos instrumentos imagiológicos que visam fornecer uma análise direta do feixe laser, conclui-se que a câmara de telemóvel é o instrumento que fornece melhor qualidade bem como fiabilidade de imagem. Os resultados obtidos com a câmara de telemóvel permitem a observação do trajeto do feixe laser difuso no meio túrbido, mesmo em condições de elevada difusão como no caso do fantoma D.4. Por sua vez, a câmara USB, ainda que permita observar a difusão do feixe laser em conformidade com as diferentes potências e coeficientes de difusão utilizados, produz uma imagem de fácil saturação e na qual variáveis como o ganho ou a abertura da lente influenciam os resultados de forma

significativa. Por outro lado, o Termómetro de IV não permite a visualização direta da difusão do feixe laser em interação com o meio turbido, no entanto o código de cores fornecido nos termogramas recolhidos por este instrumento permite a identificação de pontos quentes e frios num determinado termograma relativo a um dado instante. Como referido anteriormente, a atribuição do código de cores a um dado termograma é variável, dependendo da temperatura máxima e mínima captadas pelo Termómetro, no instante da recolha do termograma. Tal característica não permite a comparação fidedigna de dois termogramas recolhidos em instantes diferentes da irradiação.

No que respeita aos instrumentos metrológicos, a identificação de um instrumento como sendo o melhor de entre todos não é linear. Isto porque, os dois instrumentos cuja comparação foi possível, o Termómetro de IV e o termómetro Termopar, desempenharam a sua função em pontos distintos do fantoma, sendo por isso apresentados como instrumentos complementares. O Termopar possui a vantagem de fornecer um resultado preciso da temperatura do material com que está em contacto, no entanto a sua ponta sensora é feita de metal e tal não permite a sua utilização no trajeto do feixe laser sem se obter um resultado da temperatura do meio influenciado pelo próprio aquecimento da ponta sensora. Por sua vez, o Termómetro de IV fornece um resultado sem a necessidade de contacto, mas o valor apresentado é influenciado por fatores como a temperatura ambiente, a humidade e a emissividade do material que nem sempre é conhecida.

Face a estes resultados, a necessidade do estudo dos sensores de fibra óptica torna-se evidente, pois este instrumento permite não só a medida da temperatura independente da radiação que lhe incide como também, devido às suas micrométricas dimensões, permite registar a temperatura de um ponto bem localizado no espaço. Os resultados obtidos com o estudo dos sensores de fibra óptica produzidos não permitiram estabelecer as comparações pretendidas com os resultados recolhidos com o Termopar. Não foi possível construir uma curva de calibração para o sensor que coincidissem com a zona de maior sensibilidade apresentada pelo sensor, quando aplicado no fantoma. Desta forma, não foi possível obter valores de temperatura absolutos em cada intervalo de leitura com recurso ao sensor de fibra óptica. Verifica-se por outro lado, que o sensor é de facto sensível a variações de temperatura. Ao analisar uma zona de maior sensibilidade do sinal produzido pelo sensor de fibra óptica, verifica-se o seu deslocamento no comprimento de onda e/ou em amplitude para os diferentes intervalos de leitura. Com base nos resultados obtidos com o Termopar, sabe-se que a esses intervalos estão associados aumentos de temperatura.

O projeto aqui desenvolvido possui um elevado número de resultados provenientes da aplicação dos diferentes instrumentos aos diversos fantasmas construídos, contabilizando-se um total de 4 fantasmas

explorados com recurso a 5 instrumentos diferentes. Ainda que nem todos os fantasmas tenham sido estudados com todos os instrumentos, pequenas variações na abordagem analítica dos resultados permitem obter um elevado número de conclusões distintas.

As metodologias e procedimentos experimentais aqui abordados constituem pontos de referência significativos para futuros estudos dentro desta temática. No seguimento deste projeto, sugerem-se alguns estudos cujos resultados poderão ser relevantes e propiciar a criação de novos instrumentos. Nomeadamente, no que respeita aos fantasmas, deverá ainda estudar-se a variação do coeficiente de absorção do meio com a adição de Tinta da China ao fantoma, da mesma forma que neste estudo foram adicionados os Intralípidos. Diferentes concentrações de Tinta da China originam diferentes coeficientes de absorção e tal pode ser explorado por forma a aproximar a combinação dos coeficientes de absorção e difusão aos verificados *in vivo*. mente aos sensores de fibra óptica, poderá ser pertinente cruzar os resultados obtidos pelo sensor de fibra óptica com os obtidos pelo Termopar para as mesmas condições e assim, tentar obter uma tendência de variação do comprimento de onda por variação de temperatura, para cada irradiação realizada sobre as diferentes versões do fantoma D. Adicionalmente e bastante importante, deverão explorar-se novas formas de aplicar os sensores de fibra óptica no fantoma de Ágar-ágar, por forma a obterem-se sinais menos ruidosos e mais conclusivos em cada irradiação. Para tal, sugere-se a utilização de capilares de Sílica com diâmetros micrométricos que apresentam um amplo espectro de transmissão e coeficientes de dilatação reduzidos [63]. Espera-se que com a utilização destes capilares a variação do sinal provocada pelas tensões aplicadas na ponta sensora diminua ou desapareça por completo, permitindo a captação de um sinal estável ao longo do tempo. Alcançada esta melhoria, deverão estabelecer-se comparações entre os valores de temperatura registados com o Termopar e os obtidos pelo sensor de fibra óptica.

Bibliografia

- [1] R. L. Siegel, K. D. Miller, and A. Jemal, "Cancer Statistics, 2017.," *CA. Cancer J. Clin.*, vol. 67, no. 1, pp. 7–30, 2017.
- [2] GLOBOCAN, "World Health Organization, Globocan 2018, Breast cancer factsheet," 2018. [Online]. Available: <http://gco.iarc.fr/today>.
- [3] NCI, "What Is Cancer? - National Cancer Institute," *NCI What is Cancer?*, 2014. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer>. [Accessed: 31-Jan-2019].
- [4] A. Gabriel *et al.*, "Concentrated photoactivation: focusing light through scattering," *IFMBE Proceedings*, vol. 51, pp. 1727–1730, 2015.
- [5] C. I. P. Silva, "Desenvolvimento de nanomateriais para a terapia fototermal do cancro," 2016.
- [6] M. S. I. Thomas George, Achyut K. Dutta, "The Future of Medicine," 2015.
- [7] I. Okuni, "Phototherapy in rehabilitation medicine," *Masui.*, vol. 61, no. 7, pp. 700–5, Jul. 2012.
- [8] P. J. G. SOUSA, "Fototerapia: Indicações e controvérsias," 2015.
- [9] A. Wiehe, J. M. O'Brien, and M. O. Senge, "Trends and targets in antiviral phototherapy," *Photochemical & Photobiological Sciences*, Royal Society of Chemistry, 2019.
- [10] S. Rochkind, S. Geuna, and A. Shainberg, *Phototherapy and nerve injury: Focus on muscle response*, 1st ed., vol. 109. Elsevier Inc., 2013.
- [11] C. M. Herpich *et al.*, "Immediate and short-term effects of phototherapy on pain, muscle activity, and joint mobility in women with temporomandibular disorder: a randomized, double-blind, placebo-controlled, clinical trial," *Disabil. Rehabil.*, vol. 40, no. 19, pp. 2318–2324, 2018.
- [12] C. I. P. Chaparro, "Application of Hyperthermia for Cancer Treatment: Synthesis and Characterization of Magnetic Nanoparticles and their internalization on Tumor Cell Lines," 2017.
- [13] C. O. Silva *et al.*, "Bioproduction of gold nanoparticles for photothermal therapy," *Ther. Deliv.*, 2016.
- [14] A. Lopes, P. Vieira, R. Gomes, M. Castineras, J. M. P. Coelho, and J. P. Santos, "Probing deep tissues with laser-induced thermotherapy using near-infrared light," 2018.
- [15] A. N. Bashkatov, E. A. Genina, and V. V. Tuchin, "Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: A review," *J. Innov. Opt. Health Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 9–38, 2011.
- [16] R. Gomes, J. M. P. Coelho, A. Gabriel, P. Vieira, C. O. Silva, and C. P. Reis, "Wavefront shaping using a deformable mirror for focusing inside optical tissue phantoms," 2014.
- [17] H. Vilhena, J. M. P. Coelho, and J. M. Rebordão, "Finite element model for the simulation of laser activated micro and nano-scale drug delivery systems," 2017.
- [18] M. Ma, Y. Zhang, and N. Gu, "Estimation the tumor temperature in magnetic nanoparticle hyperthermia by infrared thermography: Phantom and numerical studies," *J. Therm. Biol.*, vol. 76, no. March, pp. 89–94, 2018.
- [19] H. F. Rodrigues, G. Capistrano, F. M. Mello, N. Zufelato, and A. F. Bakuzis, "Precise determination of the heat delivery during in vivo magnetic nanoparticle hyperthermia with infrared thermography," *Phys. Med. Biol.*, 2017.

