Desenvolvimento de sistemas de manutenção de temperatura com sistema anti-gelo - *design*, simulação numérica e fabrico

Inês Isabel Gomes Leitão

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientadora (FEUP): Sónia Isabel Silva Pinto

Coorientador (CeNTI): Eduardo Miguel Correia de Oliveira

Dissertação de Mestrado

28 de junho de 2021

Desenvolvimento de sistemas de manutenção de temperatura com sistema de anti-gelo - *design*, simulação numérica e fabrico

Inês Isabel Gomes Leitão

Mestrado em Engenharia Mecânica

28 de junho de 2021

Resumo

Devido à evolução da indústria automóvel nos últimos anos, provocada pelo aumento da exigência do consumidor relativamente ao impacto do mesmo no meio ambiente, a mais segurança e mais conforto, os veículos começaram a ser munidos de equipamentos, que cada vez mais, ajudam o condutor a desenvolver a sua função. Estes equipamentos recebem e analisam a informação recebida pelo meio envolvente. No entanto, esta receção de informação está diretamente dependente de diversos fatores, que põem em causa o seu correto funcionamento. Um dos fatores são as condições atmosféricas como por exemplo, chuvas intensas ou formação de gelo à superfície destes equipamentos, impedindo a receção parcial ou completa da informação exterior.

A presente dissertação foca-se no estudo de sistemas de anti-gelo aplicáveis nestas superfícies de modo a evitar a formação de gelo e permitir, assim, a correta recolha de informação por estes dispositivos. Para o efeito, procedeu-se à modelação do modelo físico com recurso ao *software SpaceClaim* e sucessiva simulação numérica no *software ANSYS FENSAP-Ice*. Por fim, a validação experimental em laboratório, com recurso a diversos métodos. Alguns destes foram a impressão de circuitos por Serigrafia (*Screen Printing*), análise e caracterização dos circuitos impressos com recurso a uma câmara termográfica e análise e validação experimental do sistema impresso como um sistema de anti-gelo e degelo, com recurso a uma câmara climática.

Neste estudo procurou-se testar diversas soluções a nível de geometria do sistema de anti-gelo definido, de modo a garantir a não formação de gelo em determinadas condições atmosféricas e garantir a integridade e manuseamento dos materiais em contacto com o sistema de anti-gelo. Foi definida uma velocidade de ar de 5 $m \cdot s^{-1}$, e uma diferença de temperaturas entre a superfície e o ar de 10 ^oC. Foram estudadas duas temperaturas de ar distintas -10 ^oC e -20 ^oC, a nível numérico. A nível experimental, apenas puderam ser testados os sistemas de aquecimento a -10 ^oC.

No fim, após a realização dos ensaios experimentais e respetiva comparação dos mesmos com os resultados numéricos realizados, verificou-se uma dificuldade na comparação quantitativa direta de ambos os resultados. No entanto, qualitativamente foi possível estabelecer uma comparação entre eles, onde se verificou uma concordância dos resultados. Para garantir esta comparação foi feita uma validação a nível das temperaturas registadas pelo sistema de aquecimento durante o ensaio de caracterização e a nível numérico.

Conclui-se que a geometria 2 é a que apresenta melhor eficácia como sistema de

anti-gelo, quando comparada com as restantes geometrias em estudo, sendo que este sistema de aquecimento atinge tanto a nível numérico como a nível experimental, uma temperatura idêntica, cerca de 40 ^oC.

Palavras-Chave:

Anti-gelo, Degelo, *Design*, Efeito Joule, Fabrico, Serigrafia, Simulação Numérica.

Abstract

Due to the evolution of the automotive industry in recent years, caused by the increase in consumer demand regarding its impact on the environment and the demand for more safety and more comfort, vehicles began to be equipped with devices, that increasingly helps the driver to develop his function. These equipments receive and analyze the information received by the surroundings. However, this reception of information is directly dependent on several factors that jeopardize its correct functioning. One of the factors is the atmospheric conditions, such as intense rain or ice formation on the surface of the equipment, preventing partial or complete reception of external information.

This dissertation focuses on the study of anti-icing systems applicable to these surfaces to avoid formation of ice and thus allow the correct collection of information by these devices. For this purpose, the physical model was modeled, using the SpaceClaim software, successive numerical simulation in the ANSYS Fensap-Ice software. Finally, the experimental validation in the laboratory, using various methods. Some of these methods were printing circuits using Screen Printing methods, analysis and characterization of printed circuits using a thermographic camera and experimental analysis and validation of the printed systems as an anti-icing and de- icing system, using a climatic chamber.

In this study, an attempt was made to test various solutions in terms of the geometry of the defined anti-icing system, in order to guarantee that ice does not form under certain atmospheric conditions and to ensure the integrity of handling material in contact with the anti-icing system. An air velocity of 5 $m \cdot s^{-1}$ and a temperature difference between the surface and the air of 10 ^oC were defined. Two distinct air temperatures -10 ^oC and -20 ^oC were studied at the numerical level. However, experimentally only heating systems at -10 ^oC could be tested.

After the numerical analysis, a study was made on an experimental level where several changes were made due to the limitations of both the equipment and the study space.

In the end, after carrying out the experimental tests and comparing them with the numerical results, there was a difficulty in the direct quantitative comparison of both results. However, qualitatively it was possible to establish a comparison between them, where there was an agreement of the results. To guarantee this comparison, a validation was made at the level of temperatures recorded by the heating system during

the characterization test and at the numerical simulation.

It is concluded that geometry 2 is the one with the best performance as an anti-icing system, when compared to the other geometries, and this heating system reaches, numerically and experimentally, an identical temperature, approximately of 40 ^oC.

Keywords:

Anti-icing, De-icing, Design, Joule effect, Manufacturing, Screen Printing, Numerical Simulation.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que tornaram a realização deste projeto final possível, tanto pelo acompanhamento direto, como pelo apoio moral.

Em primeiro lugar, à minha Orientadora Professora Sónia Pinto pela ajuda prestada neste trabalho de final de curso, pela paciência para todas as questões e pela disponibilidade demonstrada.

Em segundo lugar, deixo os meus maiores e sinceros agradecimentos ao meu Coorientador Engenheiro Eduardo Oliveira do CeNTI, que sempre se demonstrou disponível para tudo e para qualquer dúvida, desde as mais estranhas até às mais sem lógica nenhuma, que sempre tinha uma palavra de incentivo e cuidado perante o trabalho apresentado e que no fim resistiu ao frio na câmara climática.

Em terceiro lugar, ao Engenheiro João Pedro do CeNTI, que de igual forma esteve sempre presente durante todo o projeto, que sempre teve um olhar crítico sobre os resultados obtidos e que sempre me ajudou a solucionar da melhor forma os problemas enfrentados. Agradeço também pelo frio passado dentro da câmara climática, na fase final do projeto.

Em quarto lugar, não poderia deixar de agradecer à Engenheira Cristina Furtado do CeNTI, que me deu todo o apoio necessário no desenvolvimento experimental, bem como sempre se demonstrou disponível ao esclarecimento de qualquer dúvida.

Depois, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos ao CeNTI, por mesmo considerando todas as limitações, derivadas do contexto pandémico em que vivemos, sempre me disponibilizou os meios necessários à realização do presente projeto.

Acima de tudo, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica por me ter disponibilizado os meios essenciais para a minha formação superior e por me terem dado ferramentas que me serão úteis nos anos que se seguem, em várias áreas da minha vida.

Aos meus pais, um gigante obrigada por nunca me cortarem asas, por sempre me incentivarem, mas ao mesmo tempo sempre me "puxarem para Terra".

À Mariana, que mesmo estando sempre a chatear-me quando tinha tudo por fazer, me dava sempre uma palavra de incentivo, me levantava a cabeça e dizia que eu era capaz.

Ao Tiago, que sempre me apoiou em tudo, que me ajudou nas fases mais difíceis, que foi incansável comigo desde o início, que sempre tinha uma palavra de incentivo e acima de tudo crítica sobre o trabalho que desenvolvia.

À Tatiana, que me acompanhou nesta jornada, que teve sempre paciência para as minhas dúvidas, que sempre se dispôs a aturar-me e a ajudar-me em tudo, que me fez dizer 5 mil vezes antes de cada exame, em frente a uma sala par, que "Vai tudo correr bem!"e na verdade correu.

Inês Leitão

Lista de abreviaturas

ABS	Sistema de travagem anti-bloqueio (*Anti-lock Braking System*)
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
ADAS	*Advanced Driver Assistance Systems*
ADIS	*Anti-icing and De-icing Systems*
CEIIA	Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel
CeNTI	*Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes*
CFD	*Computacional Fluid Dynamics*
CITEVE	Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal
CNT	Nanotubos de Carbono (*Carbon Nanotubes*)
CTIC	Centro Tecnológico das Indústrias do Couro
ESC	Controlo Eletrónico de Estabilidade (*Eletronic Stability Control*)
FEM	Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method*)
GNP	Nano-plaquetas de Grafeno (*Graphene Nanoplalets*)
LiDAR	*Light Detection and Ranging*
LRR	Radar de Longo Alcance (*Long Range Radar*)
LWC	*Liquid Water Content*
MHEV	*Mild Hybrid Electric Vehicle*
MVD	*Medium Volume Diameter*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
PC	Policarbonato
PMMA	Polimetilmetacrilato
SAE	*Society of Automative Engineers*
SSD	*Supercooled Small Droplets*
SLD	*Supercooled Large Droplets*
SPEED	*Sonic Pulse Electro Expulsive De-Icer*
SRR	Radar de Curto Alcance (*Short Range Radar*)
STF	*Solar Thermal Fuel*
VC	*Volume de Controlo*

Lista de símbolos

Designação	Significado	Unidades
A	Área de transferência de calor	m^2
T	Temperatura	^oC
h_{conv}	Coeficiente de convecção	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
P	Potência	W
R	Resistência	Ω
R_T	Resistência térmica	Ω
I	Intensidade de corrente	A
p	Pressão	Pa
m	Massa	kg
a	Difusibilidade térmica	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\dot{q}$	Fluxo de calor	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{Q}$	Potência calorífica	W
$\dot{g}$	Índice de geração de calor	$J \cdot m^{-3}$
Re_∞	Número de Reynolds	–
Pr_∞	Número de Prandtl	–
L_∞	Comprimento característico	m
ρ	Massa volúmica	$kg \cdot m^3$
u	Velocidade segundo x	$m \cdot s^{-1}$
v	Velocidade segundo y	$m \cdot s^{-1}$
g	Aceleração da gravidade	$m \cdot s^{-2}$
Cd	Coeficiente de arrasto	–
Fr	Número de Froude	–
μ	Viscosidade dinâmica	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
ν	Viscosidade cinemática	$m^2 \cdot s$
ε	Emissividade	–
K	Parâmetro de Inércia	–
M_∞	Número de *Mach* num fluxo livre	–
c_p	Calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Re_d	Número de Reynolds das gotas de água	–
α	Fração de volume da gota de água	–
γ	Fração de calor específico	–

Designação	**Significado**	**Unidades**
e	Poder emissivo	$W \cdot m^{-2}$
σ	Constante *Stefan-Boltzman*	$W \cdot m^{-2} \cdot K^4$

Índice

Resumo ii

Abstract iv

Agradecimentos vi

Lista de abreviaturas viii

Lista de símbolos ix

Lista de Figuras xvi

Lista de Tabelas xxiv

1 Introdução 1

1.1 Motivação . . . 1
1.2 Objetivos . . . 1
1.3 Estrutura da tese . . . 2
1.4 CeNTI . . . 3

2 Estado de arte 5

2.1 Sistemas ADAS . . . 5
2.1.1 Câmaras . . . 6
2.1.2 Radar . . . 6
2.1.3 Sensores Sónicos . . . 7
2.1.4 LiDAR . . . 8
2.2 Processo de formação de gelo . . . 9
2.2.1 Formação de gelo . . . 9
2.2.2 Mecanismos de formação do gelo . . . 11
2.2.3 Tipos de formação de gelo . . . 13
2.3 Sistemas de mitigação de gelo em superfícies críticas para o funcionamento de equipamentos (ADIS) . . . 16
2.3.1 Sistemas passivos . . . 17
2.3.2 Sistemas ativos . . . 21
2.3.3 Outros métodos - sistemas eletricamente aquecidos . . . 27

2.4 Soluções de mercado atual 34

3 Análise teórica **35**

3.1 Mecanismos de transferência de calor 35
3.2 Efeito Joule 38
3.3 Resistência térmica 38
3.4 Resistência superficial de filmes finos 39
3.5 *Software* 40
3.5.1 Modelo de fluxo (*FENSAP*) 40
3.5.2 Impacto das gotas de água nas superfícies (*DROP3D*) 40
3.5.3 Filme de água/ Formação de gelo (*ICE3D*) 42

4 Metodologia **45**

4.1 Simulação numérica 45
4.2 Modelo inicial 47
4.2.1 Atribuição de materiais 49
4.3 Condições de fronteira 49
4.4 Parâmetros de simulação numérica 50
4.5 Malha e análise de sensibilidade 52
4.6 Processo de otimização das geometrias dos sistemas de aquecimento . . 62
4.7 Processo de impressão 64
4.8 Preparação dos circuitos elétricos para carcaterização térmica 68
4.9 Caracterização térmica dos circuitos 71
4.10 Análise na câmara climática 74

5 Resultados e discussão **79**

5.1 Resultados numéricos 79
5.2 Resultados Experimentais 80
5.2.1 Impressão dos circuitos por serigrafia (*Screen Printing*) 80
5.2.2 Caracterização térmica dos circuitos impressos 82
5.2.3 Ensaios na Câmara Climática 111
5.3 Comparação dos resultados numéricos e resultados experimentais . . . 135

6 Conclusão e trabalhos futuros **143**

Referências **147**

Apêndice A **151**

Apêndice B **155**

Apêndice C **158**

Apêndice D **162**

Apêndice E **164**

Lista de Figuras

1 Tipos de ADAS - Adaptado de [2]. 6
2 Radar - Adaptado de [1]. 7
3 Sistemas de Ultrassom [1]. 8
4 Características dos cristais de gelo em função da temperatura [4]. . . . 10
5 Evolução da formação do gelo ao longo do tempo - Adaptado de [6]. . . 11
6 Diagrama de fase da água [4]. 12
7 Tamanho de gota relativo em μm [8]. 14
8 Asa de um avião com aplicação de um fluido químico à base de glicol [5]. 19
9 Relação espessura do vidro com o tempo necessário para que uma dada espessura de filme derreta o gelo à sua superfície - Adaptado de [12]. . . 20
10 *Flexible Pneumatic Boots* [9]. 23
11 *Electro Expulsive De-icer* aplicado na asa de um avião - Adaptado de [15]. 24
12 Influência da quantidade de de GNP na condutividade elétrica, por análise da temperatura e do tempo necessário - Adaptado de [16]. 28
13 Configuração da resistência impressa (a) paralela e b) diamante) [17]. . 30
14 Painel solar e impressão em prata (esquerda) e antena RFID (direita) [18]. 31
15 *E-book* de tamanho A4 (esquerda) e dispositivo de medição de temperatura, pressão arterial e glicose (direita) [18]. 31
16 Modelo físico inicial - a)Base e Lente; b) Sistema de aquecimento (*Heater*) e Base. 47
17 *Enclosure*. 48
18 Grupos de Superfícies. 48
19 Distribuição do tamanho de gota. 50
20 Geometria 1 do sistema de aquecimento utilizada na análise de malha. . 54
21 Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 60 iterações. 54
22 Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 100 iterações. 56

23 Relação entre o tamanho de elemento da malha de sólido e a quantidade de gelo formada à superfície, para 100 iterações do módulo *CHT3D*. . . 56
24 Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 100 iterações, para parâmetros de módulo *CHT3D* distintos. 58
25 Relação entre o tamanho de elemento das malhas e a quantidade de gelo formada. 58
26 Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.0006 m e 100 iterações. 60
27 Ortogonalidade dos elementos de malha de fluido para uma tamanho de elemento de 0.0006 m. 60
28 *Skewness* dos elementos da malha de fluido para um tamanho de elemento de 0.0006 m. 61
29 Ortogonalidade dos elementos de malha de sólido para uma tamanho de elemento de 0.0006 m. 61
30 *Skewness* dos elementos da malha de sólido para um tamanho de elemento de 0.0006 m. 61
31 Geometrias inicialmente propostas para estudo. 63
32 Geometrias analisadas - Geometria 1 (esquerda), Geometria 2 (centro) e Geometria 3 (direita). 63
33 Geometria 3 modificada. 64
34 Equipamento de Serigrafia (*Screen Printing*). 64
35 Ferramentas utilizadas no equipamento de impressão - Lâmina (esquerda), Racla (centro) e Quadro (direita). 65
36 Transferência da geometria para o quadro. 65
37 Cobertura do quadro com a solução aquosa (esquerda) e remoção do vinil (dirieita). 66
38 Posicionamento dos equipamentos (Quadro, racla e lâmina) no equipamento de impressão. 66
39 Colocação do filme de prata sobre a malha. 67
40 Exemplos de amostras impressas utilizando carbono e prata em PC. . . 68

41 Colocação de fita de cobre sobre a prata da geometria 1 impressa. . . . 69
42 Equipamento de crimpagem (esquerda) e exemplos de crimpos (direita). 70
43 Processo de crimpagem (esquerda) e posicionamento do crimpo no circuito impresso (direita). 70
44 Método utilizado nas diferentes geometrias para fazer o contacto do circuito com o fio elétrico (Geometria 2 (esquerda) - soldadura no crimpo e Geometria 1 (direita) - soldadura direta sobre a fita de cobre). 71
45 Processo de soldadura dos fios elétricos aos crimpos nos circuitos impressos. 71
46 Equipamentos necessários na caracterização térmica - *display* (esquerda), fonte de tensão (centro), câmara termográfica - FLIR A320 (direita) . . 72
47 *Set up* de caracterização térmica dos circuitos. 73
48 Preparação final das amostras de acordo com o modelo físico estabelecido (Base (PC) - Sistema de aquecimento - Lente (PMMA)), com diferentes acoplamentos - PET-G (esquerda) e Fita-cola (direita). 75
49 *Set up* dos ensaios dos sistemas de degelo e anti-gelo. 76
50 Quantidade de gelo formada (g) associada a cada geometria para cada condição fronteira (Tipo I e II). 79
51 Exemplos de alguns defeitos identificados nas amostras impressas. . . . 81
52 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 1 em função do tempo. 84
53 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 1 em função da tensão. 84
54 Evolução da distribuição de temperaturas da visual da amostra 1 da geometria 1. 85
55 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 1 em função do tempo. 86
56 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 1 em função da tensão. 87
57 Evolução da distribuição de tempraturas da amostra 2 da geometria 1. 88
58 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 1 em função do tempo. 89
59 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 1 em função da tensão. 89
60 Evolução da distribuição de temperaturas da visual da amostra 3 da geometria 1. 90
61 Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 1. 92
62 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 2 em função do tempo. 93
63 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 2 em função da tensão. 93
64 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 1 da geometria 2. 94
65 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 2 em função do tempo. 95

66 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 2 em função da tensão. 96
67 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 2 da geometria 2. 97
68 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 2 em função do tempo. 98
69 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 2 em função da tensão. 98
70 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 3 da geometria 2. 99
71 Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 2. 100
72 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 3 em função do tempo.101
73 Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 3 em função da tensão.101
74 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 1 da geometria 3. 102
75 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 3 em função do tempo.104
76 Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 3 em função da tensão.104
77 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 2 da geometria 3. 105
78 Análise da distribuição de temperaturas dos pontos assinalados para uma tensão de 12 V - esquerda, para uma tensão de 18 V - centro e para uma tensão de 23 V - direita, da Amostra 2 da geometria 3. 106
79 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 3 em função do tempo.107
80 Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 3 em função do tempo.107
81 Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 3 da geometria 3. 108
82 Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 3. 109
83 Evolução da massa total ao longo do ensaio de formação de gelo com recurso a diferentes técnicas. 111
84 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 1 e 2 da geometria 1. 112
85 Amostra 1 (Esquerda e centro) e 2 (centro e direita) antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo 113
86 Amostra 1 (Esquerda e centro) e 2 (centro e direita) depois do ensaio do sistema de anti-gelo 113
87 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 2 e 3 da geometria 2. 115
88 Amostra 2 (Esquerda) e 3 (direita) antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo 116
89 Amostra 2 (Esquerda) e 3 (direita) depois do ensaio do sistema de anti-gelo116

90 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 1 da geometria 3. 117
91 Amostra 1 da geometria 3 antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo.118
92 Amostra 1 da geometria 3 após o ensaio do sistema de anti-gelo. 118
93 Evolução da massa total, ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 1 da geometria 1 e do volume de controlo. 120
94 Registo fotográfico da amostra 1 (esquerda e centro) e do volume de controlo (centro e direita), 10 minutos após o início da etapa de formação de gelo, no ensaio do sistema de degelo. 120
95 Amostra 1 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após repouso de 1.5h na câmara climática. 121
96 Amostra 1 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo após sistema de degelo ativo (direito). 121
97 Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo ligado, da amostra 1 da geometria 1. 122
98 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 2 da geometria 1 e do volume de controlo. 123
99 Amostra 2 da geometria 1 e volume de controlo após 10 minutos da etapa de formação de gelo. 124
100 Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após 1.5h de repouso na câmara climática. 124
101 Amostra 2 da geometria 1 após o sistema de degelo estar em funcionamento 35 minutos. 125
102 Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 2 da geometria 1. 125
103 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 2 da geometria 2 e do volume de controlo. 126
104 Amostra 2 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) no ínicio da etapa da formação de gelo. 127
105 Amostra 2 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo. 127
106 Amostra 2 da geometria 2 (esquerda e centro) e volume de controlo (centro e direita) após o ensaio de degelo. 128
107 Região da amostra 2 da geometria 2 onde se verificou que o gelo derreteu.128

108 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 3 da geometria 2 e do volume de controlo. 129
109 Amostra 3 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) no ínicio da etapa da formação de gelo. 130
110 Amostra 3 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo. 130
111 Amostra 3 da geometria 2 (esquerda e centro) e volume de controlo (centro e direita) após o ensaio. 130
112 Distribuição de temperatura ao longo do ensaio com o sistema de degelo ligado, da amostra 3 da geometria 2. 131
113 Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 1 da geometria 3 e do volume de controlo. 132
114 Amostra 1 da geometria 3 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo. 133
115 Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após 1.5h de repouso na câmara climática. 133
116 Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após ensaio. 133
117 Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 1 da geometria 3. 134
118 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1 (esquerda) e da amostra 2 (direita), da geometria 1, obtida por análise numérica. 137
119 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da geometria 1 no ensaio de caracterização térmica da amostra 1 (esquerda) e amostra 2 (direita), para uma tensão de 19 V e 22 V, respetivamente. 138
120 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 2 e 3, da geometria 2, obtido por análise numérica. 139
121 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da geometria 2, no ensaio de caracterização térmica da amostra 2 (esquerda) e amostra 3 (direita), para uma tensão de 15 V. 139
122 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1, da geometria 3, obtido por análise numérica. 140

123 Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1, da geometria 3, no ensaio de caracterização térmica para uma tensão de 22 V. 140
124 Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*. 151
125 Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 151
126 Resuldados numéricos para 0.002 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*. 152
127 Resuldados numéricos para 0.002 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 152
128 Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*. 153
129 Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 153
130 Resuldados numéricos para 0.0009 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 154
131 Resuldados numéricos para 0.0008 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 154
132 Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 155
133 Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 155
134 Resuldados numéricos para 0.0008 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 156
135 Resuldados numéricos para 0.0007 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 156
136 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*. 157
137 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1. 158
138 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 1. 158
139 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 2. 159

140 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 2. 159
141 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 3. 160
142 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 3. 160
143 Dados dos ensaios de sistema de degelo, na câmara climática. 162
144 Dados dos ensaios de sistema de anti-gelo, na câmara climática. 163
145 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1 - Amostra 1. 164
146 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1 - Amostra 2. 164
147 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 2 - Amostra 2 e 3. 165
148 Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 3 - Amostra 1. 165

Lista de Tabelas

1 Mecanismos de transferência de calor [8]. 13
2 Métodos Passivos de degelo e anti-gelo [9], [10], [12]. 25
3 Métodos ativos de degelo e anti-gelo [9], [10], [12]. 26
4 Comparação os diversos métodos de impressão considerandos alguns parâmetros [18]. 32
5 Condutividade elétrica dos materiais que podem ser utilizados no PE - Adaptado de [18]. 33
6 Mecanismos de transferência de calor - Adaptado de [20]. 35
7 Influência dos parâmetros nos módulos do *software* - Adapatado de [23]. 46
8 Propriedades dos materiais atribuídos ao corpo. 49
9 Definição das condições de fronteira. 49
10 Relação entre o tamanho de elemento e o número de elementos da malha de sólido e número de nós e células da malha de fluído. 53
11 Tamanho de elemento e número de elementos respetivos da malha de fluido analisados. 57
12 Especificações técnicas da câmara termográfica. 72
13 Especificações técnicas da câmara climática. 75
14 Resistência de filme dos circuitos impressos por Serigrafia. 82
15 Tensão inicial determinada e imposta a cada geometria. 82
16 Condições ambientes associadas a cada ensaio da geometria 1, 2 e 3. . . 83
17 Área, Tensão de alimentação, Intensidade de corrente e fluxo de calor médio associado a cada amostra da geometria 1, 2 e 3 para que a mesma atinja 60 ^oC de temperatura máxima no ensaio de carcaterização térmica. 110
18 Propriedades dos materiais atribuídos ao corpo Lente. 135
19 Quantidade de gelo formada à superfície de cada amostra analisada experimentalmente de cada geometria e fluxo de calor associado. 136

1 Introdução

1.1 Motivação

Conisderando o contexto em que este projeto surge, isto é, da escassez de soluções relativamente à formação de gelo em equipamentos que facilitam e auxiliam a condução dos veículos diariamente, impedindo o correto funcionamento dos mesmos, em ambientes sujeitos a condições atmosféricas rigorosas, foi proposto em conjunto com o CeNTI o desenvolvimento do projeto de um sistema de anti-gelo a ser aplicado na indústria automóvel, nomeadamente sobre o radar dos veículos, garantindo assim, a não formação de gelo à sua superfície.

Este projeto revela-se promissor uma vez que na área automóvel as soluções associadas a estes sistemas são escassas ou nulas, ainda que noutras áreas já existam sistemas em utilização.

O projeto visa o estudo tanto a nível numérico, como a nível experimental de um sistema de anti-gelo.

A análise numérica deste sistema será realizada com recurso ao *software ANSYS Fensap-Ice* . O estudo experimental implicará o recurso a técnicas de impressão, nomeadamente Serigrafia, uma técnica desde há muitos anos utilizada para diversos fins, como por exemplo: *OLEDs*, *células de painéis solares* e alguns *displays*, para impressão dos sistemas de aquecimento (*Heaters*) propostos, e posteriormente a caracterização térmica dos mesmos e análise do seu funcionamento tanto como sistema de anti-gelo, como sistema de degelo, numa câmara climática a -10 ^oC.

1.2 Objetivos

Perante as soluções oferecidas pela indústria automóvel atualmente, relativamente a sistemas de anti-gelo e degelo para aplicação em equipamentos que auxiliam a condução do condutor, o presente projeto pretende contribuir como um estudo que contribua positivamente para o desenvolvimento neste domínio.

Este estudo será feito através de uma análise daquelas que são as soluções existentes, tanto a nível da aeronáutica, como a nível daquilo que é aplicado nas pás das turbinas de aerogeradores, selecionar as que são vantajosas no meio automóvel e proceder à análise do domínio computacional e experimental de modo a encontrar uma solução que permita cumprir tanto com as exigências térmicas, como físicas dos equipamentos, visando o recurso a técnicas possíveis de serem aplicadas no meio em questão.

1.3 Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O capítulo 1 engloba uma breve introdução à dissertação. Aqui é descrita a motivação para a mesma, são definidos os objetivos principais, é apresentada a sua estrutura geral e por fim é feita uma breve apresentação da empresa na qual foi realizada esta dissertação, o CeNTI (Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes).

No capítulo 2 é apresentada uma análise bibliográfica de todos os temas relacionados com o presente projeto. O subcapítulo 2.1 aborda os sistemas ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*), desde as câmaras aos radares, o subcapítulo 2.2 apresenta toda a informação necessária e referente aos processos de formação de gelo, aos tipos de gelo e às suas condições de formação, o subcapítulo 2.3 esclarece acerca dos vários sistemas de degelo e anti-gelo, tanto ativos como passivos. Neste subcapítulo também são dados alguns exemplos de sistemas eletricamente aquecidos que foram testados com o mesmo objetivo deste projeto, sendo também referidas alguns métodos de fabrico destes sistemas. Por último, no subcapítulo 2.4 são apresentadas algumas soluções utilizadas atualmente para solucionar o problema principal deste projeto, bem como uma breve referência do que se espera que seja o futuro.

No capítulo 3 é realizada uma análise teórica do projeto, isto é, são explicados os príncipios que sustentam o presente trabalho, bem como toda a análise numérica que sustenta o estudo numérico realizado.

O capítulo 4 descreve a metodologia associada à simulação numérica. É feita uma descrição sobre os *softwares* utilizados, definição dos parâmetros principais das simulações realizadas, bem como as condições fronteiras definidas. Neste capítulo também são descritas as soluções e as etapas propostas e associadas a cada uma delas, bem como a sua otimização. Todos os métodos e procedimentos considerados, desde a preparação e impressão dos circuitos de anti-gelo e degelo até ao ensaio final experimental, na câmara climática.

No capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos obtidos diretamente das simulações realizadas em *software*. São apresentados os resultados experimentais obtidos em laboratório. É realizada uma comparação destes com os resultados obtidos numericamente.

Por último, no capítulo 6 é feita uma breve conclusão de todo o estudo que foi realizado e são descritos alguns trabalhos que poderiam ser interessantes de realizar num futuro próximo.

1.4 CeNTI

O Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes é um instituto sem fins lucrativos, que resulta de uma parceria com 3 Universidades, 2 Centros tecnológicos e 1 Instituto de novas tecnologias, a Universidade do Minho, a Universidade do Porto, a Universidade de Aveiro, o CITEVE (Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal), o CTIC (Centro Tecnológico das Indústrias do Couro) e o CEIIA (Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel), respetivamente.

Fundado em 2006, a norte de Portugal, é um centro que, cada vez mais, procura alargar as suas áreas de trabalho. Neste momento estão envolvidos em variados projetos nomeadamente na área automóvel, aeronáutica, construção civil, saúde, bem-estar e desporto. Tem capacidade e experiência para trabalhar com diferentes materiais, desde o papel, a pele, o couro, a cerâmica, a madeira até aos plásticos, estando mais focados na prototipagem, desenvolvimento, análise, teste de materiais e sistemas inteligentes.

O CeNTI destaca-se cada vez mais no mundo industrial e em 2020 contou com 52 participações em projetos nacionais, 16 participações em projetos do programa H2020 R&D, com 34 contactos diretos do mercado e cerca de 40 patentes pendentes e 12 confirmadas.

Define-se com um centro tecnológico que se destaca pelo dinamismo, inovação e apoio direto aos setores industriais, com o objetivo de desenvolver e validar novas tecnologias, novos materiais e novos sistemas.

2 Estado de arte

A indústria automóvel é uma das indústrias que sofreu mais alterações ao longos dos anos devido ao aumento da exigência do consumidor provocado pela globalização do mercado, procura pelo conforto dos ocupantes, aumento da sua segurança e por sua vez redução do número de acidentes associados a erro humano, redução dos consumos do veículo e reduções das emissões para o meio ambiente [1].

A evolução nesta indústria tem sido verificada também devido à evolução tecnológica facilmente sentida ao longo dos anos. Têm vindo a ser desenvolvidos e incorporados sistemas aos veículos de modo a garantir e satisfazer as necessidades e a procura dos consumidores, referidas anteriormente.

Estes sistemas são cada vez mais utilizados e imprescindíveis para os utilizadores. A evolução tem sido tal que atualmente já se verifica a circulação de veículos totalmente autónomos, o que permite demonstrar a eficiência destes sistemas e equipamentos [1].

2.1 Sistemas ADAS

Inicialmente, para garantir a segurança dos passageiros e condutores, os veículos eram apenas equipados com sistemas de segurança passivas, como por exemplo os *air-bags*, os cintos de segurança, encostos de cabeça, a própria estrutura do veículo e por sistemas ativos, como é o caso do controlo eletrónico de estabilidade (ESC) e o sistema de travagem anti bloqueio (ABS) [1].

Focando nos pontos referidos inicialmente, os ADAS são sistemas desenvolvidos para minimizar a ocorrência de erros Humanos, permitindo uma condução mais segura. São projetados para prestarem auxílio ao condutor, fornecendo informações do ambiente envolvente ao veículo [1]. É através de formas auditivas, visuais e de vibrações, que estes sistemas detetam e classificam objetos, monitorizam a posição do veículo em relação à faixa de rodagem e determinam distâncias perante objetos e veículos em circulação. Estas informações são transmitidas ao condutor para que lhe seja possível ajustar o seu comportamento e a sua condução de modo a evitar acidentes [1].

Desde a década de 80, que os sistemas ADAS têm sido implementados, tendo sofrido uma evolução considerável entre os anos 2000 e 2010 [1].

A este sistema estão associados 4 tipos de tecnologias distintas, as câmaras, o radar, o ultrassom e o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) [2], como é possível identificar na figura 1.

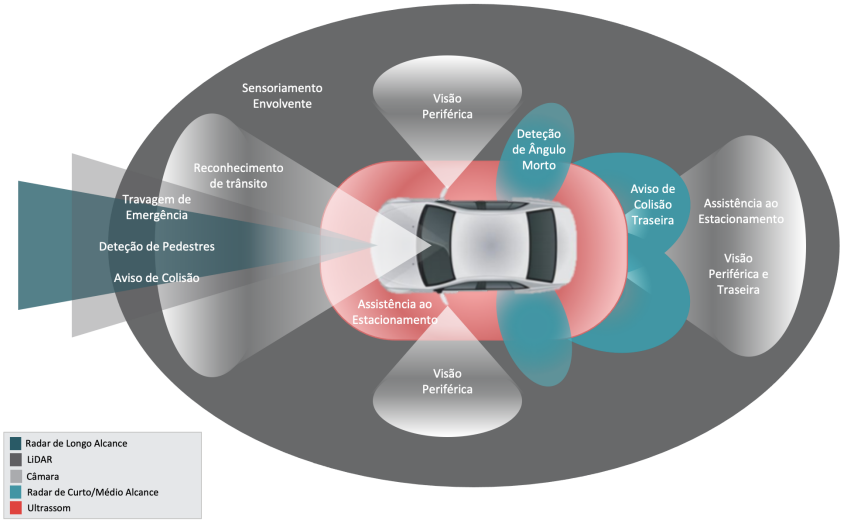


Figura 1: Tipos de ADAS - Adaptado de [2].

2.1.1 Câmaras

Existem três tipos de câmaras, classificadas quanto ao seu posicionamento, as câmaras dianteiras, que são responsáveis pelo reconhecimento dos sinais de trânsito e pelo aviso de afastamento da faixa de rodagem, as traseiras e laterais, que são responsáveis pela assistência ao estacionamento e pela visão traseira e lateral, respetivamente [2].

Este tipo de equipamentos permitem detetar obstáculos, identificando cores e limites. No entanto, apesar de conseguir classificar os objetos identificados, não deteta objetos escondidos atrás de outros obstáculos, como carros ou árvores. Uma outra desvantagem destes sistemas é a fraca eficácia quando a luz solar incide diretamente sobre os equipamentos de deteção ou mesmo em situações de baixa luminosidade, como é o caso de situações noturnas [1].

2.1.2 Radar

O radar é um dispositivo que permite localizar os objetos distantes através de ondas refletidas pelos mesmos. Os radares emitem ondas rádio com o objetivo de detetar objetos, estimando a distância a que estes se encontram, bem como o local. Calculam, também, a velocidade dos restantes veículos e objetos existentes na via [1].

Existem dois tipos de radares, os de curto alcance, SRR (*Short Range Radar*) e os de longo alcance, LRR (*Long Range Radar*). Os de curto alcance têm apenas uma

capacidade de funcionamento até 20 metros, sem capacidade de detetar ângulos [1], permitem a funcionalidade do aviso de colisão, quando, por exemplo, se efetua marcha atrás, assistência ao efetuar mudança de faixa, assistência ao estacionamento, monitorizar o ângulo morto e detetar pedestres e ciclistas [2]. Os de longo alcance, com um alcance de aproximadamente 150 metros, com uma resolução angular de dois graus [2], possibilitam as funcionalidades de *cruise control* adaptativo (controla a velocidade do veículo de acordo com a velocidade do veículo da frente, garantindo uma distância constante entre ambos), permite a travagem de emergência, quando, por exemplo, o carro da frente trava ou aparece um obstáculo inesperado e permite a condução automática nas autoestradas [2]. Na figura 2 é possível observar a disposição de cada um dos radares referidos num veículo ligeiro.