- [20] L. Gonçalves, "Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica," 2014.
- [21] R. Paschotta, "RP Photonics Encyclopedia - modes, waveguide, propagation modes, optical fiber, resonator, resonator, field distribution." [Online]. Available: <https://www.rp-photonics.com/modes.html>. [Accessed: 31-Jan-2019].
- [22] "Laser: Lo que deberias saber." [Online]. Available: https://www.taringa.net/+info/laser-lo-que-deberias-saber_ym5u. [Accessed: 07-Jul-2019].
- [23] A. H. Rawicz, "Theodore Harold Maiman and the invention of laser," 2008.
- [24] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes Columbiu, U. Eersity, E. York, and E. Fork, "The Maser New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer," 1955.
- [25] Daniel Silva Rodrigues, "A Física do laser," Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [26] A. Manivannan, "Basic physics and technology of medical lasers," *Phys. Medica*, 2016.
- [27] A. H. Morgan, J. W. Norris, and J. N. Hicks, "Palliative laser surgery for melanoma metastatic to the larynx," *Laryngoscope*, vol. 95, no. 7, pp. 794–797, Jul. 1985.
- [28] D. P. O'Neal, L. R. Hirsch, N. J. Halas, J. D. Payne, and J. L. West, "Photo-thermal tumor ablation in mice using near infrared-absorbing nanoparticles," *Cancer Lett.*, 2004.
- [29] M. Nespereira, J. M. P. Coelho, M. Abreu, and J. M. Rebordão, "Ultrashort Long-Period Fiber Grating Sensors Inscribed on a Single Mode Fiber Using CO2 Laser Radiation," *J. Sensors*, 2017.
- [30] M. Nespereira, J. M. P. Coelho, and J. M. Rebordão, "Ultrashort Long-Period Fiber Gratings Inscribed on a Single-Mode Fiber for Torsion Sensing Applications," *J. Sensors*, 2018.
- [31] M. T. Catela, "Desenvolvimento de um laser solar para aplicações médicas," 2018.
- [32] L. F. M. Gonçalves, "Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica," *Dissertação*. p. 191, 2014.
- [33] M. R. Hamblin and T. N. Demidova, "Mechanisms of low level light therapy," 2006, pp. 43–149.
- [34] H. Filipe and C. Costa, "Desenvolvimento de dispositivos sensores de fibras ópticas revestidas de filmes finos de óxido de grafeno," 2018.
- [35] Photonics Media, "Fiber Optics: Understanding the Basics | Fiber Optics & Communications." [Online]. Available: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=25151>. [Accessed: 31-Jan-2019].
- [36] Daniel Silva Rodrigues, "A física do Laser," 2007.
- [37] "Refração da luz." [Online]. Available: <https://descomplica.com.br/blog/fisica/refracao-da-luz-por-que-a-fibra-optica-e-o-arco-iris-sao-parentes/>. [Accessed: 07-Sep-2019].
- [38] Adriano Mendonça Loureiro, "Medida da eficiência quântica para um sensor de imagem cmos com tecnologia 3t-aps," Universidade Federal do Amazonas, 2018.
- [39] Hamamatsu, "Image Sensors." .
- [40] N. R. Khorobchuk, "Aplicação da termografia para detecção e caracterização da severidade das Espondiloartrites." 2016.
- [41] M. J. M. Harrap, N. H. de Ibarra, H. M. Whitney, and S. A. Rands, "Reporting of thermography parameters in biology: a systematic review of thermal imaging literature," 2018.
- [42] B. B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, and J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 221–235, 2012.
- [43] R. H. Yolken, "Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA): A practical tool for rapid

- diagnosis of viruses and other infectious agents," *Yale J. Biol. Med.*, vol. 53, no. 1, pp. 85–92, 1980.
- [44] G. Chick, "Corporate Emotional Intelligence: Being Human in a Corporate World," vol. 5, no. March, 2018.
- [45] L. Hernández-Quintanar, S. Stolik, and J. M. De La Rosa, "Experimental tests in tissue phantoms of a photoirradiation system with optical dosimetry for photodynamic therapy," *CONIELECOMP 2012 - 22nd Int. Conf. Electron. Commun. Comput.*, no. 5, pp. 45–49, 2012.
- [46] J. M. P. Coelho, "A novel approach for tumoral targeted phototherapy: focusing light through scattering." 2015.
- [47] Lara Coelho, "Fotografia digital em medicina dentária," 2017.
- [48] A. Hélio, P. Maurício, and P. Francisco, "Fundamentos da fotografia digital em Dermatologia," 2006.
- [49] Sony, "Câmeras de imagens médicas - Sony." [Online]. Available: https://pro.sony/bp_BR/products/medical-imaging-cameras. [Accessed: 01-Oct-2019].
- [50] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring - A review," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 35–55, 2013.
- [51] A. Szentkuti, H. S. Kavanagh, and S. Grazio, "Infrared thermography and image analysis for biomedical use," *Period. Biol.*, vol. 113, no. 4, pp. 385–392, 2011.
- [52] I. D. Chivers and M. W. Clark, "The Noninvasive Laboratory - History and future of Thermography," *Data Process.*, vol. 27, no. 1, pp. 39–41, 1985.
- [53] S. Silva, O. Frazão, J. L. Santos, and F. X. Malcata, "A reflective optical fiber refractometer based on multimode interference," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 161, no. 1, pp. 88–92, 2012.
- [54] L. Hou, X. Zhang, J. Yang, J. Kang, and L. Ran, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on half-tapered SMS fiber structure with fringe-visibility difference demodulation method," *Opt. Commun.*, vol. 433, no. June 2018, pp. 252–255, 2019.
- [55] Y. Zhang, X. Tian, L. Xue, Q. Zhang, L. Yang, and B. Zhu, "Super-high sensitivity of fiber temperature sensor based on leaky-mode bent SMS structure," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 6, pp. 560–563, 2013.
- [56] L. Antunes, "Radiação de Corpo Negro," 2012.
- [57] R. F. dos S. Gomes, "Otimização da focagem de feixes de laser em tecidos biológicos: desenvolvimento de um simulador óptico," 2003.
- [58] Y. Chen *et al.*, "Gel phantom in selective laser phototherapy," *Des. Perform. Valid. Phantoms Used Conjunction with Opt. Meas. Tissue*, vol. 6870, no. 405, p. 687008, 2008.
- [59] Argagel, "Agar-Agar : Especificações Técnicas." [Online]. Available: <http://www.argagel.com.br/agar-tec.html>. [Accessed: 20-Sep-2019].
- [60] J. M. P. Coelho, "FLIT A novel approach for tumoral targeted phototherapy : focusing light through scattering," 2015.
- [61] W. Mo, T. S. S. Chan, and L. Chen, "Quantitative characterization of optical and physiological parameters in normal breasts using time-resolved spectroscopy: in vivo results of 19 Singapore women," *J. Biomed. Opt.*, 2009.
- [62] FLUKE, "How Infrared Cameras Work | Fluke." [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/learn/best-practices/measurement->

- basics/thermography/how-infrared-cameras-work. [Accessed: 06-Feb-2019].
- [63] "Technical Glass Products." [Online]. Available: www.technicalglass.com. [Accessed: 24-Dec-2019].
- [64] M. D. Safety, "Table of Contents Table of Contents (cont .) Table of Contents (cont .)," *Bone*, 2004.
- [65] P. A. Tipler, *Física Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica*, 4ª. 2009.
- [66] FLUKE, "Visual IR Thermometer Vt02, vt04," no. October 2012, 2013.
- [67] A. V. Technologies, "AVT Guppy F-036B / F-036C."

Anexo 1 – Curva de Calibração do Laser

A curva de calibração do laser é construída com recurso ao potenciômetro apresentado na Figura 1. O potenciômetro permite ler o valor de potência do feixe incidente para cada valor de corrente definido previamente.



Figura 1: Imagem do potenciômetro utilizado para medir a potência do feixe laser incidente. O feixe laser incide no detetor do potenciômetro e este converte a radiação num valor de potência mostrado analógica e digitalmente no visor do mesmo em Watts.

A corrente de alimentação do feixe laser é sucessivamente aumentada desde o valor 0,0 A até 3,2 A em intervalos de 0,5 A. Ao longo da experiência, a temperatura ambiente mantém-se constante em 20°C. A curva construída é representada no gráfico da Figura 2. Com base nos resultados obtidos a evolução dos mesmos pode ser aproximada à linha de tendência linear definida pela equação 1 com o erro quadrático de aproximadamente 1,00.

$$y = 0,68x - 0,63 \quad (8.1)$$

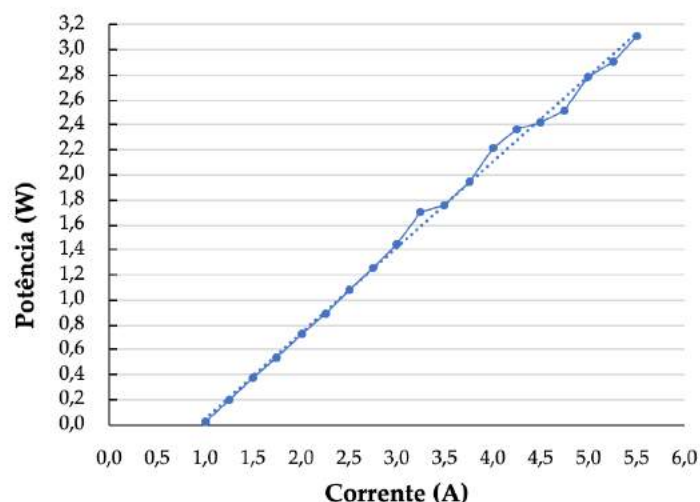


Figura 2: Gráfico construído com base nos dados recolhidos para a medição da potência do feixe laser em função da corrente definida para o feixe. A equação da linha de tendência é apresentada junto aos dados.

Como podemos ver pelo gráfico anterior, para os valores de corrente até 1,4 A, a linha de tendência coincide quase na totalidade com os dados experimentais recolhidos, verificando-se um aumento linear da potência com o aumento da corrente do feixe laser no intervalo mencionado.

A Tabela 1 reúne as especificações técnicas do laser utilizado ao longo do projeto no modo contínuo.

Tabela 1: Especificações técnicas do laser utilizado no projeto. Adaptado de [64].

Corrente do laser	
Intervalo (mA)	0 - 8000
Resolução (mA)	0,5
Precisão (\pm [% definido + mA])	0,05% + 1,6
Estabilidade (ppm, tempo)	< 10, 1 hora
Coefficiente de Temperatura (ppm/°C)	50
Ruído/Ondulação (μ A rms)	< 200
Transientes (μ A)	< 600
Voltagem de conformidade (V)	5
Corrente do Fotodíodo	
Intervalo (μ A)	5 – 10000
Resolução (μ A)	1
Precisão (\pm [% definido + μ A])	0,05% + 1
Estabilidade (ppm, tempo)	< 200, 24 horas
Coefficiente de Temperatura (ppm/°C)	< 200
PD Bias (V)	<i>Jumper selectable: No bias, -3V (default), -5V</i>

Voltagem do laser	
Intervalo (V)	0 - 5
Resolução (V)	0,001
Precisão (\pm [% definido + V])	0,05% + 0,005
Estabilidade (ppm, tempo)	< 50, 1 hora
Coeficiente de Temperatura (ppm/°C)	< 100
Modulação externa	
Intervalo de entrada	0 – 10 V, 10K Ω
Modulação da largura de banda	40kHz
Medidas	
Resolução (mA)	0,5
Precisão (\pm [% leitura + mA])	0,05% + 1,6
Voltagem do Laser	
Resolução (V)	0,001
Precisão (\pm [% leitura + V])	0,05% + 0,004
Corrente do Fotodíodo	
Resolução (μ A)	1
Precisão (\pm [% definido + μ A])	0,05% + 2
Limites	
Corrente do laser	
Resolução (mA)	1
Precisão (\pm [% leitura + mA])	80
Voltagem do Laser	
Resolução (V)	0,1
Precisão (\pm [% leitura + V])	2,5%
Geral	
Conetor Laser	DB-9, fêmea
Fotodíodo / Conetor <i>Interlock</i>	<i>On LDD connector</i>
Interface de computador	<i>USB 2.0 Full Speed (Type B), RS-232 (DB-9, male)</i>
Alimentação	<i>115VAC / 230VAC (internally selectable), 50/60 Hz</i>

Dimensões (A x L x E) [polegadas (mm)]	3.0 (77) x 4.5 (115) x 8.5 (216)
Temperatura de operação	+10°C a +40°C
Temperatura de Armazenamento	-20°C a +60°C

Anexo 2 – Teste de resistência da esfera absorvedora

No estudo apresentado é monitorizada a variação da temperatura na superfície da esfera absorvedora sob irradiação do feixe laser até ser atingido o ponto de cedência na superfície da mesma.