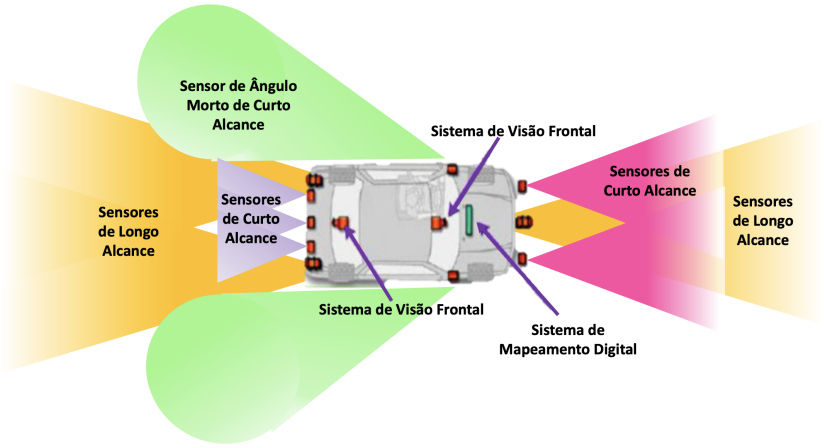


Figura 2: Radar - Adaptado de [1].

A utilização destes é eficaz tanto de dia como de noite e conseguem detetar objetos escondidos, no entanto não os consegue diferenciar em termos de cor [1], contrariamente ao que acontece com as câmaras. O sistema Radar é normalmente montado na parte detrás do pára-choques [2].

2.1.3 Sensores Sónicos

Os sensores ultrassónicos são comparados com o ouvido humano, apesar de serem utilizados para determinar a distância de um objeto que esteja próximo do próprio veículo, através do envio de ondas sonoras de elevada frequência (acima dos 20 kHz, inaudível pelo ouvido humano) [1], [2]. Estão associados aos sistemas de apoio ao

estacionamento e sistema automático de estacionamento (Figura 3) .

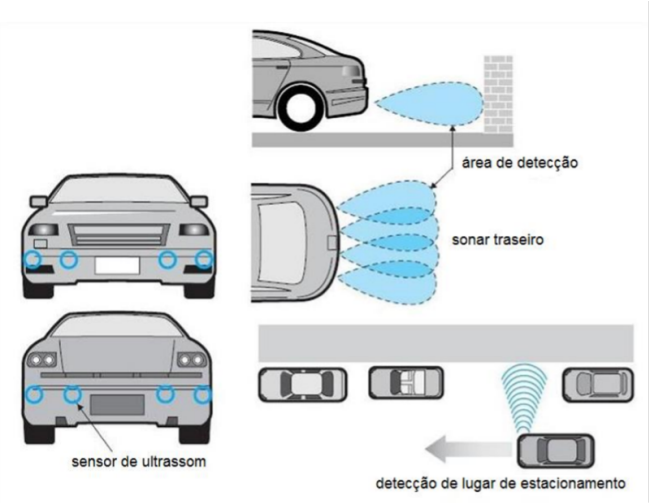


Figura 3: Sistemas de Ultrassom [1].

2.1.4 LiDAR

O LiDAR é um sensor externo, montado no teto do veículo, que atua através de um movimento giratório, usando raios *laser* para gerar coordenadas dos lugares onde são refletidos, isto é, o meio envolvente é projetado com recurso a ondas eletromagnéticas [1]. Estas são refletidas pelos objetos, permitindo assim o cálculo das distâncias dos objetos e permite distinguir pessoas de objetos [1].

Este sistema é o único capaz de medir ângulos precisos, tanto na direção vertical, como na horizontal, permitindo gerar mapas 3D de elevada resolução do meio envolvente [1].

Este equipamento, como os restantes apresenta limitações devido às propriedades físicas da luz, dado que existem objetos que refletem melhor a luz do que outros. Em condições meteorológicas adversas os lasers poderão apresentar dificuldade em definir objetos [1].

Todos estes sistemas de perceção permitem, como já foi referido, que características do meio envolvente possam ser classificadas de modo a obter informações em tempo real.

Todos os dados gerados por cada sensor têm de ser interpretados com precisão para que seja tomada a decisão e o melhor comportamento, de acordo com o meio ambiente. Apesar da elevada eficácia e fiabilidade dos mesmos, estes podem estar suscetíveis a

incertezas, que estão normalmente associadas aos erros provenientes dos aparelhos eletrónicos e dos parâmetros de calibração, às interferências devido às condições atmosféricas, que muitas vezes obstruem os sensores direta ou indiretamente, como por exemplo, quando ocorre a formação de gelo nas suas superfícies e o próprio ambiente exterior. Tal afeta diretamente a qualidade e precisão das informações recolhidas, a reflexão da luz, princípio utilizado pela maioria destes equipamentos, que pode ser influenciada pela existência de sombras, tipo de material onde a luz é refletida, induzindo a possibilidade de falha de recolha da informação [1].

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento dos estudos na redução da influência atmosférica neste tipo de sistemas. A maioria deles e das estratégias utilizadas estão relacionados com a área aeronáutica, que mais tarde foram sendo transferidas e aplicadas na área de produção de energia elétrica através de aerogeradores, sendo o foco essencial destes estudos a formação de gelo em superfícies críticas para o funcionamento correto e seguro de um dado equipamento e a possibilidade de evitar ou minimizar essa formação através de sistemas ativos e passivos.

Para aplicação de cada um destes sistemas é fulcral o conhecimento das propriedades mecânicas do gelo, do seu processo e mecanismos de formação de gelo, dos vários tipos de gelo que se podem formar e em que condições surgem.

2.2 Processo de formação de gelo

2.2.1 Formação de gelo

Relativamente ao processo de formação do gelo, é importante referir que o mesmo está diretamente dependente da humidade relativa do ar, temperatura da superfície, velocidade e direção do vento [3], [4].

De uma maneira geral as gotículas subarrefecidas (gotas de água que não congelam a temperatura abaixo do 0 ^{o}C devido a uma falha no processo de nucleação [5]) congelam mais rápido quando a temperatura de superfície é menor e a humidade relativa apresenta um valor maior. Relativamente ao tamanho das mesmas, estas apresentam um tamanho menor quando tanto a temperatura da superfície como a humidade relativa apresentam valores menores [4].

O processo de formação do gelo decorre sob três estágios essenciais: nucleação, crescimento e saturação.

Na figura 4 é possível observar algumas características dos cristais de gelo em função da temperatura e da sobressaturação do ar para uma pressão de 1 atm.

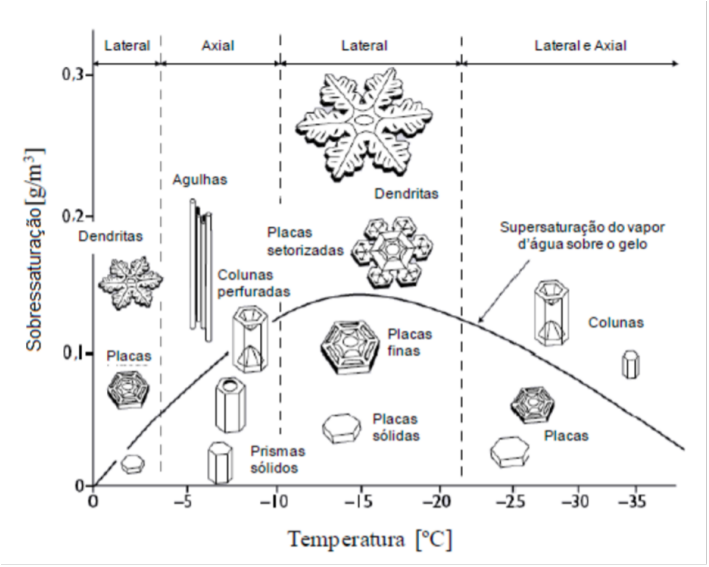


Figura 4: Características dos cristais de gelo em função da temperatura [4].

Nucleação

É neste estágio que ocorre a acumulação de substâncias na superfície, ocorre inicialmente a condensação do vapor de água contido no ar, até serem atingidas as condições de temperatura e humidade admissíveis. No entanto, relativamente a este estágio a literatura refere que esta etapa de formação depende de várias variáveis, fazendo-a ser individual para cada tipo de aplicação [4], [6].

Crescimento

Esta etapa é caracterizada pela fase onde podem surgir alguns problemas que possam prejudicar a eficiência de quaisquer sistemas e equipamentos, bem como da sua integridade, onde o gelo impeça o seu funcionamento e melhor aproveitamento, como é o caso das superfícies dos radares ou outros equipamentos de auxílio à condução.

Nesta etapa ocorre a adesão de partículas novas de forma crescente até ao ponto em que a quantidade de energia requerida para manter o adequado crescimento supere a energia que será necessária para um novo processo de nucleação e posteriormente saturação do gelo [6]. Ou seja, esta etapa acontece quando os cristais de gelo desenvolvidos atingem um raio crítico, sendo impedido de continuar o seu crescimento, fazendo com que novos cristais de gelo se depositam sobre os anteriores formados e desenvolvidos [4].

Saturação

Nesta fase ocorrem várias nucleações sobre a superfície e espaços livres, originando assim, o aumento da camada de gelo e consequentemente o aumento da densidade [4].

Na figura 5 é possível observar um esquema da evolução da formação do gelo ao longo do tempo sobre uma superfície plana [6].

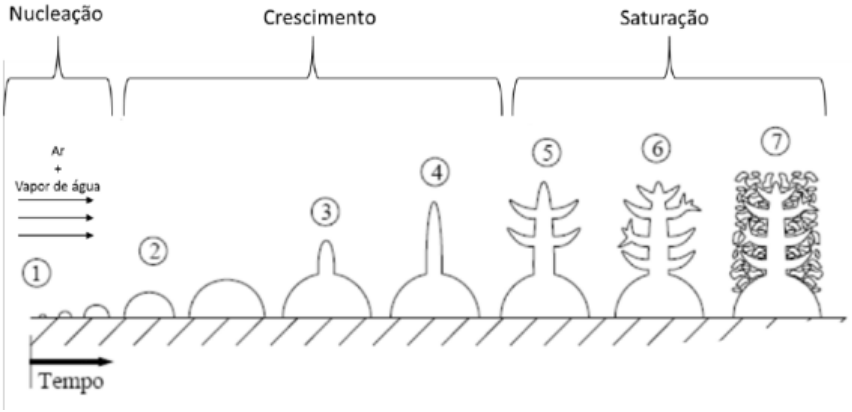


Figura 5: Evolução da formação do gelo ao longo do tempo - Adaptado de [6].

2.2.2 Mecanismos de formação do gelo

O gelo é caracterizado como uma matriz constituída por várias ramificações dos cristais de gelo intercaladas por ar húmido. Apresenta frequentemente uma elevada porosidade e a sua alteração ao longo das camadas dificulta a determinação da sua espessura.

É difícil caracterizar a camada de gelo dado que o processo de formação do mesmo se encontra em constante mudança e formação, bem como se verifica sempre uma oscilação da temperatura na interface ar - gelo, tanto no tempo como no espaço [6].

Existem dois tipos de formação de gelo, o gelo (*glaze*) e a geada (*rime*). O gelo poderá ter origem no processo vapor-líquido-sólido, o que resulta na solidificação da água pura [4]. A geada consiste na sublimação inversa do vapor de água, que se encontra a uma pressão de saturação da água inferior ao ponto triplo da mesma [6]. O ponto triplo corresponde a um estado da água, onde numa relação temperatura-pressão, coexistem, em equilíbrio três fases de agregação de uma substância [6].

Na figura 6 é possível analisar o diagrama de fase da água.

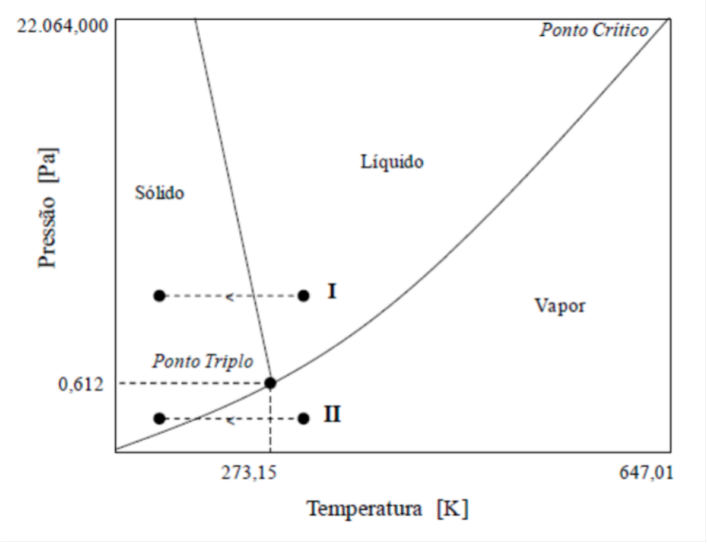


Figura 6: Diagrama de fase da água [4].

Fisicamente e estruturalmente, a geada e o gelo são diferentes devido aos diferentes processos de formação e condições de formação associadas. O gelo tem uma estrutura homogénea mais resistente que a geada. Já esta, apresenta elevada porosidade devido à existência de cristais de gelo irregulares envoltos em ar [6].

Comparando estes dois processos de formação de gelo, através dos respetivos valores de massa volumíca (ρ) e condutividade térmica (k), é possível afirmar que o gelo apresenta valores superiores, sendo a sua condutividade de 2.1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ e a massa volumíca de 917 $kg \cdot m^{-3}$ e a geada apresenta valores condutividade que rondam os 0.2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ e de densidade próximos de 211 $Kg \cdot m^{-3}$ [6].

Considerando agora, as temperaturas associadas a cada um destes tipos, o gelo ocorre em temperaturas entre 0 ^oC e os -4 ^oC e em condições atmosféricas de elevado LWC (*Liquid Water Content*) e origina acumulações mais densas [7]. Alguns estudos recomendam realizar simulações destas condições com temperaturas ligeiramente abaixo das referidas anteriormente, como por exemplo -5 ^oC [7]. É expectável que o gelo seja mais difícil de ser removido que a geada devido às suas propriedades físicas, como por exemplo a maior força de adesão entre as partículas e a pressão a que possam estar sujeitas [7].

A geada acontece também, a temperaturas baixas e baixo/moderado valor de LWC e pequeno MVD (*Medium Volume Diameter*). Congelam antes do contacto com o substrato e acumulam-se em camadas misturadas com bolsas de ar. Tradicionalmente, forma-se em superfícies que se encontrem entre as temperaturas de -4 ^oC e -12 ^oC.

Tal como acontece com o gelo, a nível de simulação é recomendado a simulação em temperaturas mais baixas, normalmente de -15 ^oC [7].

Comparando os tamanhos de gota que podem estar associados aos dois tipos de agregações, a literatura define que fenómenos de gelo estão associados a um tamanho de gota superior, enquanto que a geada está associada a tamanhos mais pequenos de gota [5].

2.2.3 Tipos de formação de gelo

A acumulação de gelo ocorre tipicamente em superfícies expostas a condições atmosféricas onde exista conteúdo de água líquida e temperaturas próximas de congelamento ou elevadas taxas de arrefecimento por convecção, como é o caso de climas frios e húmidos com vento, ou climas onde a formação de geada, neve e/ou chuva seja possível.

As agregações de gelo têm diferentes tamanhos, propriedades e formas dependendo do LWC, MVD, a temperatura ambiente, a humidade relativa, a pressão, temperatura da superfície de formação, presença ou não de um fluido de degelo, a velocidade e a direção do vento [3], [5].

O LWC representa um valor importante na determinação da quantidade de água necessária para a formação de gelo, sendo que quanto maior for o valor de LWC, maior será o impacto de gotas de água nas superfícies [8]. Na tabela 1 é apresentado a gama de valores de LWC associada ao tipo/grau de condições atmosférica.

Tabela 1: Mecanismos de transferência de calor [8].

Quantidade de gelo	**LWC** $(g \cdot m^{-3})$
Vestígios	$< 0,1$
Leve	$0,11 - 0,6$
Moderado	$0,61 - 1,2$
Severo	$> 1,2$

Considerando agora o parâmetro MVD, isto é, o tamanho de gota, gotas superarrafecidas de tamanho menor (*Supercooled small droplets* (SSD)) apresentam um valor de MVD entre os 10 μm e os 50 μm [8]. Este tamanho de gota implica uma menor massa das mesmas, o que leva a uma menor probabilidade de existir impacto destas gotas com as superfícies, dado que as mesmas seguirão o fluxo de ar facilmente. No entanto, gotas

superarrefecidas de maior tamanho (*Supercooled Large droplets* (SLD)) apresentam um valor de MVD superior a 50 μm [8].

Na figura 7 é possível ver uma comparação entre os diferentes tamanhos de gota, nomeadamente entre o SSD e o SLD. O tamanho inicial de gota de 40 μm, representa um dos valores mais elevados de gotas SSD e o valor de 200 μm representa um valor médio do tamanho de gota SLD, que podem chegar até aos 400 μm [8].

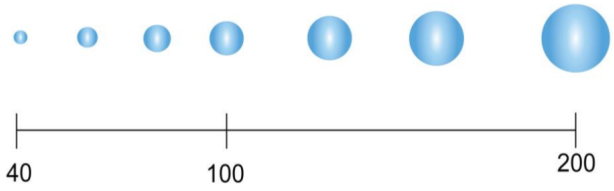


Figura 7: Tamanho de gota relativo em μm [8].

Na formação e acumulação de gelo em sistemas e ou equipamentos é fulcral conhecer as forças de adesão entre o gelo e/ou geada com a superfície de formação, e segundo os estudos já realizados, esta força de adesão apresenta um comportamento linear com a temperatura, sendo que a força aumenta cerca de 5976 $kg \cdot m^{-2}$ por cada grau celsius de temperatura diminuído [5].

Deste modo, segundo a literatura existem três origens de formação de gelo atmosférico, *in – cloud*, precipitação e geada [9].

O denominado *in-cloud* acontece quando as gotas de água superarrefecidas, encontram uma superfície abaixo dos 0 ^oC, normalmente com temperaturas ambientes entre -20 ^oC a -35 ^oC, congelam devido ao impacto. Mesmo que a temperatura da água esteja abaixo de -30 ^oC, as gotas não congelam no ar dado ao seu tamanho.

Nestas condições de formação e considerando a temperatura e o tamanho de gota, podem ser definidos dois tipos de gelo (*soft rime*, *hard rime* e gelo), desde as temperaturas mais frias às mais quentes:

- **Geada suave (*soft rime*):** é formado quando gotas de água superarrefecidas colidem com superfícies e a energia térmica libertada é facilmente eliminada por radiação ou pelo vento, até que nenhum líquido exista na superfície [10]. Este gelo é fino e tem uma forma próxima a agulhas e flocos. Nestas condições o MVD, o LWC e a densidade são baixos [10]. Esta agregação de gelo resulta numa baixa densidade e fraca adesão às superfícies [9].

- **Geada grosseira (*hard rime*):** formado a partir de gotas de tamanho médio com valores de MVD e LWC mais elevados do que o anterior e por isso causam agregações de gelo de densidade mais elevada tornando-se mais difícil a sua remoção devido à melhor ligação e pequenos espaços de ar entre as gotas de água congeladas [9]. O tamanho de gota é de tamanho médio [10].

- ***Glaze*:** forma-se quando a energia térmica libertada durante o impacto da gota na superfície não é removida rapidamente pela radiação solar ou pelo vento, como acontece com o *soft rime* [10], ficando algumas gotas de água à superfície, que posteriormente, acabam por congelar. A densidade dessa agregação de gelo e a sua adesão é bastante elevada [9].

O gelo que se forma devido à precipitação, comumente chamado neve, forma-se antes destas partículas entrarem em contacto com qualquer superfície [10], sendo a percentagem de agregação possível de se formar ser bastante superior que o meio de formação anterior, o que pode causar menos danos aos equipamentos. Estes podem ser definidos como:

- ***Freezing Rain/Glaze***: acontece sempre quando a chuva que cai encontra uma superfície cuja temperatura é muito superior a 0 ^oC. A densidade do gelo e a sua adesão é elevada [9].

- **Gelo Molhado:** consegue acumular-se na superfície quando a mesma está a uma temperatura entre 0 ^oC e 3 ^oC (condição que garante que exista água no estado líquido na neve, permitindo que os cristais de neve se agreguem). Numa fase inicial esta força de agregação é baixa. No entanto, à medida que a temperatura desce abaixo dos 0 ^oC, a agregação torna-se cada vez mais elevada [9]. Deste modo, o gelo é facilmente removível numa fase inicial, mas se congelar numa superfície a sua remoção torna-se mais complicada.

Quando se fala na situação de *frost*, este acontece quando o vapor de água solidifica diretamente numa superfície fria. Normalmente está associada a uma velocidade de vento baixa. Este tipo gera uma adesão do gelo muito forte [9].

2.3 Sistemas de mitigação de gelo em superfícies críticas para o funcionamento de equipamentos (ADIS)

Os sistemas de mitigação de gelo baseiam-se em duas estratégias essenciais, no anti-gelo, que passa por prevenir a formação e agregação de gelo numa dada superfície e o degelo, que consiste em remover a(s) camada(s) de gelo formada(s) numa superfície [9]. Estas duas estratégias, como já foi referido, podem ser divididas em dois métodos, os métodos passivos e ativos.

Os métodos passivos previnem a acumulação de gelo numa superfície sem qualquer recurso a uma fonte energética, tirando assim partido das propriedades físicas dos materiais do objeto/superfície [9].

Os métodos ativos necessitam de uma fonte externa de energia para que possam evitar a acumulação de gelo em superfícies. Esta fonte energética normalmente é térmica. No entanto poderá ser química ou pneumática [9]. É importante, em simultâneo com estes sistemas, a utilização de uma estratégia de controlo. Existem diversas estratégias já estudadas, como por exemplo:

- Ligar ou desligar o equipamento, onde se forma a camada de gelo, após observação visual da formação de gelo numa dada superfície do mesmo (estratégia aplicável em ambientes onde é rara a formação de camadas de gelo) [9];

- Manter o sistema de anti-gelo ativo, no entanto isto poderá implicar um aumento excessivo do consumo energético pelo sistema [9];

- Utilizar sistemas de deteção de gelo, que permitirá ativar o ADIS quando é detetado gelo [9].

Estas estratégias devem estar associadas a uma rapidez de deteção elevada para evitar perdas energéticas [9]. É importante também referir que os sistemas de anti-gelo estão associados, normalmente, a um consumo energético superior, uma vez que, frequentemente é feito um aquecimento contínuo da superfície. Enquanto que para os sistemas de degelo, a energia necessária para remover o gelo já formado, através do aquecimento rápido, excede, em muito, a energia utilizada em sistemas de anti-gelo [9].

2.3.1 Sistemas passivos

Revestimento da superfície

Neste método são utilizados revestimentos à base de materiais anti-gelo para impedir que o gelo consiga aderir à superfície em questão.

Fisicamente a explicação reside no ângulo de contacto, que é a medida da capacidade de um líquido molhar a superfície de um sólido, que depende da tensão superficial do fluido e da natureza da superfície [11]. Se este for entre 0^o e 90^o, a superfície é molhável, isto é, hidrofílica, entre 90^o e 180^o significa que a superfície não é molhável, isto é, hidrofóbica, se for acima de 180^o é uma superfície ultra-hidrofóbica [11]. Estes materiais têm propriedades antiaderentes [11].

Os revestimentos *super-hydrophobic* (ultra-hidrofóbicos) impedem que a água permaneça na superfície devido às suas características repulsivas. Neste tipo de sistemas é recomendado a utilização simultânea de sistemas ativos [9].

Atualmente, a maioria dos estudos realizados apontam para uma maior aposta em materiais como compósitos de uma matriz à base de epóxi ou poliéster reforçado com fibras de vidro ou carbono. Estes últimos são os mais utilizados devido ao menor custo associado [12]. Existem estudos a serem realizados que defendem a utilização de revestimentos por nanocompósitos, polímeros reforçados por partículas à escala manométrica, que criam ângulos de contacto muito elevados com a água [12].

Na generalidade, estes revestimentos apresentam um custo reduzido, não necessitam de cuidados especiais em relação à incidência de luz solar e são de baixa manutenção. No entanto, a maioria dos estudos realizados com este tipo de materiais não verificaram a eficácia total das suas propriedades de anti-gelo e muitas vezes tornam-se revestimentos porosos num período de tempo relativamente curto após a sua aplicação, o que irá impedir a capacidade de repelir o gelo esperado [9].

Químicos - fluidos anticongelantes

Os químicos utilizados são compostos químicos que são adicionados a líquidos para que se verifique uma redução do ponto de fusão, possibilitando que o fluido final colocado sobre uma superfície congele a uma temperatura mais baixa [9].

Geralmente estes fluidos são constituídos por etilenoglicol ou propilenoglicol, alguns espessantes e inibidores de corrosão. É mais comum a utilização de fluidos com

propilenoglicol dado que é menos tóxico quando comparado com o etilenoglicol [9].

A título de curiosidade, na área aeronáutica, segundo a *Society of Automative Engineers International* (SAE) existem 4 tipos distintos de fluidos de degelo na aviação:

- **Tipo I**

  Estes fluidos apresentam baixa viscosidade. Fornecem uma proteção de curto prazo devido à sua fluidez sobre as superfícies após o uso. São pulverizados a quente (55 ^oC - 88 ^oC), a alta pressão para ser possível remover gelo e/ou neve [9].

- **Tipo II**

  Estes contêm mais agentes espessantes, poliméricos, para evitar a fluidez imediata sobre a superfície aplicada [9]. Este fluido consegue evitar a formação de gelo na superfície por um período de tempo superior ao anterior [9].

- **Tipo III**

  Definidos como um tipo intermédio entre o tipo I e o II, são normalmente aplicados em aviões que não atinjam velocidades muito elevadas [9].

- **Tipo IV**

  Apresenta a mesma finalidade do fluido tipo II, no entanto atuam por um periodo de tempo superior [9].

Estes fluidos de degelo que contém espessantes, isto é, os fluidos tipo II, III e IV também podem ser nomeados como fluidos anticongelantes, dado que a sua utilização é preferencialmente para evitar a formação de gelo após um degelo [9].

No global, apesar da certeza da sua eficiência devido ao seu uso na área aeronáutica, onde a formação de gelo é extremamente crítica ao funcionamento e segurança dos aviões, estes químicos são poluentes e necessitam de cuidados no momento de aplicação e bastante manutenção, dado que são incapazes de permanecer numa superfície por muito tempo [9]. Na figura 8 é possível verificar o efeito da aplicação destes fluidos químicos.

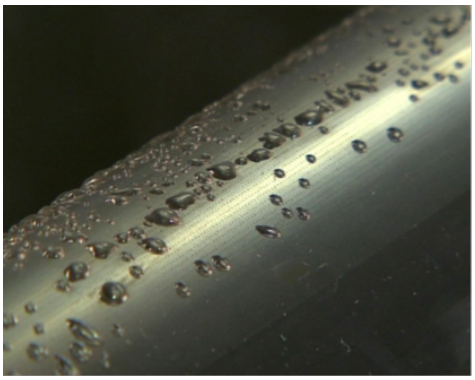


Figura 8: Asa de um avião com aplicação de um fluido químico à base de glicol [5].

Pintura preta

Este tipo de pintura permite o aquecimento das superfícies do equipamento aquando da incidência de luz solar sobre a mesma. É utilizado, normalmente com um revestimento de materiais com propriedades de anti-gelo.

Este sistema parece ser suficiente em locais onde não é tão provável a formação de gelo ou em locais onde a formação de gelo é acompanhada de grandes períodos de grande incidência de radiação solar. É importante salientar que este tipo de pintura não permite o sobreaquecimento das superfícies, onde é aplicada, nomeadamente no Verão, onde podem ser atingidas temperaturas mais elevadas. No entanto, em ambientes com condições climatéricas mais severas, a sua utilização revela ser pouco eficaz [9].

Combustíveis térmicos

Este método consiste na utilização de uma película fina transparente feita de um combustível solar térmico. Este material utiliza moléculas com capacidade de absorção de luz para capturar e armazenar energia solar ao nível molecular e, quando acionado, liberta essa energia armazenada sob a forma de calor [12]. Estes combustíveis, em princípio, terão a capacidade de ser recarregados dezenas de milhares de vezes, quando em contacto com a luz solar e a libertação de energia poderá ser acionada de forma ativa - termicamente, oticamente ou com recurso a um catalisador - ou de forma passiva ajustando o tempo de vida do armazenamento [12]. O material poderá ser líquido ou em filme [12].

Este filme seria colocado no vidro dianteiro do veículo e iria armazenar a energia

solar que mais tarde seria utilizada para fazer o degelo do vidro. Neste processo de degelo é formada uma camada de água na interface gelo-vidro [12].

Uma das vantagens deste sistema é a rapidez de degelo que garante, sem desperdício de calor. A título de exemplo, num estudo realizado, foi comprovado que para a utilização de um filme com uma espessura de 24 a 120 μm, o tempo de degelo associado seria de 2 segundos a 30 minutos, dependendo da posição do filme e da espessura [12]. Na figura 9 é possível observar uma relação entre o tempo de degelo, a espessura do filme e espessura do vidro. Estes combustíveis térmicos não são materiais recentes. Contudo o seu uso é feito de forma cautelosa dado à sua resistência, uma vez que são pouco resistentes e têm uma vida útil reduzida [12]. Este método é dos poucos sistemas passivos de degelo em estudo na área automóvel.

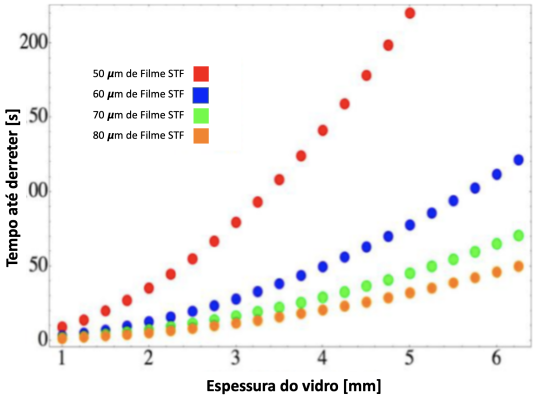


Figura 9: Relação espessura do vidro com o tempo necessário para que uma dada espessura de filme derreta o gelo à sua superfície - Adaptado de [12].

Superfícies especiais (flexíveis)

Quando existe a possibilidade de ter uma superfície com flexibilidade de movimento, muitas vezes esse movimento é suficiente para quebrar o gelo formado sobre a mesma superfície [9]. No entanto, ainda existem poucos estudos sobre a possibilidade e eficácia deste método de degelo.

Este método ainda não foi validado cientificamente e poderá provocar danos no equipamento [9].

2.3.2 Sistemas ativos

Sistemas eletricamente aquecidos

Neste tipo de sistemas podem ser utilizadas resistências para aquecimento para prevenir a formação de gelo à superfície dos equipamentos.

A utilização de resistências elétricas colocadas em contacto com a superfície, tem como principal objetivo a criação de uma película de água entre o gelo e a superfície [9].

Neste método, o elemento de aquecimento, como por exemplo à base de grafite, pode ser rapidamente aquecido ou arrefecido para que o gelo sobre essa secção não se acumule ou derreta [13]. No entanto, outros materiais têm vindo a ser estudados como elementos de aquecimento, como por exemplo nanotubos de carbono, fibras de carbono, grafeno, têxteis eletrocondutores, metais pulverizáveis, entre outros [14].

Este mecanismo já foi testado nas pás dos aerogeradores e foi utilizado juntamente com detetores de gelo e sensores de temperatura na superfície, para garantir que a mesma não sofra qualquer tipo de dano provocado pelo excesso e exposição contínua a um sistema de aquecimento .

Estudos motivam que este processo poderá estar associado a uma eficiência próxima dos 100%, dado que se verifica um aquecimento direto da superfície, baixa manutenção e não necessidade de alteração da geometria inicial do equipamento, mantendo a sua integridade física. No entanto, é um sistema que ainda se encontra em estudo e que apesar de já existir no mercado, não existe uma produção em massa do mesmo [9]. Uma outra desvantagem deste processo é o facto de em condições extremas de formação de gelo, este tipo de aquecimento poderá ser insuficiente [9].

Camada de ar

Este método aplicado à área aeronáutica consiste na geração de ar quente no interior do motor e é distribuído por tubos que passam pelas superfícies onde ocorre a formação de gelo, sendo que este ar posteriormente sai por orifícios na parte inferior das asas. Uma das vantagens deste método é a capacidade de eliminar a maioria das gotas de água no ar [9]. No entanto, este é um processo ainda pouco estudado.

Micro-ondas

Este processo consiste no aquecimento da superfície através de *microwaves* para prevenir a formação de gelo. O objetivo é manter a superfície ligeiramente abaixo do 0 ^oC, de modo a salvaguardar alguma energia que será utilizada para o descongelamento posterior [9]. É importante e recomendado revestir a superfície com um material que tenha propriedades refletoras destas ondas, normalmente materiais metálicos [9].

Ar quente

Este processo, considerando a mesma aplicação dos restantes métodos apresentados, consiste em soprar ar quente no rotor da pá do aerogerador sem movimento. Este ar quente irá permitir que a superfície se mantenha livre de gelo.

O objetivo deste método, tal como o método que utiliza resistências de aquecimento, passa por desenvolver uma película de água entre o gelo e a superfície [9].

Na área automóvel existe um sistema idêntico, muito conhecido, que consiste no degelo do pára-brisas dianteiro dos veículos, que utiliza o calor residual do motor para aquecer por convecção o mesmo [9]. Este método, afirma a literatura, que é ineficiente devido às perdas energéticas e ao tempo necessário para se concluir o processo, que pode durar cerca de 10 a 30 minutos [12].

Este processo está associado a um consumo elevado de energia e a sua eficiência energética é bastante reduzida quando comparada com outros métodos, podendo rondar os 30% [9]. Esta baixa eficiência está associada às grandes quantidades de ar que serão aquecidas e que serão necessárias para toda a superfície [9].

Flexible Pneumatic Boots

Este processo utiliza um equipamento flexível denominado *pneumatic boots* onde é insuflado ar comprimido permitindo quebrar a camada de gelo na superfície.

É uma aplicação muito estudada para os aviões e normalmente este equipamento é feito à base de borracha, tendo mais do que uma entrada de ar [9]. Este equipamento é projetado para quebrar as forças de adesão entre o gelo e a superfície, que no caso é a borracha, através da mudança de forma do mesmo. Este processo necessita de manutenção regular, o que poderá tornar este sistema caro e assim torna-se um entrave

à sua utilização [9].

Na figura 10 é possível ver um exemplo do funcionamento destes sistemas, aplicados às asas de um avião.

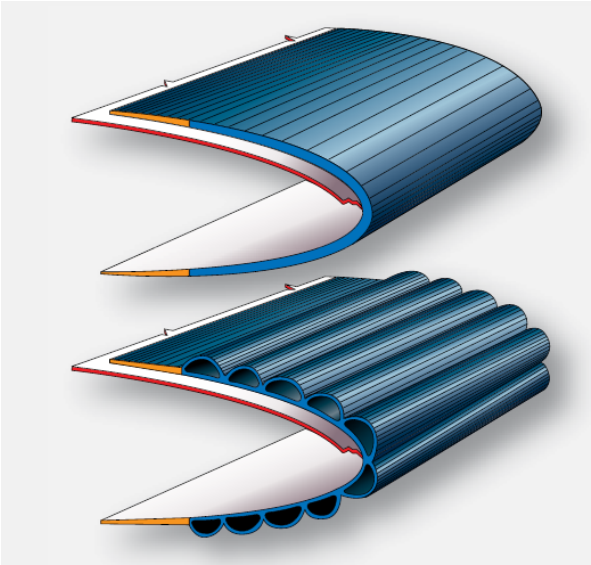


Figura 10: *Flexible Pneumatic Boots* [9].