A agitação das partículas que compõem o absorvedor provocada pela irradiação com o feixe laser, produz radiação térmica que depende da temperatura a que se encontra o absorvedor. O gráfico da Figura 1 apresenta o espectro de emissão de um corpo negro para o qual a radiância espectral emitida é função do comprimento de onda e da temperatura do corpo negro. Verificamos que o aumento da temperatura do corpo provoca o aumento da energia emitida [2e].

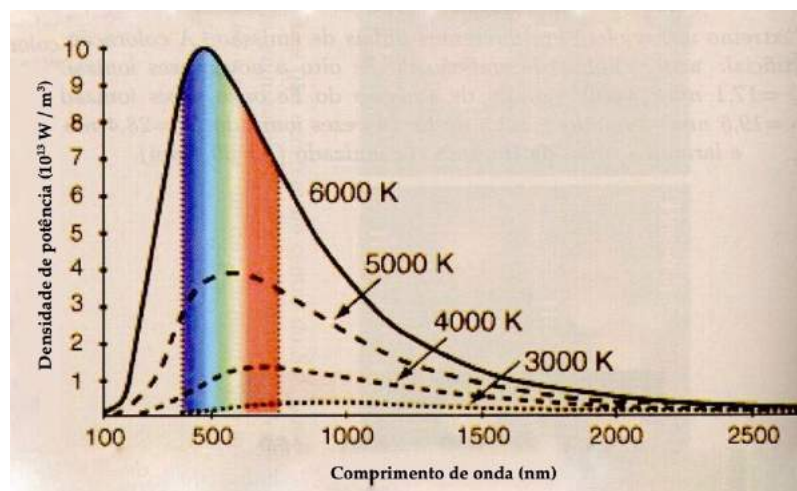


Figura 1: Espectro da densidade de potência emitida por um corpo negro para diferentes temperaturas. A faixa visível do espectro, entre 380 e 750 nm, é apresentada no gráfico a cores. Adaptado de [2n].

Devido ao formato escolhido para o corpo absorvedor, admite-se que a radiação é emitida pela esfera absorvedora em todas as direções, de forma isotrópica. Esta radiação pertence tipicamente à zona do Infravermelho com comprimentos de onda entre 800 e 14000 nm, invisíveis ao olho humano [2e].

Para o estudo aqui apresentado a radiação emitida pelo absorvedor situa-se na região do Infravermelho devido às baixas temperaturas atingidas pelo absorvedor. A radiação emitida à superfície do absorvedor será então captada pelo Termómetro de IV.

A esfera absorvedora foi colocada sob irradiação do feixe laser com diferentes potências sucessivamente superiores, a uma distância de 5,5 cm. Por forma a monitorizar a temperatura na superfície do absorvedor, no local de incidência do feixe laser, foi colocado o Termómetro de IV a 13 cm de distância da superfície do feixe laser (ver Figura 2).

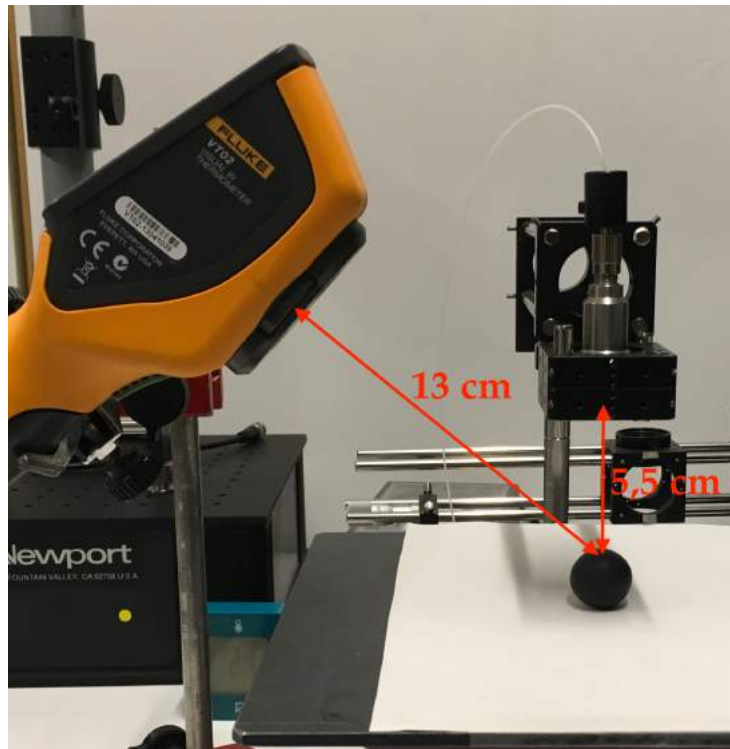


Figura 2: Imagem do *setup* experimental utilizado na realização do teste de resistência do absorvedor. O feixe laser incide verticalmente na superfície da esfera absorvedora que se encontra a 5,5 cm de distância e cuja temperatura é monitorizada com recurso ao Termómetro de IV, colocado a 13 cm de distância do local de incidência do feixe laser no absorvedor.

O Termómetro de IV é utilizado unicamente como instrumento de medição da temperatura superficial do absorvedor, apontando a mira do mesmo para a zona de incidência do feixe laser. A leitura da temperatura é efetuada em intervalos de 5 minutos. A duração de cada irradiação foi definida para 20 minutos contínuos, no entanto, o teste é interrompido de imediato se houver sinais de cedência por parte do absorvedor. Nomeadamente, quando este começa a fumegar ou a alterar a forma da sua superfície. São realizadas diversas irradiações sempre sob diferentes zonas de superfície do absorvedor. Entre cada irradiação são criados intervalos de descanso para permitir a recuperação da temperatura inicial do absorvedor quando possível. A temperatura ambiente mantém-se próxima dos 20°C com variações de 1°C na primeira e última irradiações do ensaio.

A Tabela 1 reúne os valores de temperatura registados para a irradiação da superfície do absorvedor com potências sucessivamente superiores desde 0,03 W até 3,13 W em cada intervalo de leitura.

Tabela 1: Registo da temperatura lida pelo Termómetro de IV na superfície do absorvedor em intervalos de 5 minutos para um total de 20 minutos de irradiação para as diferentes potências do feixe laser utilizadas. Registo da média da temperatura ambiente para cada irradiação.

Potência (w)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
0,03	0	20	21
	5	22,6	
	10	22,9	
	15	23,3	
	20	23,3	
0,37	0	28,15	20
	5	48,5	
	10	50,4	
	15	51,1	
	20	52	
0,76	0	20,1	20
	5	44,2	
1,1	0	21	20
	5	48,7	
1,5	0	21,3	20
	5	47,3	
3,13	0	18,3	21

Para a potência do feixe laser de 0,03 W há um aumento total da temperatura de 3,3°C mente à temperatura inicial da superfície e esta mantém-se estável, i.e., sem ocorrer nenhuma deformação visível no decorrer de todo o teste.

Com o aumento da potência para 0,37 W, verifica-se um aumento da variação total de temperatura da superfície do absorvedor para 23,85°C.

A uma potência de 0,76 W o absorvedor cedeu logo ao final dos 5 minutos e começou a fumegar, tendo neste caso havido um aumento da temperatura superficial de 24,1°C. Para esta potência, o teste foi interrompido ao fim dos 5 minutos de irradiação.

No que respeita à potência de 1,1 W, o absorvedor começou a fumegar ainda antes dos 5 minutos de irradiação terem sido alcançados, tendo-se registado um aumento da sua temperatura total em 27,7°C.

De igual forma, para a potência de 1,5 W a superfície do absorvedor começou a ceder ainda antes de se atingirem os 5 minutos de irradiação, tendo-se neste caso verificado uma variação de temperatura total de 26°C na superfície do mesmo. Para esta potência, comparativamente com a potência de 1,1 W, a superfície do absorvedor verificou uma menor variação total de temperatura.

Para a potência de 3,13 W, o absorvedor começa a ceder poucos segundos após o início da irradiação, pelo que se interrompeu de imediato o teste.

O gráfico da Figura 3 permite analisar a evolução da temperatura da superfície do absorvedor irradiado com as diferentes potências de feixe laser ao longo da duração de cada irradiação.

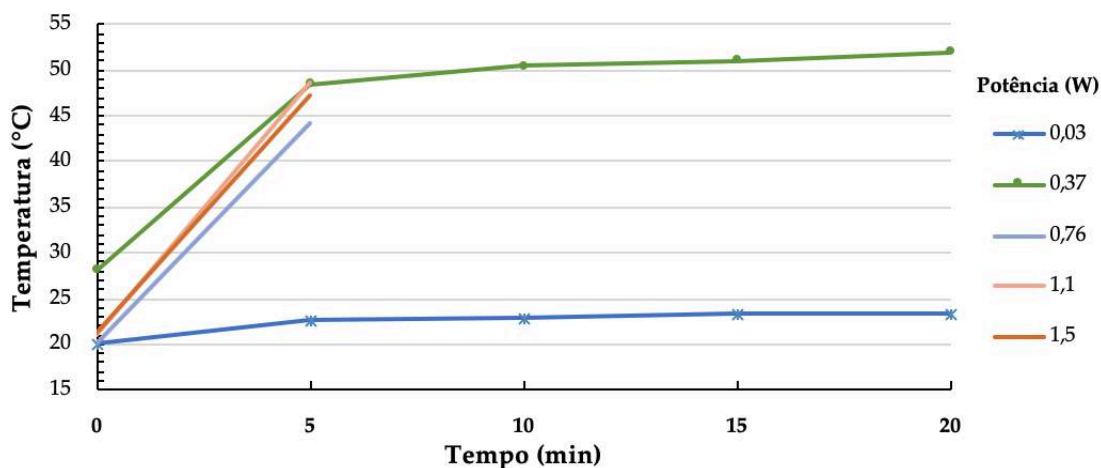


Figura 3: Evolução da temperatura da superfície do absorvedor ao longo dos 20 minutos de irradiação para cada uma das potências do feixe laser utilizadas.