Electro Impulsive/Repulsive

O método consiste na indução eletromagnética que permite gerar pulsos vibratórios em ciclos, que geram o movimento da superfície e quebrar o gelo nela. É utilizada uma bobina em espiral e quando a corrente é aplicada sobre esta, é gerado um campo magnético [9]. O resultado será o movimento rápido da superfície e expulsão do gelo acumulado.

Existem vários sistemas a serem estudados e serem desenvolvidos atualmente, sendo estes os métodos futuramente mais promissores [9].

A título de exemplo tem-se o *SPEED* que foi desenvolvido pela *NASA* e utiliza condutores envolvidos em materiais que estão diretamente ligados à estrutura (exemplo: asa do avião) e que quando se verifica a acumulação de gelo à superfície da mesma é enviada corrente elétrica através dos atuadores eletromagnéticos, fazendo-os vibrar, permitindo que o gelo à superfície seja removido [15].

Na figura 11 é possível observar um esquema deste sistema baseado no método *Electro Expulsive*.

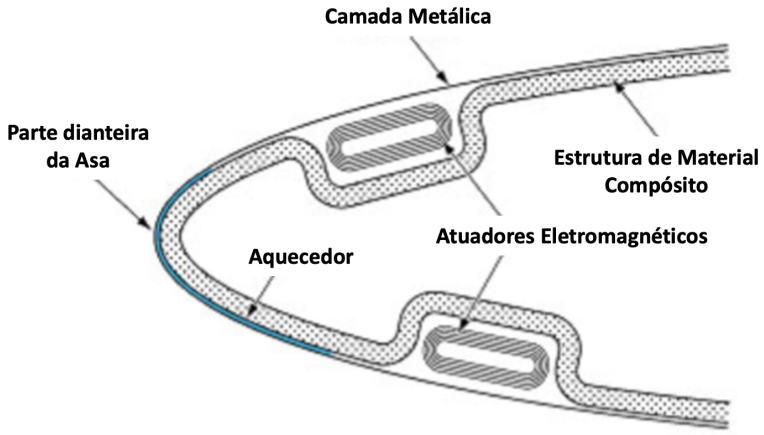


Figura 11: *Electro Expulsive De-icer* aplicado na asa de um avião - Adaptado de [15].

Algumas das vantagens destes processos são a sua eficiência, baixo impacto ambiental, baixo consumo energético e poderá ser facilmente automatizado [9]. A desvantagem associada a estes métodos é a possibilidade de haver interferências eletromagnéticas com outros sistemas, neste caso dos aviões. No caso em específico do sistema *Electro Impulsive/Expulsive* poderá estar associado à fadiga estrutural da superfície [13]. No entanto, são processos que ainda se encontram em estudo por serem uma tecnologia nova.

De modo a fazer-se um resumo dos métodos passivos e ativos de degelo e anti-gelo, são apresentadas duas tabelas (tabela 2 e 3) com os materiais que podem ser utilizados, as vantagens e as desvantagens associadas a estes métodos, respetivamente.

Tabela 2: Métodos Passivos de degelo e anti-gelo [9], [10], [12].

Nome	**Materiais**	**Vantagens**	**Desvantagens**
Revestimento de Superfície	*Ice-phobic materials* (compósitos de matriz à base de base epóxi ou poliéster reforçado com fibras de vidro/ carbono)	Baixo Custo. Baixa manutenção.	Eficácia reduzida num período longo.
Pintura Preta	Tinta preta e revestimento de um material *Ice-phobic*	Eficácia em locais de grande exposição solar sem sobreaquecimento.	Baixa eficácia em condições atmosféricas severas.
Fluidos Anticongelantes	Etilenoglicol ou Propilenoglicol	Elevada eficácia.	Poluentes. Aplicação cuidadosa. Muita manutenção.
Combustíveis Térmicos	Filme de combustível térmico.	Rapidez de degelo sem desperdício de calor.	Pouco resistentes. Vida útil reduzida.
Superfícies Especiais	-	-	Danos estruturais no equipamento

Tabela 3: Métodos ativos de degelo e anti-gelo [9], [10], [12].

Nome	Materiais	Vantagens	Desvantagens
Eletricamente Aquecidos	Elementos de aquecimento (grafite, grafeno, nanotubos de carbono, fibras de carbono e têxteis eletrocondutores)	Elevada eficiência (100%). Integridade do equipamento garantida.	Provável insuficiência energética em condições atmosféricas adversas.
Air layer	Ar	Não permite acumulação de água à superfície após o degelo.	-
Ar Quente	Ar	-	Baixa Eficácia (30%).Consumo energético elevado. Aquecimento de grandes quantidades de ar.
Microwave	Revestimentos das superfícies com materiais com propriedades refletoras destas ondas (Materiais Metálicos)	-	-
Pneumatic Boots	*Pneumatic Boots* e Ar comprimido	-	-
Electro Impulsive	Ondas eletromagnéticas.	Elevada eficiência. Baixo impacto ambiental. Baixo consumo energético.	Interferência eletromagnética. Fadiga estrutural da superfície.

É importante referir que as categorias onde não é indicada qualquer informação acontece porque muitos destes métodos ainda se encontram sob estudo.

Após a análise detalhada de cada um destes processos e sabendo que os estudos cada vez mais incidem sobre a pesquisa e aplicação de métodos ativos de degelo e anti-gelo, destacam-se os sistemas *electro impulsive/repulsive* pelo aumento do estudo nesta área e pelas vantagens associadas. No entanto, os sistemas eletricamente aquecidos também se destacam pelo aumento das pesquisas associadas aos diferentes materiais que podem ser utilizados, as diferentes tecnologias que podem ser utilizadas para gerar este aquecimento, bem como das vantagens já estudadas e apresentadas anteriormente.

Considerando a possibilidade de aplicação na área automóvel destes sistemas, os sistemas eletricamente aquecidos são os mais próximos desta realidade, a sua elevada eficiência e a simplicidade tanto construtiva como de aplicação fazem deste método o mais promissor nesta área.

2.3.3 Outros métodos - sistemas eletricamente aquecidos

Considerando apenas o método ativo que utiliza sistemas eletricamente aquecidos, muitos são os estudos associados a este, desde a variação das tecnologias utilizadas para o aquecimento das superfícies, até à escolha dos materiais, muitos estudos têm sido realizados nos últimos anos.

2.3.3.1 Efeito Joule e revestimento de compósitos de Epóxi/GNP (*Graphene Nanoplalets*)

Um método, que tem sido alvo de estudo, tem como base o efeito de Joule e a utilização de materiais que auto aquecem.

O princípio por detrás deste efeito consiste na aplicação de corrente elétrica num sólido com condutividade infinita. A energia elétrica é convertida em calor, devido à transferência de energia dos eletrões conduzidos para os átomos do material condutor por meio de colisões [16]. O calor gerado, neste caso, é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade de corrente aplicada, à resistência do material condutor e do tempo [16].

No estudo descrito, foram utilizadas amostras revestidas por epóxi com GNP. A epóxi apresenta boas características protetoras de substrato, excelente capacidade de adesão e elevada resistência ao calor. As nanopartículas de GNP permitem melhorar a

condutividade, dependendo da quantidade utilizada, sendo que quanto maior a percentagem, maior a possibilidade de aumentar as propriedades condutoras do material. No entanto, é importante referir que a condutividade deste material compósito Epóxi/GNP apresenta valores de condutividade relativamente baixos, tal como 10^{-3} S $\cdot m^{-1}$ [16]. É importante garantir que ambos os materiais devem ser bons condutores de modo a garantir um aquecimento homogéneo [16].

Foram utilizadas grandes quantidades de GNP, de modo a garantir uma ótima condutividade elétrica. Verificou-se que quanto maior era a quantidade de GNP, maior a condutividade elétrica. No entanto, o aumento desta poderia ser também influenciado pelo aumento da corrente aplicada.

Foram realizados testes para uma situação de degelo e de anti-gelo. Relativamente ao degelo (Figura 12 a) e 12 b)) foi utilizada uma amostra controlo, onde inicialmente ocorre um aquecimento dos -10 ^oC até aos 0 ^oC. Depois é percetível que a temperatura se mantém constante devido à mudança de fase (sólido-líquido) e, posteriormente a esta transição, verifica-se um aumento de temperatura.

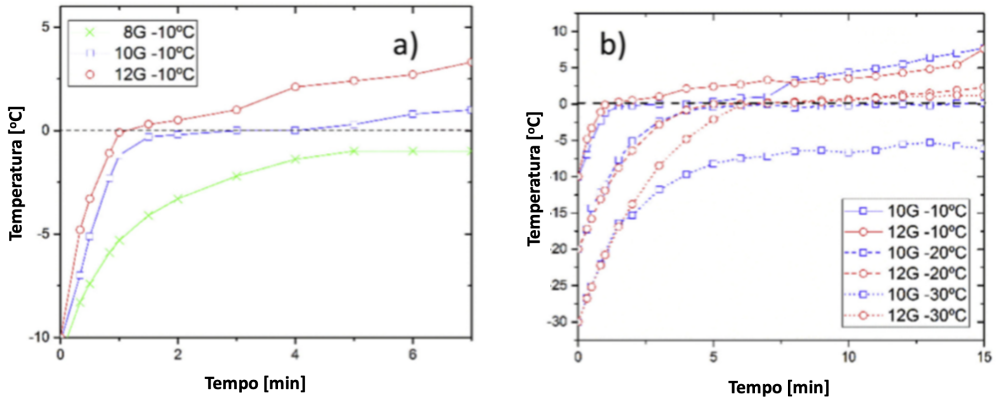


Figura 12: Influência da quantidade de de GNP na condutividade elétrica, por análise da temperatura e do tempo necessário - Adaptado de [16].

Com a aplicação de tensão nas restantes amostras, o calor induzido nas amostras por efeito Joule, permitiram um comportamento idêntico, mas com uma redução do tempo na transição de fase (sólido-líquido), o que permite concluir que este revestimento permite minimizar o tempo necessário para o degelo [16]. Sem o revestimento, o degelo demoraria cerca de 13 minutos e com revestimento este reduz para menos de 5 minutos [16].

Quanto aos testes em situação de anti-gelo, por aplicação da mesma tensão (750-

880 V), a eficiência deste é idêntica para qualquer percentagem de GNP utilizada, ao contrário do que acontecia nos testes de degelo [16].

De uma forma geral, em sistemas de degelo, a temperaturas muito reduzidas é recomendado a utilização de maiores quantidades de GNP, enquanto que em sistemas de anti-gelo, diferentes concentrações podem permitir o mesmo efeito, sendo recomendada a utilização de menores quantidades, para redução de custos [16].

Pode-se constatar que, a utilização destes materiais permite melhorar o tempo de resposta destes sistemas ativos, apresentando consumos elétricos e potências reduzidos (1-3 W), são "amigos do ambiente" e no geral é um processo com uma aplicação relativamente fácil [16]. No entanto, tem a desvantagem de ser necessária a utilização de tensões relativamente elevadas (750-800 W) [16].

2.3.3.2 Efeito Joule, revestimento de compósitos de Epóxi/GNPs/CNTs (*Carbon Nanotubes*) e impressão 3D

Tendo em conta a utilização destes materiais, mais estudos foram realizados para averiguar a influência de alguns parâmetros, como por exemplo tensão aplicada, utilização de outros componentes (materiais híbridos) e a influência das suas percentagens e o método de aplicação dos mesmos.

Muitos métodos, considerando o efeito Joule podem ser implementados, tanto a utilização de arames metálicos em estruturas *sandwich*, permitindo a melhoria da distribuição de temperaturas através desses arames por toda a superfície, como utilização de revestimentos baseados em materiais compósitos com nanopartículas condutoras, como CNTs ou GNPs [17], que permitem aquecimento eficiente com consumo de potência reduzido [17].

Não só a nível de materiais, estes novos métodos têm vindo a ser estudados, mas também a maneira de os produzir. Nos últimos anos, tem-se vindo a estudar os métodos mais baratos e mais promissores a nível de produção.

A impressão 3D tem vindo a ser estudada como uma boa alternativa, dadas as suas vantagens a nível de produção rápida em pequena escala, custo reduzido, possibilidade de redução de erro e maior possibilidade de testagem do funcionamento e eficácia do processo [17].

Neste estudo foram analisados vários parâmetros, a influência da percentagem e combinação de vários materiais condutores (CNTs e GNPs) numa matriz de epóxi, a geometria do circuito impresso e a quantidade de material compósito condutor deposi-

tado sobre o circuito impresso [17]. Verificou-se que o fator com mais influência sobre a variação de temperatura é a percentagem de material condutor utilizado (à luz do que tinha sido concluído no estudo anteriormente descrito), sendo que o aumento da quantidade de CNT aumenta a condutividade elétrica do circuito, aumentando o aquecimento do sistema. O segundo fator de maior influência é a geometria do circuito impresso. Foram testados dois tipos de circuitos, como é possível observar na figura 13, sendo que o que garantiu melhores resultados foi a geometria b), dado que a quantidade de material colocado no circuito impresso é superior nos pontos de convergência do circuito. O último fator de influência é a utilização de materiais híbridos, onde se realizou uma mistura de GNP com CNT, sendo que se for adicionado ao CNT uma quantidade elevada de GNP, o novo condutor elétrico (híbrido) apresenta um melhor comportamento a nível de transferência de calor [17]. Foi então definido, que as melhores condições de estudo deste método, como um sistema de degelo e anti-gelo, fosse a aplicação de uma tensão de 1000V, com um circuito igual ao apresentado na figura 13 b), com a utilização de percentagens de CNT elevadas [17].

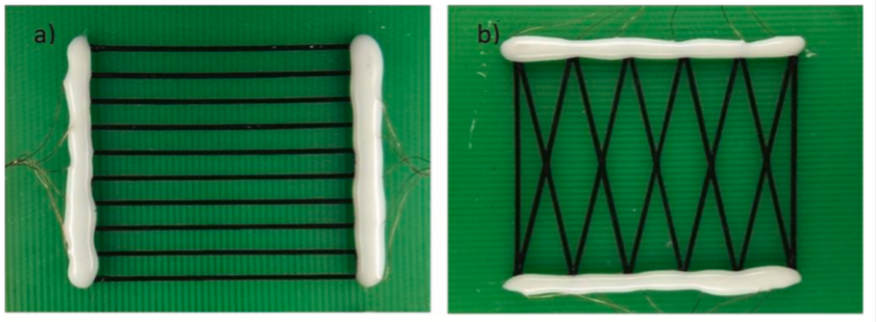


Figura 13: Configuração da resistência impressa (a) paralela e b) diamante) [17].

No teste a uma temperatura a -16 ^{o}C, em ambiente controlado, durante 2h, foi possível verificar e testar este método como um sistema de degelo. Uma camada com 2,65 mm de gelo, formada nas condições acima referidas foi derretida em 3 minutos e 30 segundos [17], o que comparando com alguns métodos utilizados atualmente, revela ser um método bastante rápido e promissor.

2.3.3.3 Serigrafia - impressão de circuitos elétricos

Para além da impressão 3D apresentada anteriormente como um dos métodos para

obtenção de circuitos elétricos, existe também um processo denominado Serigrafia, que permite, desde há muitos anos, a impressão de circuitos alimentados eletricamente [18].

Este processo pode também ser denominado de *Printed Eletronics* (PE). Esta tecnologia surgiu em 1950 [18].

Esta tecnologia comumente utilizada está presente no dia-a-dia, a título de exemplo têm-se as células utilizadas nos painéis solares (apresentado na figura 14 (esquerda)), as antenas de identificação de radio frequência (RFID), (apresentando na figura 14 (direita)), alguns *displays* (apresentado na figura 15 (esquerda)), como por exemplo *OLEDs* e *e-papers*, equipamentos desportivos e de saúde (apresentado na figura 15 (direita)) [18].

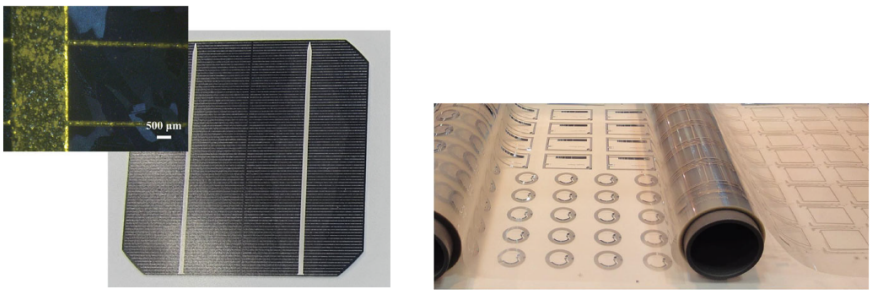


Figura 14: Painel solar e impressão em prata (esquerda) e antena RFID (direita) [18].

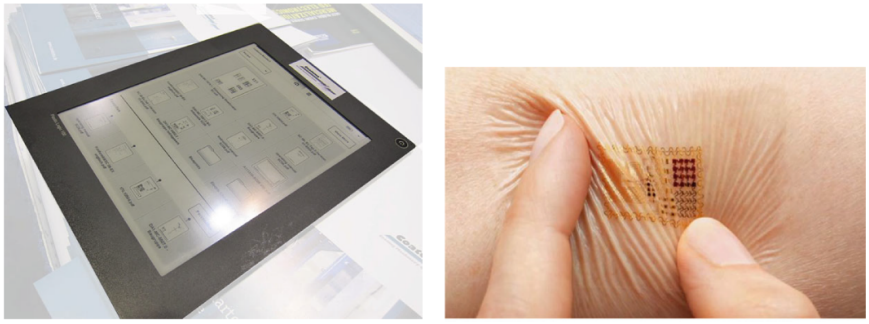


Figura 15: *E-book* de tamanho A4 (esquerda) e dispositivo de medição de temperatura, pressão arterial e glicose (direita) [18].

Esta é uma tecnologia que combina o fabrico de circuitos elétricos com a impressão de texto/gráfico. Através desta combinação pode-se fabricar circuitos de elevada qualidade e precisão [18].

Neste tipo de impressão alguns parâmetros devem ser considerados, nomeadamente [18]:

- Precisão e resolução da impressão;
- Humedecimento e compatibilidade das tintas utilizadas com os componentes de impressão, como por exemplo rolos, lâminas raspadoras e cabeçotes de impressão, que influenciam diretamente no rendimento e na qualidade final;
- Considerações de rendimento e custo (esta tecnologia apresenta elevados benefícios na produção em massa a custo razoável).

Existem diversos métodos de impressão, como é apresentado na tabela 4, aos quais estão associadas condições de trabalho distintas.