Tomando em atenção apenas os primeiros 5 minutos de irradiação das irradiações com as diferentes potências, verificam-se variações de temperatura sucessivamente superiores com o aumento da potência. Tendo-se registado aumentos de 2,6°C, 20,35°C, 24,1°C e 27,7°C na irradiação com as potências de 0,03 W, 0,37 W, 0,76 W e 1,1 W respetivamente. Para a potência de 1,5 W, a variação de temperatura registada foi de 26°C, sendo esta inferior à variação registada na irradiação com a potência de 1,1 W.

A Figura 4 mostra ainda que para potências superiores a 0,76 W, a difusão resultante na interface meio - superfície do absorvedor é visível com recurso à câmara do telemóvel.

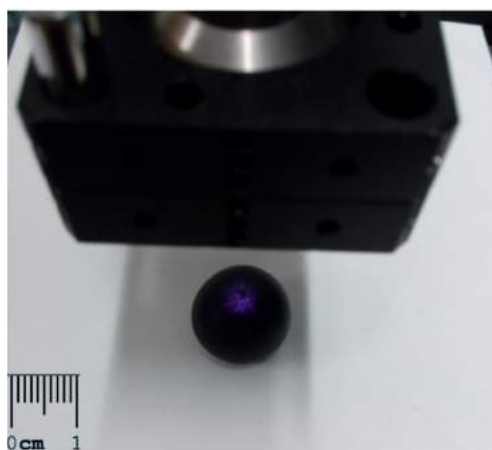


Figura 4: Imagem da difusão do feixe laser visível na interface ar - absorvedor captada com a câmara do telemóvel. A difusão do feixe laser corresponde à mancha em tom roxo que é visível na superfície do absorvedor aproximadamente no centro da esfera. A potência do feixe laser em utilização é de 0,76 W.

Para as potências inferiores a 0,37 W inclusive, a deposição de energia por área de superfície é menor que a verificada em potências superiores, resultando numa menor acumulação de energia no absorvedor, havendo um aumento lento e gradual da temperatura. A irradiação tem a duração dos 20 minutos inicialmente definidos sem que ocorra a cedência do absorvedor. Quando a potência é elevada, a acumulação total de energia no absorvedor por unidade de área é superior e as suas moléculas atingem o

ponto de rutura mais rapidamente. As partículas do absorvedor não possuem capacidade para acumular toda a energia que lhes incide e iniciam um processo de mudança de estado físico que se traduz na deformação da superfície do absorvedor [65].

O gráfico apresentado na Figura 5 permite analisar a variação da temperatura registada na superfície do absorvedor para os 20 minutos de irradiação das potências inferiores a 0,37 W, inclusive, e para os 5 minutos de irradiação das potências superiores a 0,37 W.

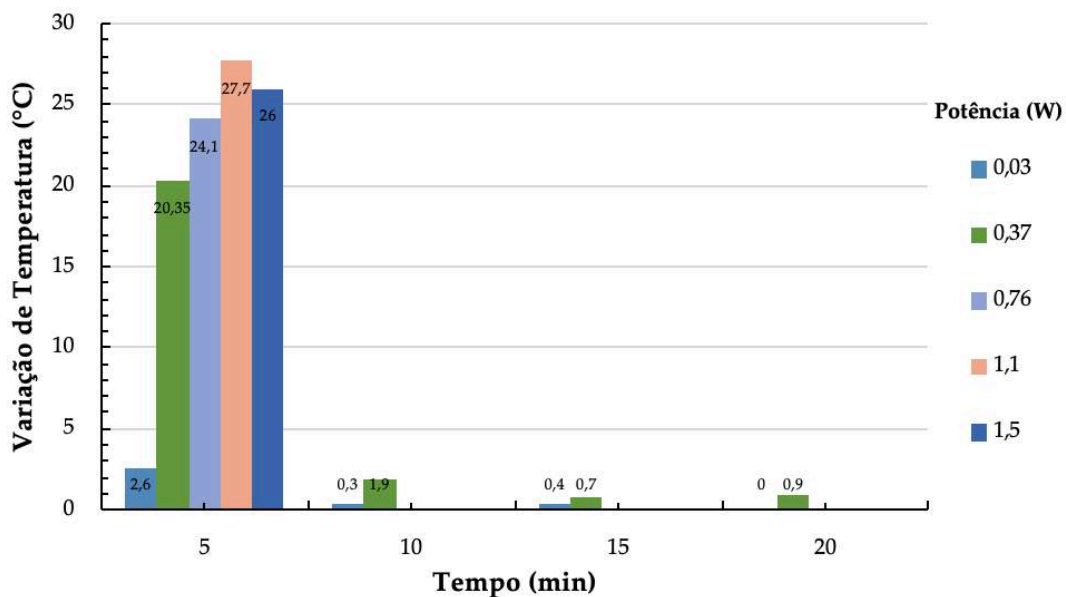


Figura 5: Variação de temperatura verificada na superfície do absorvedor para os consecutivos intervalos de leitura efetuados ao longo da irradiação para as diferentes potências de feixe laser utilizadas.

Para os primeiros 5 minutos de irradiação, verifica-se um aumento da variação de temperatura com o aumento da potência. No entanto, a variação verificada para a potência do feixe de 1,5 W é inferior à da potência 1,1 W em 1,7°C. Pode antever-se como causa para esta situação que as propriedades do material não permitiram a acumulação de tal quantidade de energia sem se iniciar a destruição das moléculas do absorvedor mais rapidamente que para o caso de 1,1 W de potência. O que originou uma menor variação de temperatura para a potência de 1,5 W. Neste caso, a acumulação da energia originou a mudança de estado do absorvedor e não o aumento de temperatura como se verificou até este instante [2j-530]. A quantidade de energia depositada por unidade de área na superfície do absorvedor aumenta com o aumento da potência do feixe laser, o que resulta numa variação de temperatura da superfície cada vez maior. Após os 5 minutos de irradiação, apenas as potências de 0,03 W e 0,37 W não provocaram a cedência da superfície do absorvedor, tendo estas originado variações na temperatura superficial do absorvedor para estas duas potências. Porém, em ambos os casos, após os 5 minutos de irradiação, a variação de temperatura nos intervalos de tempo subsequentes diminui abruptamente para valores inferiores a 1°C na potência de 0,03 W e inferiores a 2°C na potência de 0,37 W. Esta situação pode

indicar a aproximação da temperatura do absorvedor ao equilíbrio, não se verificando variações relevantes de temperatura à sua superfície após os 5 minutos de irradiação, para as potências consideradas. Estes resultados permitem prever o comportamento do absorvedor ao ser irradiado pelo feixe laser com as diferentes potências utilizadas. Desta forma, é possível definir um limite de potência a utilizar para a qual podemos garantir que as condições definidas inicialmente relacionadas com o absorvedor são mantidas estáveis até ao final da irradiação. A definição deste limite mostrar-se-á de elevada relevância para todas as experiências realizadas ao longo deste projeto, pois todas elas incluem a utilização do absorvedor como meio de simular a presença de tecido tumoral.

Anexo 3 - Teste de resistência do fantoma

No estudo apresentado realiza-se a monitorização da temperatura na superfície do fantoma sob irradiação do feixe laser, até ser atingido o ponto de cedência do fantoma. Como mencionado anteriormente, o valor de emissividade do fantoma corresponde a um dos parâmetros necessários na utilização do Termómetro de IV e foi definido com o valor 0,98.

O feixe laser incide em diferentes zonas da superfície do fantoma sempre a uma distância de 5,5 cm (ver Figura 1). São realizadas diversas irradiações todas com a duração máxima de 20 minutos. Entre cada irradiação são criados intervalos de descanso para permitir a recuperação da temperatura inicial do fantoma sempre que possível. O Termómetro de IV permite registar a temperatura na superfície do fantoma e localiza-se a 13 cm do local exato de incidência do feixe laser. O ensaio inicia-se com a temperatura ambiente em 20°C, aumentando 1°C após a terceira irradiação.

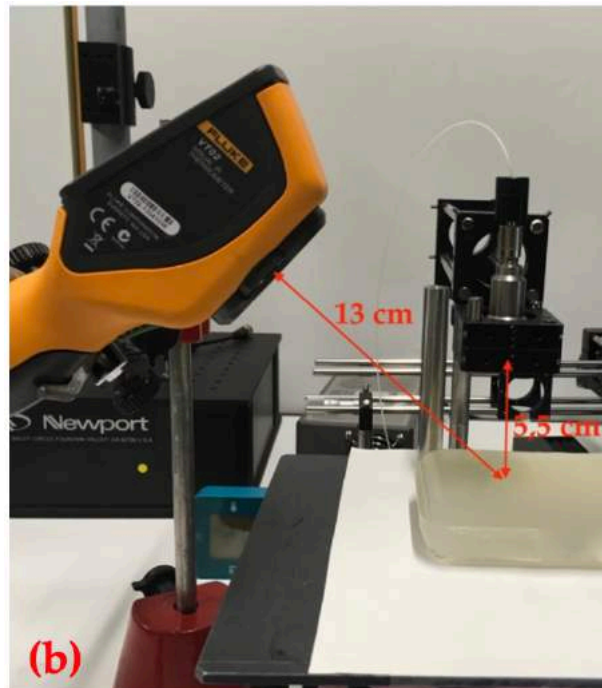


Figura 1: Imagem do *setup* experimental utilizado na realização do teste de resistência do fantoma. O feixe laser incide verticalmente na superfície do fantoma que se encontra a 5,5 cm de distância e cuja temperatura é monitorizada com recurso ao Termómetro de IV, colocado a 13 cm de distância do local de incidência do feixe laser no fantoma.

A Tabela 1 reúne os resultados obtidos para a irradiação da superfície do fantoma com potências sucessivamente superiores desde 0,03 W até 2,3 W.

Tabela 1: Registo da temperatura lida pela câmara de IV na superfície do fantoma em intervalos de 5 minutos para um total de 20 minutos de irradiação para as diferentes potências do feixe laser testadas. Registo da média da temperatura ambiente para cada teste.

Potência (w)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Temperatura Ambiente (°C)
0,03	0	16,2	20
	5	16,3	
	10	16,4	
	15	16,4	
	20	23,3	
0,37	0	16,4	20
	5	16,4	
	10	16,8	
	15	16,8	
	20	17	
0,76	0	13,4	20
	5	14,9	
	10	15,3	
	15	15,9	
	20	16,5	
1,1	0	16	21
	5	16,8	
	10	17,1	
	15	17,5	
	20	17,7	
1,5	0	17,7	21
	5	18,1	
	10	18,4	
	15	18,4	
	20	18,4	
1,82	0	17,2	21
	5	18,4	
	10	18,7	
2,3	0	17,5	21
	5	21,7	

Para as potências de 0,03 W, 0,37 W, 0,76 W, 1,1 W e 1,5 W ocorreram variações totais de temperatura na superfície do fantoma de 7,1°C, 0,6°C, 3,1°C, 1,7°C e 0,7°C respetivamente, ao longo dos 20 minutos de irradiação. Nos testes com potências de 0,76 W, 1,1 W e 1,5 W verifica-se uma diminuição sucessiva da variação total de temperatura desde 3,1°C até 0,7°C, com o aumento da potência.

Para os primeiros cinco testes, cuja duração alcançou os 20 minutos de irradiação, as variações totais de temperatura à superfície do absorvedor estão compreendidas entre 0,6°C e 7,1°C. A maior variação total ocorre para a potência de 0,03 W e a menor para a potência seguinte de 0,37 W.

A superfície do fantoma manteve-se estável e consistente durante a realização dos cinco primeiros testes de resistência. No entanto, com o aumento da potência do laser de 1,5 W para 1,82 W, ocorreu um aumento da temperatura superficial de 1,5°C até ao minuto 10 e imediatamente a seguir o fantoma apresentou bolhas junto à superfície.

Para a potência de 2,3 W, a irradiação provocou um aumento de temperatura de 4,2°C na superfície, sendo que ao fim do minuto 5 o fantoma começou a deformar-se novamente com a criação de bolhas à superfície.

O gráfico da Figura 2 registra a evolução da temperatura na superfície do absorvedor ao longo da irradiação para todas as potências utilizadas.

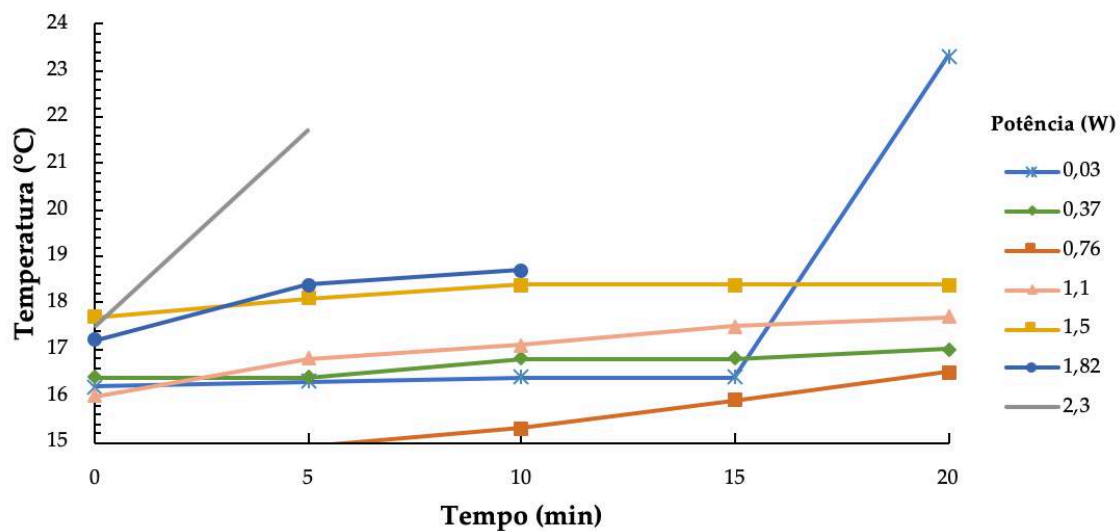


Figura 2: Evolução da temperatura da superfície do fantoma ao longo dos 20 minutos de irradiação para cada uma das potências do feixe laser utilizadas.

Tendo em consideração apenas os primeiros 5 minutos de irradiação para todos os testes realizados, as variações de temperatura registradas à superfície do fantoma estão compreendidas entre 0°C e $4,2^{\circ}\text{C}$, i.e., após os 5 minutos de irradiação não se registraram variações de temperatura superiores a $4,2^{\circ}\text{C}$. A maior variação de temperatura ocorreu para a potência de $2,3\text{ W}$ com a posterior cedência da superfície do fantoma. Anteriormente, para as potências superiores a $1,5\text{ W}$, a superfície do fantoma começa a ceder apresentando bolhas ou concavidades próximas da superfície do mesmo sem se alcançar os 20 minutos de irradiação. Sendo o fantoma um coloide no estado gel, tem a água como seu componente em maior concentração. A água por sua vez, possui um elevado calor específico de $1,0\text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$. Esta propriedade confere ao fantoma uma elevada capacidade de armazenar e dispersar a energia, conferindo-lhe maior resistência à irradiação do feixe laser quando comparado com o absorvedor [2j].

Contrariamente ao que seria de esperar, no caso do estudo realizado com o fantoma, o aumento da potência do feixe laser não resultou num consecutivo aumento da variação de temperatura total registrada na superfície do fantoma. A variação total de temperatura máxima ocorreu para a potência de $0,03\text{ W}$ com o valor de $7,1^{\circ}\text{C}$, tendo as potências seguintes registado menores variações de temperatura.

O gráfico da Figura 3 apresenta as variações de temperatura que ocorreram para cada potência do feixe, ao fim dos intervalos de tempo entre leituras considerados.

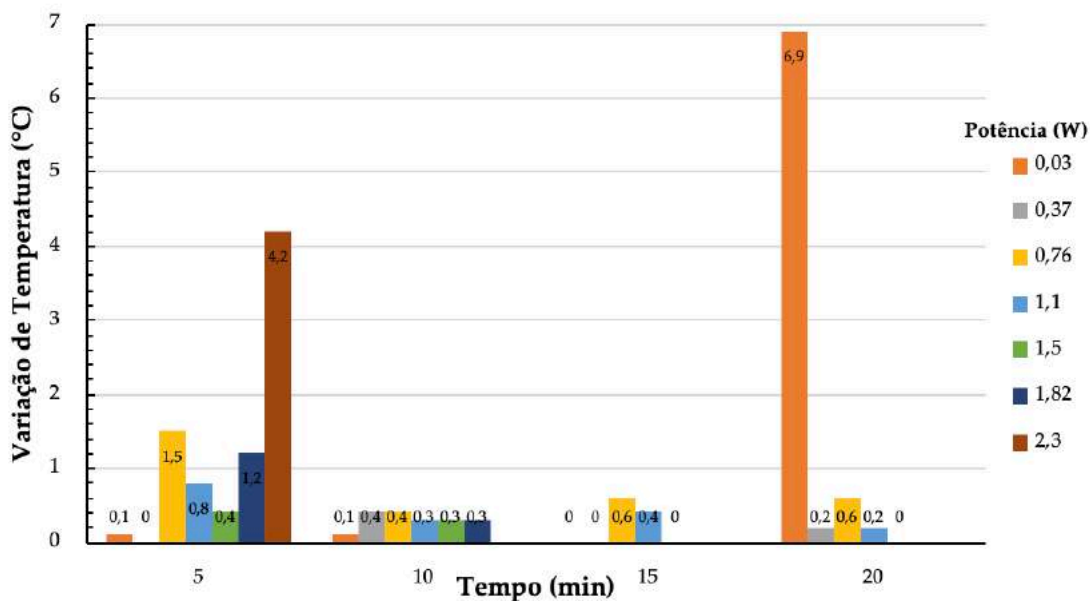


Figura 3: Variação de temperatura verificada na superfície do fantoma para os consecutivos intervalos de leitura efetuados ao longo do ensaio para as diferentes potências de feixe laser utilizadas.

Podemos ver pelo gráfico que para as potências superiores a 0,37 W, os primeiros 5 minutos registam a maior variação de temperatura no fantoma para cada irradiação. Nos intervalos de tempo seguintes verifica-se uma diminuição dessa mesma variação. Porém, a potência 0,03W verifica um aumento de temperatura de 6,9°C nos últimos 5 minutos de irradiação. É a maior variação de temperatura verificada em todas as irradiações realizadas com o fantoma.

Em todas as irradiações efetuados no fantoma, com as diferentes potências, a variação de temperatura registada ao fim de 5 minutos de irradiação é inferior comparativamente com o sucedido nas irradiações do absorvedor, não ultrapassando os 1,5°C. As irradiações sobre a superfície do absorvedor registaram variações próximas das três dezenas, com o máximo de variação de 27,7°C para a potência de 1,1 W. Esta situação dever-se-á então à superior concentração de água presente no fantoma, comparativamente ao absorvedor, que lhe confere a capacidade de dispersar mais a energia que lhe incide, resultando numa variação de temperatura inferior à verificada pelo absorvedor sob as mesmas condições de irradiação. Verifica-se que no caso do fantoma, as irradiações realizadas registaram menores variações totais e de temperatura e tiveram durações mais prolongadas. Sendo que a cedência do fantoma só se verificou a partir da potência de 1,82W, enquanto que para o absorvedor, a cedência da superfície ocorreu logo na potência de 0,76 W. Foi realizado ainda um teste para a potência de 2,3W que originou a cedência do fantoma próximo do final dos 5 minutos de irradiação, tendo-se registado uma variação de 4,2°C nesse intervalo.

Anexo 4 – Especificações do Termómetro de IV

Tabela 1: Especificações técnicas do Termómetro de IV utilizado na fase inicial do projeto. Adaptado de [66].

Temperatura	
Intervalo de medição da temperatura	-10 °C a +250 °C
Precisão de medição da temperatura	± 2 °C ou ± 2 % da leitura em °C, o que for maior (a 23° nominal)
Correção da emissividade no ecrã	Sim
Segundo plano refletido no ecrã Compensação de temperatura	Sim
Desempenho na criação da imagem	
Frequência de captura de imagens	8 Hz
Tipo de detetor	Cerâmica piroelétrica não arrefecida
Sensibilidade térmica (NETD)	≤ 250 mK
Faixa espectral infravermelha	8 μm a 14 μm
Câmara visual	11025 pixéis
Distância mínima do foco	50 cm
Campo de visão	20° X 20°
Mecanismo de foco	Foco fixo
Apresentação da imagem	
Paleta de cores	<i>Ironbow</i> , Arco-íris, Alto contraste em Arco-íris, Escala de cinza (branco quente) e Escala de cinza (preto quente)
Nível e alcance	Auto
Opções de exibição	Combinação de imagens visuais e imagens de infravermelhos, desde totalmente IV a totalmente visual em incrementos de 25%
Deteção de focos quente e frio	Sim
Controlos e ajustes	Seleção de paleta de cores Unidade de temperatura selecionável (°C/°F) Seleção de emissividade Registo de hora/ data
Captura de imagens e armazenamento dos dados	
Captura de imagens	Imagem disponível para revisão antes de ser guardada

Meio de armazenamento	Cartão Micro SD com capacidade para até 10.000 imagens
Formato de arquivo	.is2
Verificação da memória	Procure as imagens guardadas e visualize no ecrã
Temperatura de operação	-5 °C a +45 °C
Temperatura de armazenamento	-20 °C a +60 °C
Humidade	10 % a 90 %, sem condensação

Anexo 5 – Especificações do Termómetro Termopar

Tabela 1: Especificações técnicas do Termómetro Termopar. Adaptado de [66].