Tabela 4: Comparação os diversos métodos de impressão considerandos alguns parâmetros [18].

Método de Impressão	**Viscosidade da Tinta (cP)**	**Largura de Linha (μm)**	**Espessura de Linha (μm)**	**Velocidade (m/min)**
Inkjet	10-20	30-50	1	10 $(m \cdot s^{-1})$
Offset	100-10000	≈ 10	10	1000
Gravure	100-1000	10-50	≈ 1	≈ 1000
Flexo	50-500	45-100	≤ 1	≈ 500
Screen	500-5000	30-50	5-100	≈ 70

Um dos métodos mais comuns é o *Screen Printing* ou Serigrafia, muito utilizado no fabrico de produtos eletrónicos. Este método está associado a uma impressão de baixa pressão, recorrendo a uma malha de tela com um padrão projetado de espessura unifrome [18].

É utilizado um corpo de metal flexível ou de borracha para espremer a pasta através da malha de tela. Relativamente à malha pode ser utilizada uma malha de um polímero ou aço inoxidável. O padrão da malha é formado através da fotolitografia de uma emulsão na malha [18].

Após a impressão, os circuitos impressos devem ser secos ou curados antes da etapa seguinte do processo. A secagem pode ser feita com recurso a um forno ou através da cura com uma lâmpada UV. Geralmente as tintas utilizadas neste processo, nomeadamente as tintas metálicas e inorgânicas, necessitam de temperaturas elevadas para a sua cristalização e densificação, de modo a obter a funcionalidade desejada. No caso das nanopartículas de prata (Ag) e do cobre (Cu), estas necessitam de temperaturas acima

dos 200 ^oC para atingirem uma resistência de aproximadamente $5 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot cm$. No caso das nanopartículas de cobre de tinta também requerem uma atmosfera de trabalho inerte [18]. Este tratamento de temperatura poderá implicar distorções e danificação do substrato caso seja utilizado um substrato polimérico [18].

Deste modo, em vez deste tratamento, com recurso a temperaturas elevadas, podem ser utilizados diferentes métodos, como por exemplo [18]:

- Cura com recurso a *laser*;
- Cura com recurso a UV;
- Tratamento com plasma;
- Cura com recurso a microondas.

Relativamente aos materiais utilizados para a impressão destes circuitos, é vasta a gama. Incluem os materiais metálicos, como por exemplo a prata (Ag), o cobre (Cu) e ouro (Au), as moléculas orgânicas, as cerâmicas e os nano materiais de carbono. É importante referir que a propriedade mais relevante a considerar neste processo é a condutividade elétrica dos materiais, deste modo os materiais metálicos tornam-se nos mais utilizados [18].

Na tabela 5 é apresentada a condutividade elétrica destes materiais. Como é possível concluir os materiais metálicos, como é o caso da prata e do cobre são os materiais com o valor de condutividade elétrica mais elevado.

Tabela 5: Condutividade elétrica dos materiais que podem ser utilizados no PE - Adaptado de [18].

Materiais		**Condutividade Elétrica** ($S \cdot m^{-1}$)
Metais	**Ag**	$6.2 \cdot 10^3$
	Cu	$5.9 \cdot 10^3$
	Au	$4.4 \cdot 10^3$
	Pt	$1.0 \cdot 10^3$
	Ni	$1.4 \cdot 10^3$
Orgânicos	**PEDOT/PSS**	10^{-2} - 10
Cerâmica	**ITO**	10 - 10^2

Também é possível recorrer a nanopartículas metálicas, conferindo alguns benefícios, nomeadamente [18]:

- Devido ao seu tamanho muito reduzido, são facilmente utilizadas como tintas que podem ser utilizadas em diversos métodos;
- Apresentam elevada energia superficial, dado que à medida que o tamanho das partículas diminui, a influência da energia superficial aumenta.

2.4 Soluções de mercado atual

Todas as aplicações de sistemas ativos e passivos referidos nos subcapítulos anteriores são exemplos, a maioria deles em estudo, na área aeronáutica e na produção de energia elétrica a partir de aerogeradores, sendo reduzidas as aplicações e as soluções na área automóvel. Na aeronáutica, apesar da maior pesquisa associada ao tema e aos métodos que possam ajudar a solucionar esta problemática, a nível funcional, ainda é muito comum a utilização de fluidos anticongelantes. No entanto, nos últimos anos tem-se verificado um aumento da pesquisa nos métodos associados ao *Electro Impulsive/Repulsive*, acreditando-se que será o foco no futuro, nesta área [13].

Hoje em dia, na área automóvel são muito poucos ou inexistentes os sistemas que permitem o degelo e o anti-gelo. O método mais utilizado, com cerca de 70 anos, é definido como um método de degelo do pára-brisas dianteiro dos automóveis [12], tal como foi explicado no subcapítulo anterior.

As empresas automóveis não apresentam muitas soluções de sistemas ativos ou passivos de degelo e/ou anti-gelo para evitar a inutilização de superfícies e equipamentos como o radar ou outros sensores, cuja recolha de informações é comprometida sempre que os mesmo são sujeitos a condições atmosféricas adversas, como por exemplo a formação de gelo nas suas superfícies.

Normalmente as indicações fornecidas por estas empresas, relativamente aos equipamentos, é a limpeza da superfície removendo o gelo, neve ou sujidade [19].

3 Análise teórica

Antes de ser iniciada a simulação numérica, a avaliação e a validação experimental é importante compreender os princípios físicos e, alguns conceitos que sustentam todo o projeto desenvolvido desde os fenómenos físicos de conversão de calor em energia elétrica, bem como a base teórica que sustenta o *software* utilizado.

3.1 Mecanismos de transferência de calor

Os mecanismos de transferência de calor são os processos básicos de transporte da energia-calor. A condução e a convecção são mecanismos cujo suporte é de natureza molecular [20]. A radiação é um mecanismo de natureza eletromagnética que encontra as melhores condições na ausência de meios físicos (vazio) [20].

Na tabela 6 é apresentado um esquema que permite clarificar o mecanismo de transporte associado a cada um dos modos de transferência de calor.

Tabela 6: Mecanismos de transferência de calor - Adaptado de [20].

Mecanismos	**Condução**	**Convecção**	**Radiação**
Transporte Molecular	Sim	Sim	Não
Transporte por Radiação	Não	Não	Sim

Convecção

Este processo de transferência de calor resulta de uma interação entre uma superfície de um sólido e a circulação de um fluido a diferentes temperaturas [20].

Este fenómeno está dividido em convecção forçada, que ocorre quando o movimento do fluido é gerado através de uma fonte externa, como por exemplo o vento ou uma bomba, e em convecção natural onde o movimento do fluido não é gerado por uma fonte externa, mas apenas por diferenças de densidades no fluido, devido a diferenças de temperaturas [20]. É importante referir que numa situação de convecção forçada, uma certa quantidade de convecção natural está sempre presente [20].

Para ambos os processos de convecção, a potência de calor depende da área de transferência (m^2), da temperatura da superfície do sólido (T_s) (K), da temperatura do

fluído (T_f) (K) e do coeficiente de convecção (h_{conv}) (W $\cdot m^{-2}$ $\cdot K^{-1}$), equação 3.1 [20]:

$$\dot{Q} = h_{conv} \cdot A \cdot (T_s - T_f) \tag{3.1}$$

Esta transferência de calor ocorre da temperatura mais elevada para a temperatura mais baixa [20].

A dificuldade associada à determinação deste fluxo reside na determinação do coeficiente de convecção, que depende de vários fatores, desde a geometria do corpo, da velocidade do fluido até ao regime de escoamento [20].

Condução

O processo de condução consiste na transferência de energia interna através da colisão de partículas dentro de um corpo devido a um gradiente de temperatura [20].

A potência de calor depende da área de transferência (m^2), da condutividade térmica (W$\cdot m^{-1}$ $\cdot K^{-1}$), e das temperaturas das superfícies envolvidas (equação 3.2) [20]:

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \tag{3.2}$$

Ao contrário do que acontece com a potência de calor por condução, o fluxo de calor não depende da área de transferência, uma vez que este parâmetro mede o calor transferido através de uma superfície com um metro quadrado de área, por unidade de tempo (equação 3.3) [20]:

$$\dot{q} = -k \cdot \frac{dT}{dx} \tag{3.3}$$

Radiação

A radiação é o mecanismo de transporte de calor por ondas eletromagnéticas tanto na ausência de meios físicos (vazio), como no ar ou outros gases e meios líquidos [20].

A radiação térmica compreende a radiação visível e infravermelha, isto é, comprimentos de onda entre 0.4 μm 1000 μm [20].

Um corpo negro é um corpo definido teoricamente, como um corpo ideal do ponto

de vista energético, de maneira que absorve toda a energia que sobre ele incide [20]. Várias leis se referem a este tipo de corpos, como por exemplo a Lei da distribuição de *Planck*, a lei do deslocamento de *Wien* e a lei de *Stefan-Boltzmann* (apresentada na equação 3.4). Todas elas estão diretamente relacionadas com o poder emissivo dos corpos negros [20].

O poder emissivo de um corpo consiste na potência que uma superfície emissora emite, por unidade de área desta superfície, por intervalo de comprimento de onda [20].

Na equação 3.4 é apresentada a lei de *Stefan-Boltzmann* [20]:

$$e_{corponegro} = \sigma \cdot T^4 \tag{3.4}$$

onde e representa o poder emissivo ($W \cdot m^{-2}$), σ a constante de *Stefan-Boltzmann* (σ= $5.6696 \cdot 10^{-8}$ $W \cdot m^{-2} \cdot K^4$) e T a temperatura absoluta de um corpo negro (K). Esta lei em específico permite calcular a radiação total emitida por este tipo de corpos, em todas as direções e em todos os comprimentos de onda, através da temperatura [20].

A emissividade é uma propriedade definida pela razão entre a radiação emitida por um qualquer corpo e a radiação emitida por um corpo negro (lei de *Stefan-Boltzmann*). Deste modo, a emissividade é dada pela equação 3.5 [20]:

$$\varepsilon = \frac{e_{qualquercorpo}}{e_{corponegro}} \tag{3.5}$$

onde ε representa emissividade do corpo, $e_{qualquercorpo}$ o poder emissivo de um qualquer corpo ($W \cdot m^{-2}$) e $e_{corponegro}$ o poder emissivo de um corpo negro ($W \cdot m^{-2}$), à mesma temperatura.

Deste modo o poder emissivo de um qualquer corpo pode ser obtido de acordo com a equação 3.6 [20]:

$$e_{qualquercorpo} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{3.6}$$

Ou seja, a emissividade varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais elevado é o seu valor, mais o poder emissivo é próximo do poder emissivo de um corpo negro [20].

3.2 Efeito Joule

O efeito de Joule ou efeito térmico é um princípio físico que relaciona o calor gerado com a corrente elétrica que percorre um condutor elétrico num dado periodo de tempo [21]. Em dezembro de 1840, James Prescott Joule publicou um resumo onde este fenómeno é defendido e explicado, isto é, que a passagem de corrente elétrica num condutor provoca o aumento de temperatura, sendo traduzido em libertação de energia sob forma de calor [21]. Esta energia elétrica transformada em calorífica é diretamente proporcional à resistência elétrica, ao quadrado da intensidade de corrente que o percorre e ao tempo de passagem da corrente. A potência calorífica produzida é proporcional ao produto da resistência do fio pelo quadrado da corrente (Equação 3.7) [21]:

$$P = I^2 \cdot R \tag{3.7}$$

Onde P representa a potência (W), I a intensidade de corrente (A) e R a resistência do fio (Ω).

Considerando também a lei de ohm, apresentada na equação 3.8 [21]:

$$R = \frac{V}{I} \tag{3.8}$$

É possível a partir das equações 3.7 e 3.8 calcular o fluxo de calor, como é apresentado na equação 3.9 [21]:

$$\dot{q} = \frac{V \cdot I}{A} \tag{3.9}$$

onde $\dot{q}$ representa o fluxo de calor ($W \cdot m^{-2}$), V a tensão (V), I a intensidade de corrente (A) e A a área em análise (m^2).

3.3 Resistência térmica

Quando se fala na transferência de calor entre diferentes materiais que compõem um bloco através do qual é medido o fluxo de calor, é importante falar sobre o conceito de resistência térmica.

Esta análise de resistência térmica consiste na semelhança entre os fenómenos e as

equações associados a uma resistência elétrica e uma resistência térmica. Deste modo, uma resistência elétrica permite o controlo do fluxo de eletricidade num circuito elétrico, como acontece com a resistência térmica [20]. Este último, mede a oposição que um dado material tem contra o calor que flui por si mesmo. Nas equações abaixo é possível verificar o que foi descrito e a correlação explicada. Na equação 3.10 [20] é definida a lei de ohm e na equação 3.11 [20] é estabelecido o cálculo da resistência térmica.

$$R_{elétrica} = \frac{\Delta V}{I} \tag{3.10}$$

$$R_{térmica} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{L}{k \cdot A} \tag{3.11}$$

É importante referir que valores mais elevados de resistência térmica implicam valores mais baixos de fluxo de calor. Deste modo, uma maneira de alterar este valor, é através da manipulação da equação . Isto é, para manipular este valor pode-se escolher outros materiais, permitindo que a condutividade seja alterada, alterar a espessura de cada camada de material e encontrar uma combinação ideal destes valores para atingir um valor de resistência menor e por fim alterar a área de transferência [20].

3.4 Resistência superficial de filmes finos

O valor da resistência superficial associada a uma área de filme é independente das dimensões da área considerada. Esta medida é bastante relevante quando se fala em qualidade de produção de filmes/materiais condutores [22].

A resistividade elétrica de um filme de uma dada área é uma propriedade diretamente dependente do material. Deste modo, esta propriedade é calculada a partir da equação 3.12 [22]:

$$\rho_{elétrica} = \frac{R \cdot A}{I} \tag{3.12}$$

onde R representa a resistência do elemento do circuito, neste caso é a resistência superficial do filme, A a área da secção reta perpendicular à direção da corrente elétrica e I corrsponde à intensidade de corrente. Sendo que a resistência superficial do filme é

dada pela equação 3.13 [22]:

$$R_s = \frac{\rho_{elétrica}}{t} \tag{3.13}$$

onde R_s representa a resistência superficial do filme, t representa a espessura do filme e $\rho_{elétrica}$ a resistividade do material.

3.5 *Software*

3.5.1 Modelo de fluxo (*FENSAP*)

Este módulo, *FENSAP*, que será explicado no próximo capítulo (capítulo 4), é responsável pela resolução de fluídos newtonianos compressíveis ou incompressíveis, invíscidos ou viscosos, laminares ou turbulentos através de equações de Navier-Stokes.

No *FENSAP*, as equações são adimensionalizadas. Deste modo as equações de Navier-Stokes são escritas como é apresentado nas equações 3.14 (Continuidade), 3.15 (Momento) e 3.16 (Energia) [23]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{3.14}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\infty} \cdot \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{3.15}$$

$$\frac{\rho c_p \partial T}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = (\gamma - 1) \cdot M_\infty^2 \cdot \frac{Dp}{Dt} + \frac{1}{Re_\infty Pr_\infty} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{(\gamma - 1) \cdot M_\infty^2}{Re_\infty} \cdot \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial u_j}, \tag{3.16}$$

3.5.2 Impacto das gotas de água nas superfícies (*DROP3D*)

O módulo *DROP3D* utilizado para a simulação deste projeto utiliza uma abordagem Euleriana para o impacto das gotas de água, ao contrário do que normalmente é utilizada, a abordagem Lagrangiana [8], [23].

No módulo *DROP3D* é importante considerar alguns parâmetros, para a realização dos cálculos pelo mesmo [8], [23]:

- A gotícula de água é considerada uma esfera perfeita, sem deformações ou irregularidades;
- Não há colisões entre as gotas de água;
- As transferência de calor e massa entre as gotas e o meio envolvente são negligenciadas;
- A influência da turbulência da atmosfera na gota é ignorada;
- As únicas forças que atuam sobre as gotículas de água são: a força do ar, de arrasto, de impulso e gravidade.

Estas conclusões permitem chegar às equações de continuidade e momento apresentadas abaixo, equação 3.17 e 3.18, respetivamente. Estas representam as equações não dimensionalizadas das gotículas de água utilizadas pelo módulo *DROP3D* [8].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \frac{C_d \cdot Re_d}{24 \cdot K} \cdot (u_a - u) + (1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}}) \cdot \frac{1}{Fr^2} \cdot g + \frac{\rho_{ar}}{\rho_{água}} \cdot (\frac{\partial u_a}{\partial t} + u_a \cdot \nabla u_a) \tag{3.18}$$

onde $a(x,t)$ representa a fração de volume médio não dimensional ocupado por água do total de volume de fluido e $u(x,t)$ é a velocidade média não dimensional das gotas de água em relação à velocidade do fluxo livre $\frac{u}{U_\infty}$ e u_a representa a velocidade não dimensional do ar [8].

O modelo acopulado de ar e gota, uma equação de Navier-Stokes, base dos cálculos de fluxo compressível, poderá ser usado sem alterações. Na equação 3.19 é apresentada a razão de massa volumétrica, isto é, massa de fase na mistura por unidade de volume [8]. É importante referir que as equações de Navier-Stokes são válidas para valores reduzidos (inferiores a uma ordem de grandeza de 10^{-1}) de *Mass Loading* [8].

$$MassLoading = \frac{\rho_{gota}}{\rho_{ar}} \simeq 10^{-3} \tag{3.19}$$

O número de Reynolds da gotícula de água é dada pela equação 3.20 [8].

$$Re_d = \frac{\rho_{água} \cdot d \cdot U_\infty \cdot |u_a - u|}{\mu} \tag{3.20}$$

Este número representa a maneira como a gota quebra no impacto com a superfície considerada. Um valor elevado corresponde a um impacto de gota que se divide em muitas gotículas menores, que podem ser arrastadas pelo fluxo envolvente [8].

O valor de K é dado pela equação 3.21 [8]:

$$K = \frac{\rho_{água} \cdot d^2 \cdot U_\infty}{18 \cdot L \cdot \mu} \tag{3.21}$$

O coeficiente de arrasto para gotículas perfeitamente esféricas é obtido pela equação 3.22 [8]:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \cdot (1 + 0,015 \cdot Re_d^{0,687}) \tag{3.22}$$

A equação 3.22 apenas é válida para valores de $Re_d \leq 1000$ e quando $Re_d \geq 1000$ o valor do coeficiente de arrasto pode ser assumido como $C_D = 0,4$ [8].