Gerais	
Temperatura de Operação	-10°C a +50°C
Temperatura de Armazenamento	-40°C a 60°C
Precisão	± 1,1°C (± 2,0°F)
Termopar (fornecido com o termómetro)	
Tipo	Tipo K, <i>Chromel Alumel, bead style</i>
Intervalo de Temperatura	-40°C a +260°C (-40°F a +500°F)
Precisão	± 1,1°C (± 2,0°F)
Intervalo de Medida	Tipo-T: -250°C a +400 °C (-418°F a +752 °F)
Resolução do ecrã	0,1 °C / °F / K < 1000° 1,0 °C / °F / K ≥ 1000°
Precisão de Medida, T1, T2 ou T1-T2	±[0,05 % da leitura + 0,3 °C (0,5 °F)] [inferior a -100 °C (-148 °F): adicionar 0,45 % da leitura]
Coefficiente de Temperatura	0,01 % da leitura + 0,03 °C por °C (0,05 °F por °F) fora do intervalo +18 °C a 28 °C (+64 °F to +82 °F) [para valores inferiores a -100 °C (-148 °F): adicionar 0,08 % da leitura]

Anexo 6 – Especificações da Câmara USB

Tabela 1: Especificações técnicas da Câmara AVT Guppy F036B USB utilizada. Adaptado de [67].

Tipo de Imagem	Tipo 1/3 (diag. 5.35 mm) <i>scan</i> progressivo, CMOS MT9V022
Tamanho de Imagem	752 (H) x 480 (V) (todos os modos e formatos de cor)
Tamanho da célula	6 μm x 6 μm
Resolução	8 bit (10 bit ADC)
Lentes	C-Mount, CS-Mount (convertível via adaptador)
Interface Digital	IEEE 1394a (IIDC V1.3), porta única
Taxa de transferência	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s
Taxa de frame	Up to 64 fps (<i>full frames</i>)
Controlo do ganho	Manual 0 - 12 dB, ganho auto
Velocidade do <i>shutter</i>	180 μs ... 979 ms
<i>External trigger shutter</i>	Programável, <i>trigger delay</i> programável
Características	<i>binning</i> (média); AGC (controlo ganho auto), espelho; LUT, 1 config. input, 3 config. outputs, RS-232 port (<i>serial port</i> , IIDC v. 1.31)
Requisitos de alimentação	DC 8 V – 36 V via IEEE 1394 cabo ou 8-pin HIROSE
Consumo de energia	Menos de 2 watt (@ 12V DC)
Dimensões	48.2 mm x 30 mm x 30 mm (L x E x A)
Massa	50 g (sem lentes)
Temperatura de operação	+5... + 50° Celsius sem condensação
Temperatura de armazenamento	-10... + 60° Celsius sem condensação
Regulações	EN 55022, EN 61000, EN 55024, FCC Classe B, CE, DIN ISO 9022-3, RoHS (2002/95/EC)

Opções

Board level version, power out (HIROSE), AVT

FirePackage / Active FirePackage / Fire4Linux

Sensor CMOS MT9V022

O espectro de eficiência quântica em função do comprimento de onda do sensor de imagem integrado na câmara USB é apresentado na Figura 1. No espectro foi destacado o comprimento de onda de 808 nm, utilizado no feixe laser deste projeto.

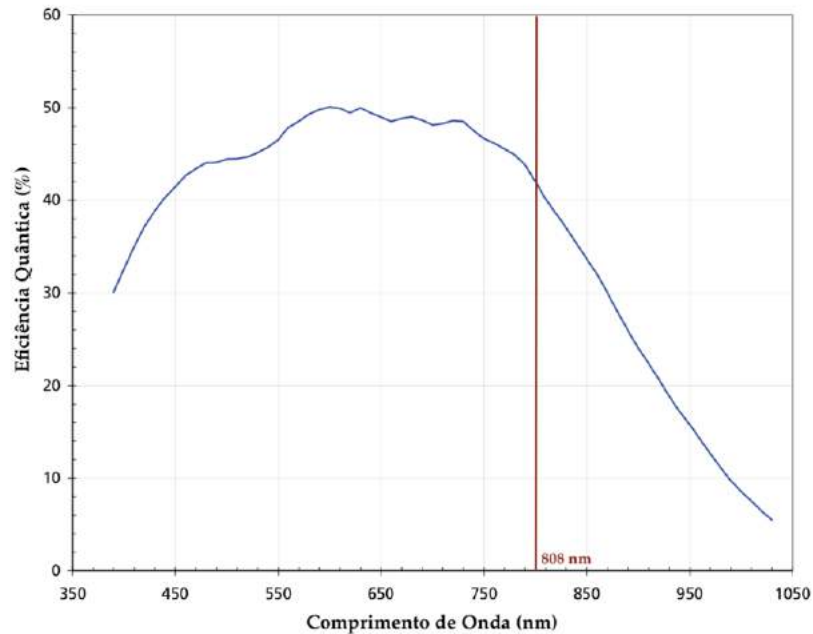


Figura 1: Espectro de eficiência quântica do sensor CMOS MT9V022 integrado na câmara USB utilizada no projeto. Adaptado de [67].

Atentando no comprimento de onda destacado, verificamos que o sensor integrado na câmara possui uma elevada sensibilidade para captar o comprimento de onda do feixe laser utilizado com cerca de 42% de eficiência.

Anexo 7 – Construção dos sensores de fibra Óptica

1. Sensor de Fibra Óptica FP1

O sensor de fibra óptica FP1 foi construído com recurso a uma fibra monomodo. Com o laser de Nd:YAG foi realizada uma descarga elétrica na fibra que cria um orifício de ar perpendicular ao eixo da mesma com o diâmetro de $117,05 \mu\text{m}$ (ver Figura 1). A porção de fibra óptica entre o orifício construído e a extremidade da fibra (cuja dimensão nesta fibra é de $467,90 \mu\text{m}$) é depois clivada até se obter sinal proveniente do sensor livre de ruído.

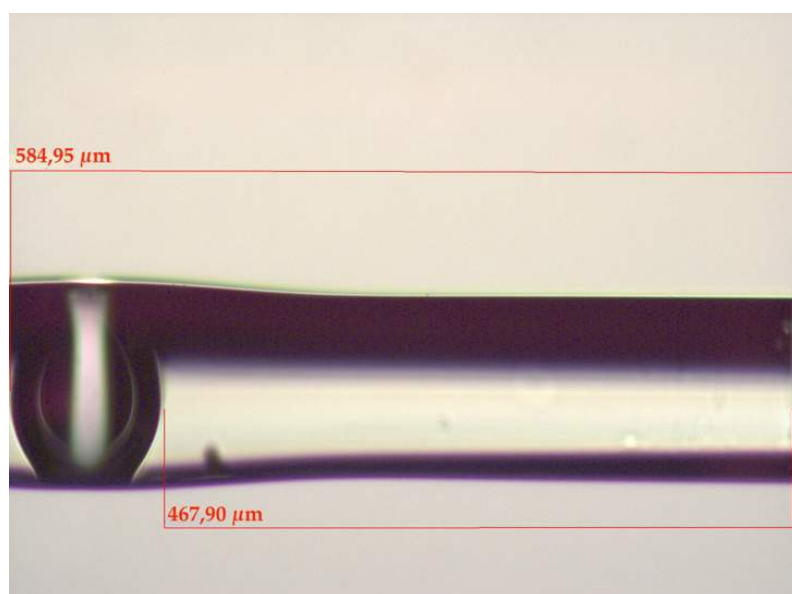


Figura 1: Imagem da extremidade da fibra óptica FP1 com a distância entre a lateral direita do orifício de ar e a extremidade da fibra óptica assinalada sendo esta de $467,9 \mu\text{m}$. O orifício de ar possui um diâmetro de $117,05 \mu\text{m}$.

Sobre a extremidade sensora desta fibra foi realizada a deposição de um filme fino de Óxido de Grafeno (do inglês *Graphene Oxide* - GO) pelo método *Layer-by-layer* adotado em [34]. A Figura 2 representa na imagem (a) as soluções utilizadas para construir as bicamadas e na imagem (b) o resultado da deposição de 20 bicamadas de GO na extremidade do sensor de fibra óptica FP1.



Figura 2: (a) Imagem das soluções de PEI (polietilenoimina), GO e água destilada, utilizadas para realizar a deposição das bicamadas sobre a extremidade do sensor FP1. (b) Imagem da extremidade do sensor após a deposição de 20 bicamadas de GO.

A deposição das bicamadas de GO tem como objetivo conferir ao sensor construído a sensibilidade o mais próxima possível do valor de $1,7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, alcançada no estudo mencionado.

2. Sensor de Fibra Óptica FP2

Para construir este sensor foi realizada a fusão de duas fibras ópticas monomodo ambas com diâmetro de $125 \mu\text{m}$. Previamente à fusão das duas fibras, na extremidade da primeira fibra é aplicada uma descarga elétrica com o laser de Nd:YAG que cria um micro-orifício na ponta da mesma. A fusão da segunda fibra bem clivada com a extremidade da primeira, cria uma microcavidade de ar na fibra resultante com $117,05 \mu\text{m}$ de diâmetro ao longo do eixo da fibra, localizada a $467,90 \mu\text{m}$ da extremidade. Numa etapa posterior, realiza-se a fusão desta fibra com outra fibra também com um orifício na sua constituição. O processo de fusão origina o colapso do segundo orifício que resulta no arredondamento da extremidade da fibra óptica que fica agora com $203,89 \mu\text{m}$ de diâmetro na extremidade, perpendicularmente ao eixo da fibra óptica (ver Figura 3 (a) e (b)). A Figura 3 apresenta as dimensões e configuração do sensor mencionado anteriormente.