Relativamente ao número de Froude, este é obtido partir da equação 3.23 [8].

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{L \cdot g}} \tag{3.23}$$

3.5.3 Filme de água/ Formação de gelo (*ICE3D*)

Neste módulo algumas suposições são consideradas, à luz do que acontece com outros módulos do *software* [24]:

- A espessura do filme de água considerado deverá ter um valor inferior a $10\mu m$;
- O perfil de velocidade é linear ao longo da espessura do filme;
- Não existe ar armazenado no interior do gelo e não é dissolvido nenhum ar na água;

- Não é considerado a condução entre a superfície do corpo considerado e a água;
- A temperatura é constante ao longo de toda a espessura do filme de água.

Este módulo necessita da solução das equações de turbulência de Navier-Stokes e a solução correspondente ao módulo *DROP3D*.

4 Metodologia

4.1 Simulação numérica

Para a realização da simulação numérica do problema em questão foi utilizado o *software* ANSYS *Fluent*.

O ANSYS *Fluent* utiliza o método dos elementos finitos (FEM) para resolver as equações diferenciais parciais que definem a conservação de energia, massa e momento. Cada elemento gerado pelo processo de geração de malha é utilizado como elemento de controlo [25].

Este *software* contém os recursos necessários para modelar fisicamente fluxos, turbulências, transferência de calor e reações para aplicações industriais. O *solver* deste fornece resultados CFD (*Computacional Fluid Dynamics*) precisos a uma rapidez elevada, malhas flexíveis de movimento e deformações [25], [26].

De modo a garantir abrangência e soluções para todos os tipos de problemas, nomedamente em solução de problemas que envolvessem formação de gelo, mais *softwares* ANSYS foram desenvolvidos, nomeadamente o ANSYS *Fensap-Ice* e ANSYS *Fensap-Ice-Turbo*. De um modo geral, o *Fensap-Ice* é um sistema de simulação 3D. Este aborda cinco principais aspetos da formação de gelo [23]:

- Fluxo de ar (CFD)
- Limites de impacto de gotas
- Formas de gelo
- Degradação aerodinâmica
- Sistemas de anti-gelo e degelo

Este *software*, ANSYS *Fensap-Ice*, contém seis módulos principais, sendo que para o projeto apresentado, apenas serão utilizados cinco módulos [23]:

- ***OptiGrid***: adaptação da malha 3D e ferramenta de reconstrução CAD;
- **FENSAP**: resolve as equações de Navier Stokes através do métodos de elementos finitos;
- **DROP3D**: soluciona o impacto da gota de água através do método de elementos finitos 3D;

- **ICE3D**: trata o acúmulo e agregação de gelo de volume finito 3D;

- **CHT3D**: soluciona a transferência de calor 3D.

À luz do que foi descrito no capítulo 2, na tabela 7 são apresentadas alguns parâmetros que influenciam diretamente cada um dos módulos utilizados nesta simulação.

Tabela 7: Influência dos parâmetros nos módulos do *software* - Adapatado de [23].

Parâmetros	FENSAP	DROP3D	ICE3D	CHT3D
Velocidade do ar	Sim	Sim	Sim	Sim
Altitude/Pressão	Sim	Sim	Sim	Sim
Temperatura ambiente/ar	Sim	Sim	Sim	Sim
MVD	Não	Sim	Sim	Sim
LWC	Não	Sim	Sim	Sim

De uma maneira geral, o processo de simulação associado ao projeto inclui quatro passos essenciais. O primeiro reside na obtenção de uma solução para um fluxo à volta do corpo considerado. Usando esta solução de fluxo permite determinar o impacto das gotas. O penúltimo passo consiste em encontrar os parâmetros de agregação de gelo e por fim calcular o balanço energético associado a esta agregação. Esta agregação será sujeita a um sistema de degelo ou anti-gelo, que posteriromente será analisado quanto à sua eficiência.

Nesta simulação é relevante salientar a importância do módulo de transferência de calor conjugado (*CHT3D*), uma vez que este é utilizado para simulações numéricas de degelo e anti-gelo combinando o fluxo de calor entre o domínio sólido e do fluido através de qualquer gelo acumulado [23].

Este fornece resultados para o fluxo de calor mais próximos dos reais dado que as condições de contorno nos cálculos do *solver* do fluxo devem ser definidos para valores especificados, que podem ser alterados devido à acumulação possível de gelo [23].

Deste modo, para executar este módulo é importante ter uma solução incial para gota de água, um domínio sólido (superfície condutora de calor) e definição da interface entre o domínio sólido e domínio de fluido [23].

4.2 Modelo inicial

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de aquecimento (*Heater*) com uma geometria tal que permita evitar/reduzir a formação de gelo à superfície de um equipamento, como por exemplo o radar do veículo, isto é, o desenvolvimento de um sistema de anti-gelo eficiente.

Na figura 16 é apresentado um esquema inicial do modelo físico utilizado como ponto de partida. Este modelo foi obtido através do *SpaceClaim*, um *software* de modelação sólida.

O modelo físico consiste numa *sandwich* constituída por 2 corpos sólidos de dimensões $100 \times 100 \times 3$ mm, denominados como Base e Lente, como é indicado na figura 16 a) e uma superfície plana de geometria variável, localizada entre estes dois corpos, indicado na figura 16 b).

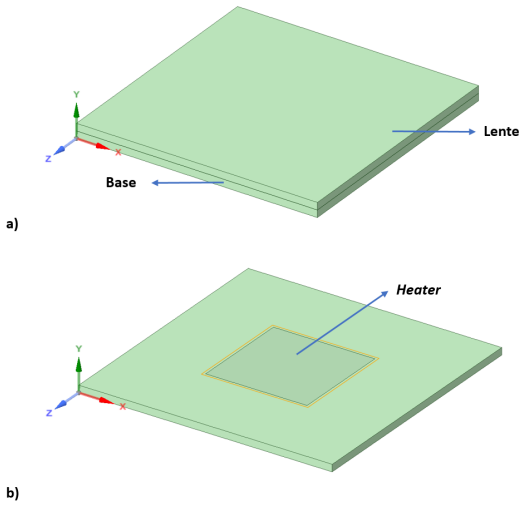


Figura 16: Modelo físico inicial - a)Base e Lente; b) Sistema de aquecimento (*Heater*) e Base.

A geometria do sistema de aquecimento apresentada na figura 16 não representa a geometria final, uma vez que esta, ao longo de todo o projeto, sofreu vários testes e alterações, como é possível ver no subcapítulo 4.6.

Para a análise numérica deste sistema é necessário utilizar uma ferramenta disponível no *SpaceClaim* denominada *Enclosure*. Esta ferramenta permite analisar e realizar uma simulação numérica associada ao fluido, uma vez que fisicamente representa um paralelepípedo que envolve o corpo descrito anteriormente. Para este estudo foi definido

um *enclosure* cujas as suas faces se encontram a uma distância de 25 *mm* das faces do corpo, como é possível ver na figura 17.

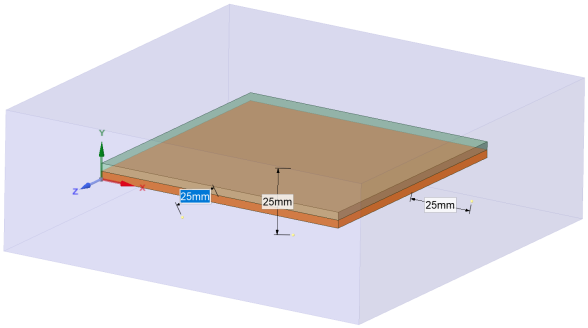


Figura 17: *Enclosure*.

É relevante referir que para esta simulação numérica foi necessário criar, ainda no *SpaceClaim*, grupos, isto é, nomear algumas superfícies que serão necessárias e identificadas pelo *software Fensap-Ice*. Deste modo, definiu-se o *Inlet* (figura 18 a)) e o *Outlet* (figura 18 b)) , que corresponde à entrada e saída do fluxo, respetivamente. As *Walls* (figura 18 c)) correspondem ao limite da zona de circulação de fluido e o *Heater* representa a superfície entre a lente e a base, identificada na figura 16 b). Posteriormente, foram definidas como grupos, os sólidos: Base, Lente e *Enclousure*.

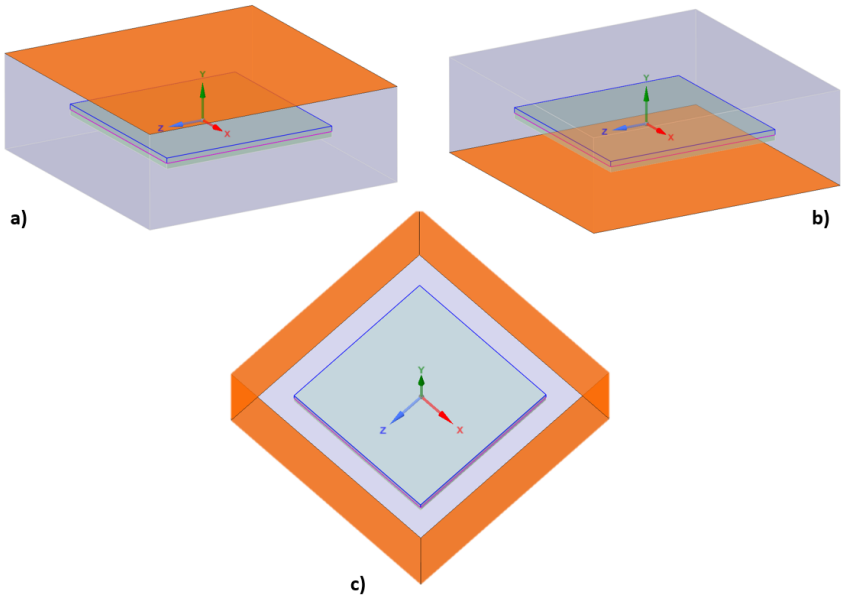


Figura 18: Grupos de Superfícies.

4.2.1 Atribuição de materiais

Para que o estudo deste sistema fosse o mais próximo da realidade, foi necessário atribuir um material a cada um dos corpos sólidos. Considerando os materiais utilizados nestas superfícies na área automóvel hoje em dia, a lente é feita de Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) e a base de Policarbonato (PC). Na tabela 8 são apresentadas as propriedades essenciais destes materiais.

Tabela 8: Propriedades dos materiais atribuídos ao corpo.

Material	**Massa volumíca** $(kg \cdot m^{-3})$	**Condutividade** $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	**Calor específico** $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
ABS	1050	0.129	1800
PC	1200	0.2	1900

4.3 Condições de fronteira

Considerando a pesquisa bibliográfica previamente realizada e apresentada no capítulo 2 foi possível definir as condições fronteira associadas à formação de gelo, como por exemplo temperatura ambiente e de superfície, velocidade do ar, LWC e MVD e a nível do *Heater* foi definido numericamente o fluxo de calor associado. É importante referir que apesar desta referência bibliográfica, foi fulcral considerar também algumas limitações da câmara climática que foi utilizada para obter resultados experimentais deste sistema de anti-gelo. Deste modo, alguns ajustes ao que a literatura recomenda tiveram que ser realizados.

Na tabela 9 são apresentadas as condições de fronteira definidas para as diferentes simulações. É de notar que foram realizadas 2 tipos de simulações no que concerne a temperaturas (Tipo I e Tipo II), como é indicado na tabela 9.

Tabela 9: Definição das condições de fronteira.

Condições Fronteira	**Tipo I**	**Tipo II**
Temperatura do ar (^oC)	-10	-20
Temperatura de Superfície (^oC)	0	-10
Velocidade do ar $(m \cdot s^{-1})$	5	
LWC $(g \cdot m^{-3})$	1	
Fluxo de Calor $(W \cdot m^{-2})$	8000	

Relativamente ao MVD foi definida uma distribuição, como é apresentada na figura 19. Segundo a literatura, quanto maior o seu valor mais favorável seria a formação de gelo, sendo que os seus valores deveriam estar acima de 50 μm. Deste modo, foi definido um intervalo de 50 μm a 160 μm, uma vez que valores superiores a 160 μm seriam valores muito elevados para as condições ambientais consideradas.

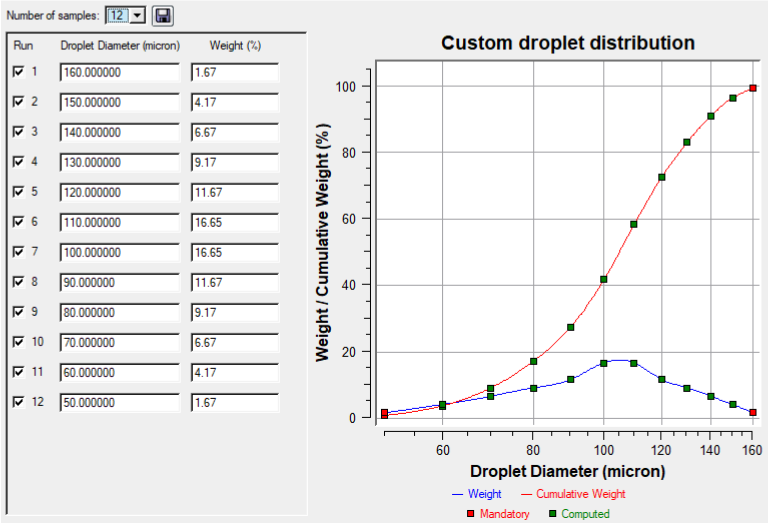


Figura 19: Distribuição do tamanho de gota.

4.4 Parâmetros de simulação numérica

Como foi descrito foram utilizados 4 módulos distintos no *ANSYS Fensap-Ice*. Em cada um deles foi necessário estabelecer parâmetros específicos de modo a garantir que os resultados obtidos fossem o mais próximos da realidade.

Relativamente ao primeiro módulo utilizado, *Fensap*, este faz uma análise sobre a malha do fluido. Foi definido inicialmente o ar como modelo físico com a possibilidade de existência de turbulência no fluido (*Spalart- Allamaras*). A nível das condições atmosféricas foram definidas a temperatura do ar, a velocidade e a direção do mesmo. Quanto às condições fronteiras, estas foram divididas em 4 partes, as referentes ao *Inlet*, às *wall*, ao corpo e ao *Outlet*, como é possível ver na figura 18. Tanto no *Inlet* como no *Outlet* foram importadas as condições iniciais estabelecidas, isto é, temperatura e velocidade do ar e pressão, respetivamente. Quanto às superfícies caracterizadas como *wall* foram definidas como *slip surface type* e as superfíces que representam o corpo foram definidas como *no-slip surface type*, sendo também definida a temperatura da superfície do corpo. A condição de *no-slip surface type* impõe zero velocidade em todos

os nós dessa superfície e a condição de *slip surface type* ajuda a obter uma transição mais suave entre as condições locais e as condições fronteira [23]. Por fim, relativamente ao *solver* foi definido um valor de 50 para o *CFL number*, valor recomendado pelo manual do *software*, cerca de 4000 incrementos temporais, de modo a garantir uma convergência da solução.

No módulo *DROP3D*, como a maioria das condições foram transferidas do módulo anterior, apenas foi necessário estabelecer as condições associadas às gotas, isto é, o LWC, a distribuição do tamanho de gota (figura 19) e a massa volumíca da água (1000 $kg \cdot m^{-3}$). Quanto ao *solver* não foi necessário um valor tão grande de *CFL number*, sendo apenas definido 10 e cerca de 800 incrementos temporais.

No penúltimo módulo, *ICED3D*, à luz do que aconteceu no módulo *DROP3D*, não foi necessário definir condições, uma vez que a solução obtida no mesmo foi transportada para o *ICED3D*. Desta forma, apenas foi definido em que superfícies poderia ou não haver a formação/acumulação de gelo, tendo sido desativadas as superfícies definidas como *Wall*.

Inicialmente para definir o módulo *CHT3D* é importante estabelecer o tipo de problema (*Electro-Thermal (1 fluid, 1 solid)*), o *Icing mode* (*Anti-icing*) e o *Flow Solver* (*Fensap*).

O módulo *CHT3D* apresenta 3 submódulos, o *fluid ext* associado à solução inicial referente ao fluido, por isso se procede à transferência da solução obtida no módulo *Fensap*, previamente obtida. O submódulo *ice ext*, que está relacionado com a solução obtida no módulo *ICE3D*, deste modo é feita a transferência da solução obtida neste módulo. Por fim, o submódulo associado ao corpo, *solid*, aqui a análise é feita sobre a malha do corpo, são atribuídos os materiais ao mesmo, através da definição das suas propriedades (massa volumíca, condutividade térmica e capacidade calorífica), apresentadas na tabela 8. Posteriormente é definido o fluxo de calor associado ao *Heater* e o valor máximo de incremento temporal, que no caso foi definido como 0.1 s e 5 s de tempo total. Estes valores foram definidos após uma análise de várias simulações realizadas onde foi concluído que os valores anteriormente utilizados, 0.05 s e 1 s, respetivamente, não resultavam numa convergência do módulo. Este módulo, referente ao sistema de anti-gelo devrá atingir uma convergência tal, isto é, que o fluxo de calor associado ao *Heater* terá que tender para zero, onde temperaturas e fluxos associados se encontrem estabilizados. Ou seja, com estes valores de máximo *time step* e tempo total, estar-se-ia a impor um fluxo de 8000 $W \cdot m^{-2}$ em apenas 1 s de simulação, o que seria um valor de fluxo muito elevado, para o estabilizar e tender para zero neste

período. Os valores selecionados (0.1 s e 5 s) permitem aumentar o número de iterações para cada ciclo do módulo, possibilitando uma convergência mais fácil.

4.5 Malha e análise de sensibilidade

No presente trabalho foi necessário a geração de duas malhas para que a simulação numérica fosse representativa da realidade, uma malha para o corpo/sólido e uma malha para o fluido.

Para tal, para as primeiras simulações numéricas foram utilizados dois *softwares* distintos para geração da malha, o *software Mechanical* para gerar a malha associada ao sólido/corpo e o *software Fluent* para gerar a malha associada ao fluido que envolvia o sólido/ corpo.

Considerando a licença de estudante utilizada e dado que o *software* utilizado para realizar a simulação numérica foi o *Fensap-Ice*, a malha teria que ser tetraédrica, uma vez que esta é o único tipo de malha que o mesmo aceita. A malha tetraédrica consiste em elementos de 4 faces, normalmente é utilizada na representação de geometrias complexas [23].