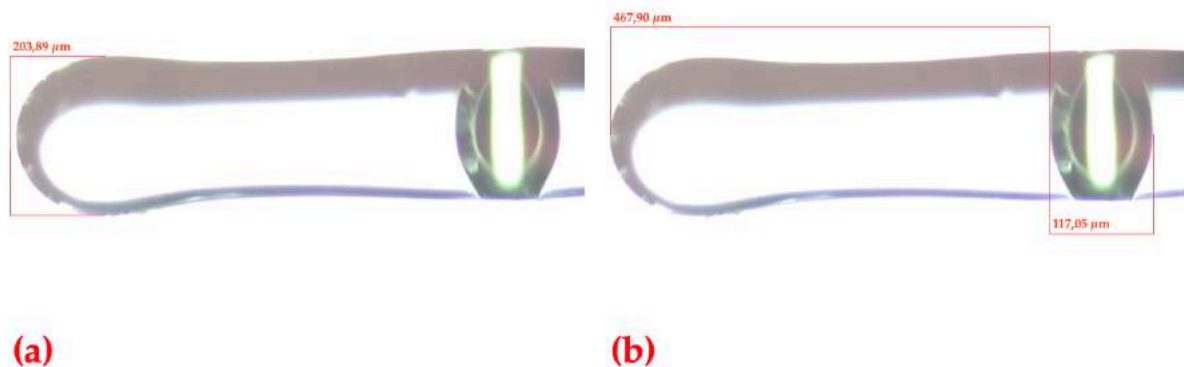


Figura 3: Imagens da extremidade da fibra óptica com os diâmetros da ponta arredondada (a) e da cavidade de ar (b) representados que possuem os valores $203,89 \mu\text{m}$ e $117,05 \mu\text{m}$ respectivamente. Na imagem (b) é ainda apresentada a distância da cavidade de ar à extremidade da fibra óptica que é de $467,90 \mu\text{m}$.

A configuração final da microcavidade assemelha-se a um Interferómetro de *Fabry-Perot* na medida em que, existem duas interfaces parcialmente refletoras (neste caso as paredes da microcavidade) separadas por uma determinada distância que interferem com a luz que se propaga ao longo da fibra óptica [34].

3. Sensor de Fibra Óptica MMI

Um terceiro sensor foi construído recorrendo a uma porção de fibra óptica multimodo *Step Index* e uma porção de fibra óptica monomodo *SMF28* cujo núcleo possui um diâmetro de $50 \mu\text{m}$. O procedimento para a construção deste sensor é o adotado em [10]. O sensor adquire a configuração de um Interferómetro Multimodo com a fusão das duas porções, sendo que a extremidade sensora da fibra com o

comprimento L será composta pela porção multimodo (ver Figura 4). O valor do comprimento da porção multimodo (L) foi definido para 14 mm neste projeto.

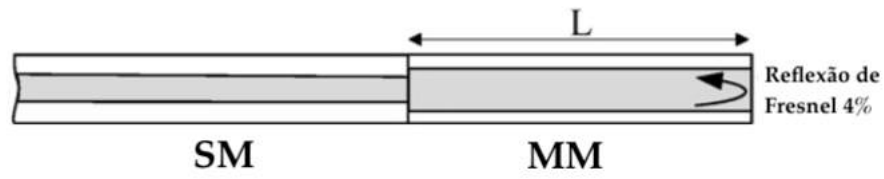


Figura 4: Esquema representativo da extremidade do sensor de fibra óptica MMI.

Caracterização dos sensores de fibra óptica

A caracterização dos sensores foi realizada colocando a ponta sensora dos mesmos dentro de um recipiente de esferovite com água quente a uma temperatura de 60°C, medida pelo termómetro Termopar e registando o sinal resultante em intervalos decrescentes de 1°C até à temperatura de 18°C (ver Figura 1).



Figura 1: Imagem do *setup* experimental utilizado para realizar a caracterização em temperatura dos sensores de fibra óptica. Na imagem é visível o recipiente de esferovite onde é introduzida a água, a extremidade sensora do sensor de fibra óptica MMI numa lateral do recipiente e numa outra lateral o termómetro Termopar.

Por forma a ler o sinal refletido na extremidade da ponta sensora foi utilizada a configuração apresentada na Figura 2 que inclui uma fonte, um circulador ótico para o bter o sinal refletido na extremidade sensora da fibra e o instrumento OSA (do inglês *Optical Spectrum Analyzer*) como unidade de interrogação. Como mostra a figura, utiliza-se a fonte no modelo SLD (do inglês *Superluminescence Diode*) de espectro largo (1450 a 1600 nm) centrado em 1550 nm, que emite um sinal que circula no interior da fibra ótica. O sinal refletido na extremidade da ponta é apresentado com recurso ao OSA, no modelo 86140B Agilent.

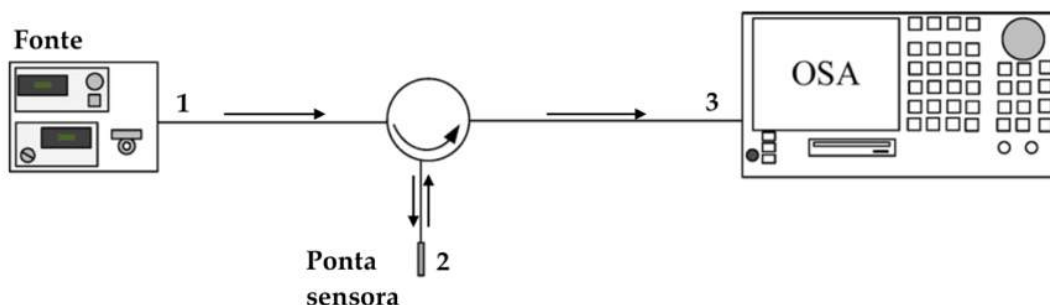


Figura 2: Esquema representativo da configuração experimental utilizada para obter o sinal óptico refletido na extremidade da fibra óptica. Adaptado de [10].

A Figura 3 apresenta o *setup* experimental real, anteriormente mencionado, utilizado para realizar a caracterização do sensor de fibra óptica MMI.

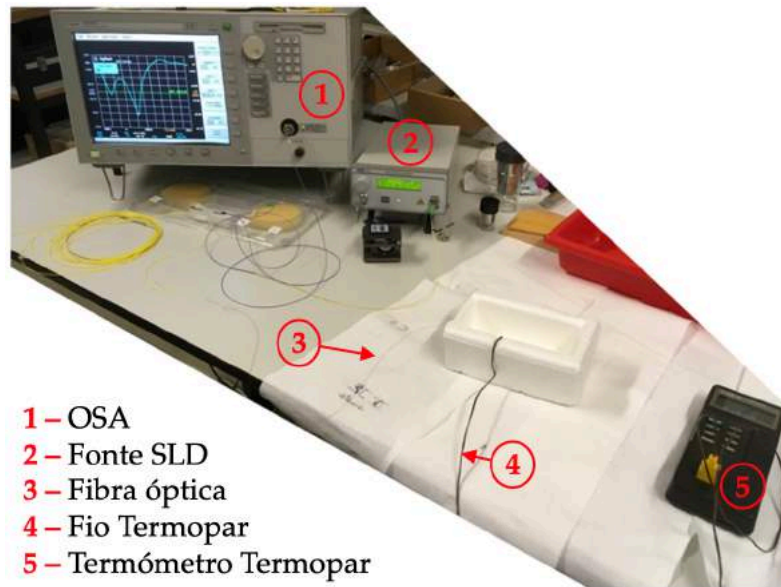


Figura 3: Imagem do *setup* experimental utilizado para realizar a caracterização em temperatura do sensor de fibra óptica MMI. Na imagem é visível a OSA (1), a fonte superluminescente (2), o sensor de fibra óptica (3) e a ponta sensora do Termopar (4) introduzidos no recipiente de esferovite com água, respetivamente da esquerda para a direita.

O *setup* anteriormente apresentado é comum para todos os testes de caracterização em temperatura dos sensores de fibra óptica realizados ao longo deste projeto, substituindo-se apenas o tipo de sensor em estudo.

Para caracterizar o sensor realiza-se o registo dos sinais produzidos pelo sensor de fibra óptica ligado ao circulador, apresentados no OSA. A janela de interesse e o número de amostras recolhidas são definidas previamente à aquisição do sinal no próprio instrumento OSA. Regista-se o sinal nos intervalos de leitura pretendidos e posteriormente, estes sinais são reunidos num gráfico.

Por forma a calcular a sensibilidade do sensor, procura-se uma variação do sinal entre cada registo, nomeadamente em amplitude ou em comprimento de onda que será proporcional à variação de temperatura que ocorre entre cada registo.

Resultados e análise

1. Sensor FP1

O sinal lido por este sensor possui múltiplas franjas que resultam das interferências provocadas na luz pela existência do orifício de ar no sensor.

Para a caracterização deste sensor a temperatura inicial da água colocada no interior do recipiente foi de 60°C tendo-se registado os sinais provenientes do sensor em intervalos de 5°C até à temperatura de 30°C e posteriormente em intervalos de 1°C até aos 18°C. A janela seleccionada foi de 1512 a 1563 nm, tendo-se recolhido um total de 1000 amostras. Os sinais provenientes da caracterização em temperatura

realizada para o sensor FP1 foram registados no gráfico da Figura 4. Adicionalmente, apresenta-se o gráfico com a amplificação dos sinais lidos para o intervalo específico de 126,6 a 128,8 nm.

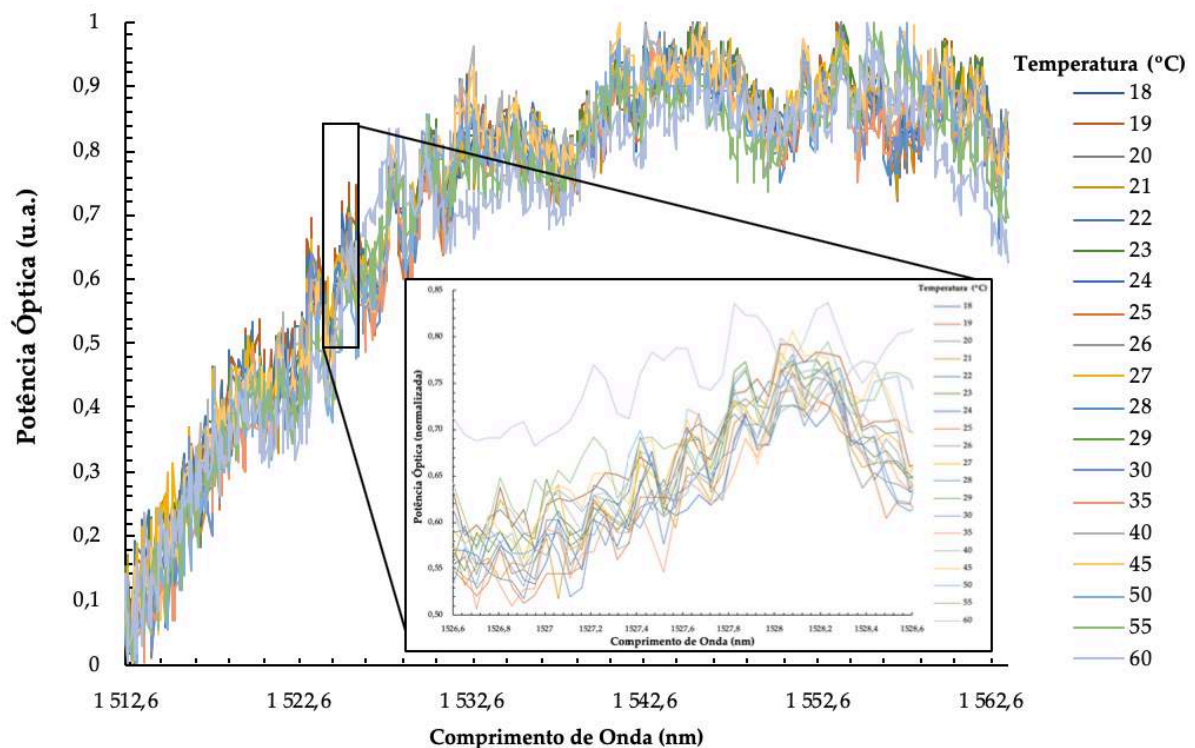


Figura 4: Gráfico dos sinais obtidos com o sensor de fibra óptica FP1 registados para os diferentes valores de temperatura da água no interior do recipiente com a janela de visualização de 1512,6 a 1562,6 nm. Na imagem é realizada uma ampliação da janela de 1526,6 a 1528,6 nm.

A análise do gráfico da Figura 4 permite verificar que não existe um padrão na variação do sinal produzido pelo sensor, uma vez que o formato do sinal não se mantém constante para as diferentes temperaturas, não existindo uma tendência na variação da amplitude nem do comprimento de onda. No entanto, o gráfico completo dos sinais recolhidos permite notar a presença das franjas resultantes da interferência provocada na luz, para o intervalo em comprimento de onda de 1532 a 1562 nm.

Concluimos assim que o sensor FP1 construído, bem como as deposições do filme de GO realizadas sobre o mesmo não resultam num instrumento com sensibilidade para ser utilizado como ferramenta de avaliação da distribuição da temperatura no interior de um meio turbido.

2. Sensor FP2

De forma semelhante ao sensor de fibra óptica FP1, o sinal proveniente do sensor FP2 também possui franjas que são resultado da interferência provocada pela cavidade de ar na extremidade sensora da fibra sobre a luz que circula no interior da fibra óptica. Para realizar a caracterização deste sensor em temperatura foi registado o sinal proveniente do sensor para diferentes valores de temperatura em intervalos de 1°C, desde os 18°C até aos 26°C e em intervalos de 5°C, desde os 30°C até aos 55°C. Os sinais foram recolhidos com uma janela de visualização de 1547 a 1550 nm com um total de 10000 amostras.

No gráfico da Figura 5 foram reunidos os sinais provenientes do sensor FP2 para cada valor de temperatura.

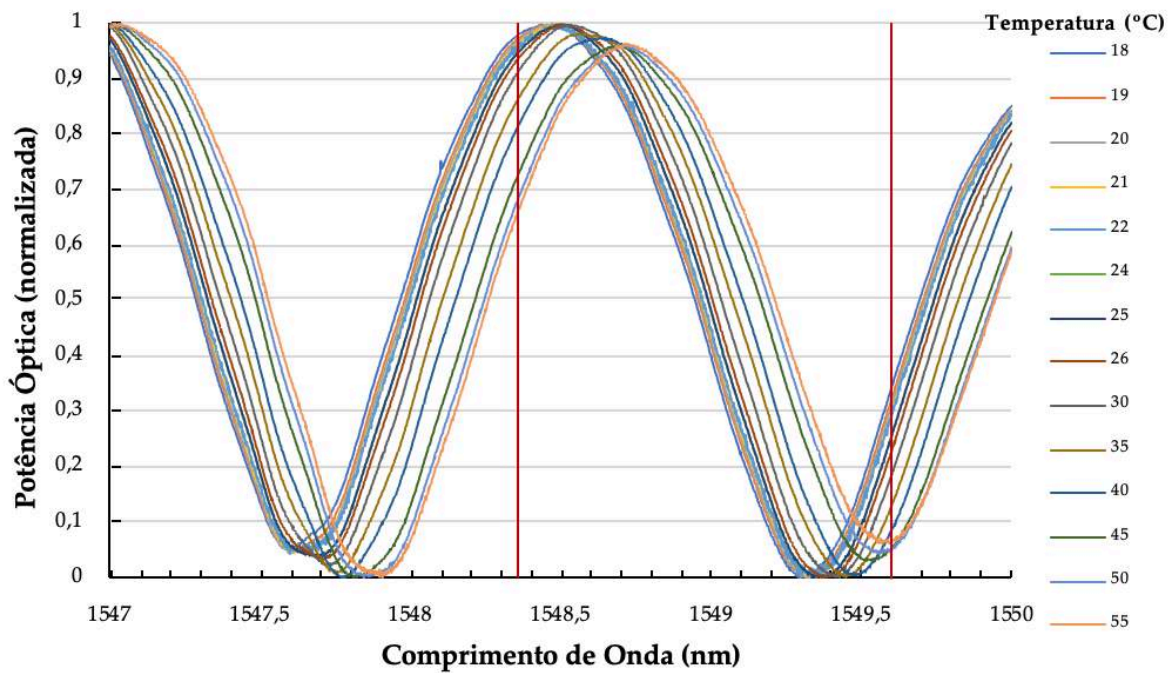


Figura 5: Gráfico dos sinais obtidos com o sensor de fibra óptica FP2 registados para os diferentes valores de temperatura considerados para realizar a caracterização do sensor com a janela de visualização de 1547 a 1550 nm.

Analisando o intervalo de comprimento de onda 1548,4 a 1549,6 nm considerado no gráfico da Figura 5, verificamos que há variação da amplitude de alguns dos sinais provenientes do sensor. A Tabela 1 regista os valores de amplitude para os diferentes sinais recolhidos neste intervalo.

Tabela 1: Valores de amplitude de cada um dos sinais correspondentes às diferentes temperaturas para o intervalo de comprimento de onda 1548,4 a 1549,6 nm. A amplitude é calculada com a diferença entre os valores máximo e o mínimo de potência óptica atingidos por cada sinal no intervalo considerado.

Temperatura (°C)	Amplitude (u.a.)
55	0,91
50	0,92
45	0,93
40	0,97
35	0,98
30	1,00
26	1,00
25	1,00
24	1,00
22	1,00
21	1,00
20	1,00
19	1,00
18	0,91

Cruzando esta informação com o apresentado no gráfico da Figura 6, constatamos que para os sinais correspondentes às temperaturas de 18°C a 30°C não ocorre variação da amplitude do sinal, apenas deslocamento do mesmo ao longo do eixo do comprimento de onda. Para os seguintes sinais, correspondentes aos valores de temperatura de 35°C a 55°C, a amplitude do sinal diminui, atingindo-se a menor amplitude de todos os sinais para o sinal correspondente à temperatura de 55°C. Associada a esta diminuição da amplitude a partir do sinal correspondente à temperatura 35°C, existe ainda uma deslocação ao longo do eixo do comprimento de onda no sentido crescente do mesmo.

Monitorizando o valor pico máximo centrado 1548,46 nm para o sinal correspondente à temperatura 18°C, calculou-se a variação em comprimento de onda no sinal para cada valor de temperatura considerado na caracterização. O gráfico da Figura 6 reúne os desvios verificados no sinal em função da variação de temperatura. O ajuste dos resultados experimentais a uma reta mostra a dependência linear que se verifica na variação do sinal com a variação de temperatura.

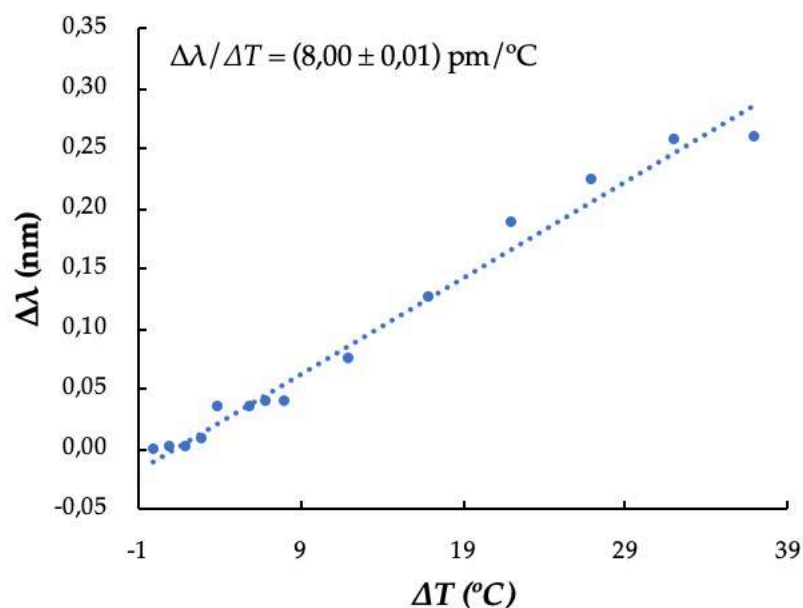


Figura 6: Gráfico dos valores do desvio do pico máximo do sinal centrado em 1548,46 nm correspondente à temperatura 18°C em λ em função da variação da temperatura da água. A equação de caracterização do sensor de fibra óptica FP2 em água é apresentada no gráfico.

Os coeficientes da equação de ajuste obtida encontram-se reunidos na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes da curva de ajuste dos dados apresentados no gráfico da Figura 7 correspondentes à caracterização do sensor FP2 em água. O valor T representa a temperatura da água do recipiente, medida com recurso ao Termopar.

Equação de Ajuste	$y = a_0T + a_1$
Valores das Variáveis	$a_0 = 0,0080$ $a_1 = -0,0097$
Análise Estatística	$R^2 = 0,9811$

Posto isto, a sensibilidade alcançada para o sensor FP2 é de $(8,0 \pm 0,01)$ pm/°C em meios líquidos.

A monitorização da variação da amplitude por forma a caracterizar o sensor não seria viável pois a amplitude do sinal mantém-se constante até à temperatura de 30°C.