Para gerar a malha relativa ao corpo, constítuido por 2 corpos sólidos (Base e Lente) e uma superfície (sistema de aquecimento (*Heater*)), foi necessário, no *software SpaceClaim*, realizar *Share Topology*. Esta funcionalidade permite uma melhor geração da malha quando existem interfaces entre corpos diferentes, ou quando estes se intersetam, e, consequentemente, uma melhor representação do *Heater* [27]. Posteriormente, para exportar o modelo e gerar a malha do sólido no *Mechanical* foi fulcral desativar o corpo *Enclousure*, apenas nesta etapa do processo.

No *software Mechanical*, para gerar a malha foi utilizado o método *Patch Conforming*, onde o processo de geração começa pela aresta, face e por fim volume, sendo todos os limites respeitados [23] e foram selecionados apenas os corpos referentes à Base e à Lente.

Testou-se a utilização do método *Patch Independent* em vez do método *Patch Conforming*. Este novo método gera a malha de maneira contrária ao *Patch Conforming*, isto é, volume - face - aresta e está associado a malhas mais limpas e de qualidade superior [23]. No entanto, apesar de não se verificarem erros na geração da malha de fluído e a mesma apresentar melhor qualidade com este método do que com o método *Patch Conforming*, o método *Patch independent* não consegue gerar a malha de sólido, considerando a existência de uma superfície e de dois corpos sólidos em contacto, dado

que este método tem dificuldade em definir superfícies. Deste modo, considerando que o sólido associado a este trabalho é constituído por 2 volumes e uma superfície nesses volumes com propriedades bem definidas (*Heater*), não foi possível a sua utilização.

Por fim, foi definido o *Element Order* como linear, bem como o tamanho do elemento.

No *software ANSYS Fluent*, o controlo e a sensibilidade do número de elementos torna-se mais difícil, uma vez que não é possível estabelecer uma dimensão exata do tamanho de elemento, mas sim um tamanho mínimo e máximo. Neste processo, no *software SpaceClaim*, desativou-se o *Heater*, a Lente e a Base e tornou-se ativo o *Enclousure*, sendo aplicada da mesma forma a ferramenta *Share Topology*, de modo a obter o mesmo efeito.

Numa primeira fase de análise da malha e da influência do número de elementos nos resultados finais, nomeadamente na quantidade de gelo formada, foram realizadas algumas simulações numéricas nas mesmas condições fronteira, materiais e geometria fazendo-se apenas variar o número de elementos de malha do corpo, ou seja, mantendo-se o número de elementos da malha do fluido, como é apresentado na tabela 10.

Tabela 10: Relação entre o tamanho de elemento e o número de elementos da malha de sólido e número de nós e células da malha de fluído.

Malha	**Tamanho de Elemento (m)**	**Número de Elementos**	**Número de Nós**	**Número Células**
Sólido/ Corpo	0.01	156 566	27 938	-
	0.002	161 169	28 951	
	0.001	604 448	111 301	
	0.0009	768 074	141 229	
	0.0008	1 093 278	200 794	
Fluido	Min: 0.001 Max: 0.005	-	27 532	96 750

É importante referir que para esta primeira análise foram definidas as condições fronteira apresentadas na tabela 9, nomeadamente as condições tipo I, com a exceção da velocidade do ar, que foi definida como 10 $m \cdot s^{-2}$. Relativamente aos parâmetros de simulação foram sendo alterados e adaptados de acordo com as malhas em estudo.

Quanto à geometria em análise foi selecionada e analisada a geometria 1, apresentada na figura 20.

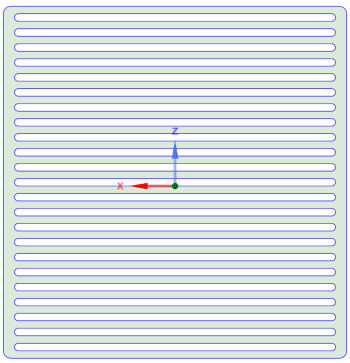


Figura 20: Geometria 1 do sistema de aquecimento utilizada na análise de malha.

Quantos aos resultados e à obtenção de soluções a nível das simulações numéricas, é importante destacar a necessidade das convergências das soluções associadas aos módulos. A convergência do módulo referente à solução do fluxo foi garantida, no entanto a convergência do módulo de transferência de calor não foi atingida, como é possível nas figuras 21 (esquerda e direita).

Inicialmente foram definidas 60 iterações, para o módulo *CHT3D*. Na figura 21 é possível ver uma não convergência da solução para este módulo.

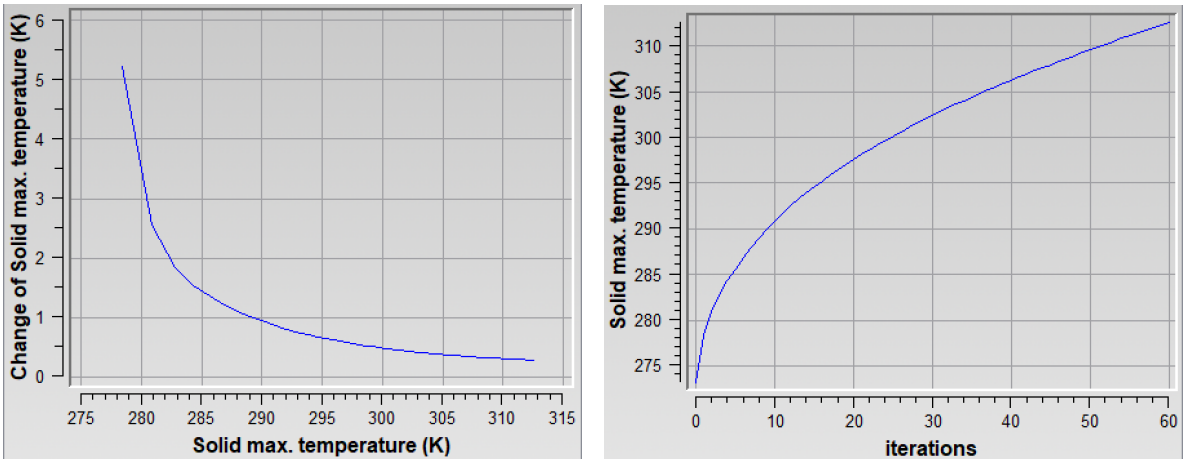


Figura 21: Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 60 iterações.

Como já foi explicado, o módulo *Fensap* analisa a malha referente ao fluido e o módulo *CHT3D* analisa a combinação de ambas as malhas, sólido e fluido.

Na figura 21 (esquerda) é necessário perceber que o gráfico apresentado representa

uma relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima de sólido. Para que este gráfico representasse uma convergência, basta que a relação entre a mudança de temperatura máxima do sólido e a própria temperatura máxima tenda para valores muito próximos de zero. Esta relação é apresentada no gráfico da figura 21 (direita), onde se verifica um aumento constante da temperatura da superfície do sólido e não uma estabilidade da mesma à medida que o número de iterções aumenta.

Com o objetivo de reduzir ou eliminar este erro e permitir a convergência da solução, tentou-se analisar vários parâmetros para que tal fosse possível, como por exemplo:

- Aumentar o número de iterações do processo de análise do módulo *CHT3D*. Esta solução está relacionada com o facto do *software* poder estar a ser parado, pelo número baixo de iterações, antes da solução convergir.

- Variar o tamanho de elemento da malha de fluido e aproximar esse valor do tamanho de elemento da malha de sólido definido. Esta solução deve-se ao facto do módulo em questão analisar ambas as malhas.

- Elevar o número de elementos da malha de sólido. Esta proposta de análise está associada ao facto de quantos mais elementos, mais precisa será a análise feita entre elementos.

- Ajuste dos parâmetros de simulação associados ao módulo.

Todas estas propostas de soluções foram testadas. Inicialmente, aumentou-se o número de iterações de 60 para 100.

Na figura 22 é apresentada a mesma análise para 100 iterações para um tamanho de elemeto da malha de sólido de 0.001 m.

Como é possível ver, não foi atingida a convergência esperada. No entanto, comparando os resultados dos gráficos da figura 21 (para um tamanho de elemento de 0.001 m e 60 iterações) com os gráficos da figura 22 (para um tamanho de elemento de 0.001 m e 100 iterações) é possível verificar que existe maior estabilização dos resultados, sobretudo, se for feita uma análise entre a mudança de temperatura máxima (figura 22 (esquerda)), onde existe uma clara tendência para um patamar, e a temperatura máxima.

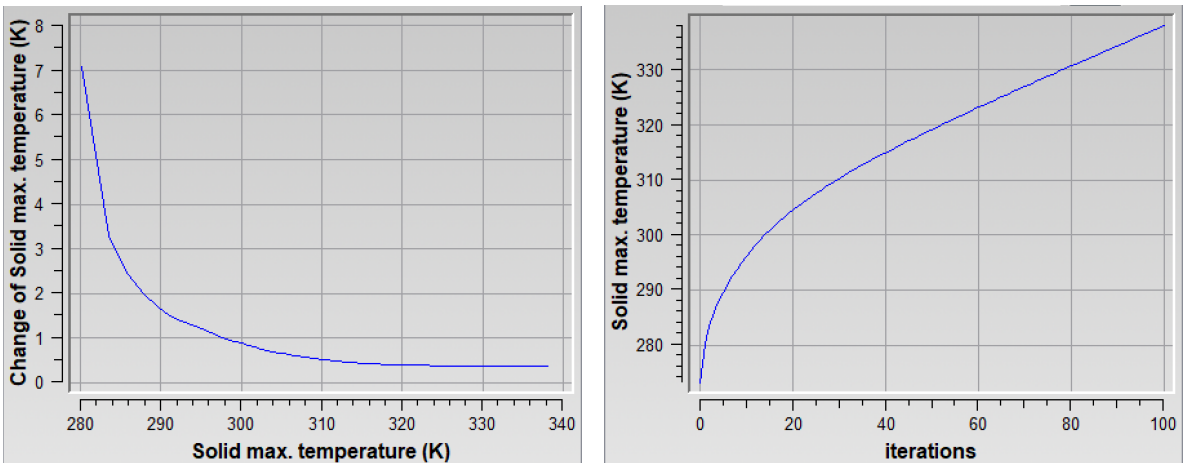


Figura 22: Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 100 iterações.

Deste modo, foram refeitas todas as simulações numéricas para os tamanhos de elementos estudados para 100 iterações. Na figura 23 é apresentada a relação entre o tamanho de elemento da malha de sólido e a quantidade de gelo formada à superfície, para 100 iterações do módulo *CHT3D*.

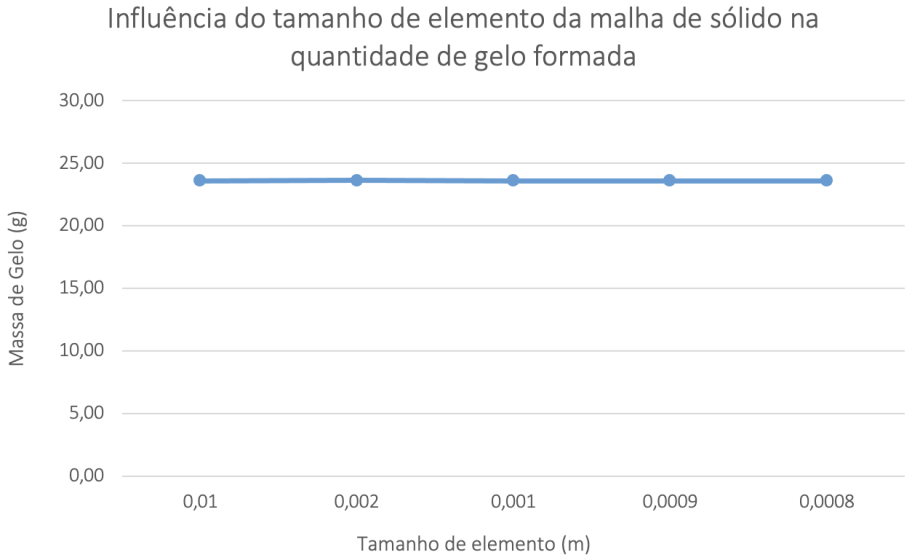


Figura 23: Relação entre o tamanho de elemento da malha de sólido e a quantidade de gelo formada à superfície, para 100 iterações do módulo *CHT3D*.

Como é possível ver no gráfico apresentado na figura 23, independentemente do

tamanho de elemento da malha de sólido, a quantidade de gelo formada é idêntica, cerca de 0.024 kg.

Os resultados numéricos obtidos nas simulações numéricas realizadas para 60 e 100 iterações do módulo *CHT3D* são apresentados no Apêndice A.

Nesta fase do processo tornou-se relevante o estudo da influência do tamanho de elemento da malha de fluído, tanto para garantir a fiabilidade dos resultados numéricos relativos à quantidade de gelo formada na superfície apresentados na figura 23, bem como para tentar reduzir o erro associado à não convergência da solução do módulo *CHT3D*.

Deste modo, foram realizadas simulações numéricas onde foi variado tanto o tamanho de elemento da malha de sólido, como da malha de fluido.

De modo a garantir um controlo do tamanho de elemento da malha de fluído, recorreu-se ao *software Mechanical* para gerar a malha do fluido, tendo-se procedido de igual forma ao que foi explicado anteriormente.

Na tabela 11 é possível verificar o número de elementos e tamanho de elemento associado a cada malha de sólido e fluído analisada.

Tabela 11: Tamanho de elemento e número de elementos respetivos da malha de fluido analisados.

Tamanho de Elementos (m)	**Número de Elementos (Malha de Fluido)**	**Número de Elementos (Malha de Sólido)**
0.01	9032	156 566
0.001	188 101	604 448
0.0008	302 477	1 093 278
0.0007	395 699	1 579 126
0.0006	526 279	2 433 884
0.0005	740 161	4 215 794

Na figura 24 são apresentados os gráficos referentes ao módulo CHT3D, para o tamanho de elemento de 0.001 m de malha de sólido e fluido, tendo se verificado uma diminuição considerável do erro, não sendo atingida ainda assim, uma convergência.

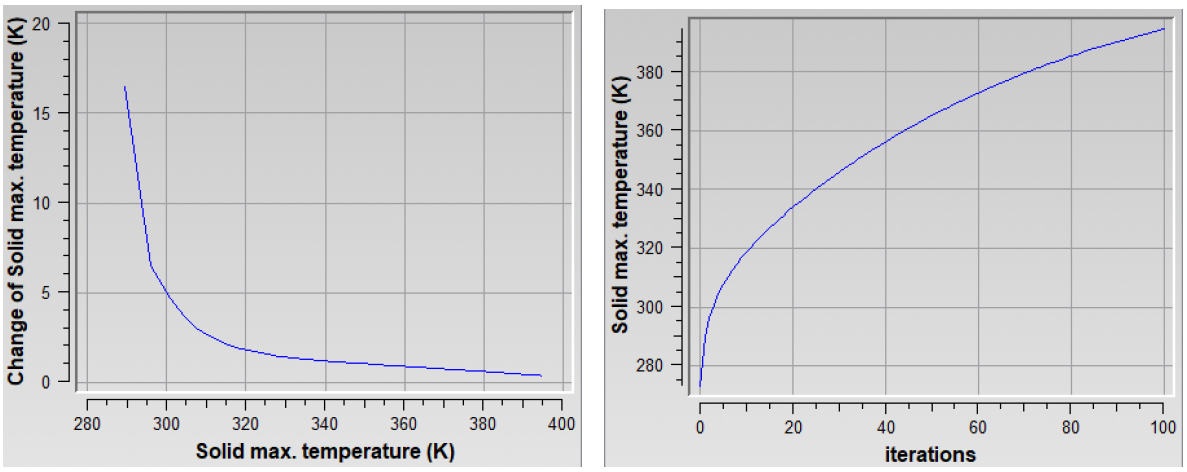


Figura 24: Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.001 m e 100 iterações, para parâmetros de módulo *CHT3D* distintos.

Considerando todos estes ajustes, na figura 25 é possível ver os resultados da quantidade de gelo associado a cada um dos tamanhos de elementos de malha analisados. É importante referir que à luz do que tinha sido proposto, relativamente à convergência do módulo *CHT3D*, foi feita uma análise para um tamanho de elemento muito reduzido, cerca de 0.0005 m, como é apresentado na tabela 11 e no gráfico da figura 25.

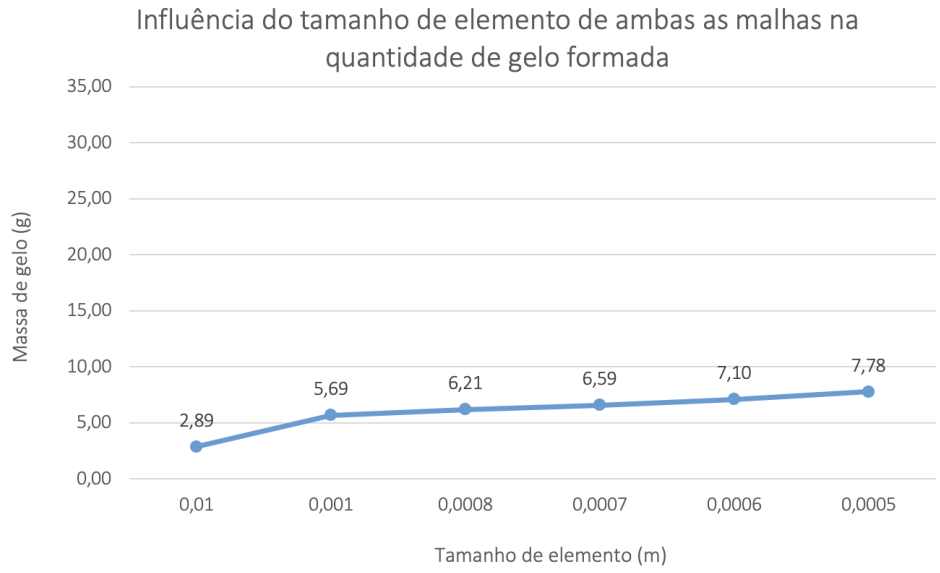


Figura 25: Relação entre o tamanho de elemento das malhas e a quantidade de gelo formada.

No Apêndice B é possível analisar as tabelas com os dados numéricos relativos a estas simulações.

Por análise gráfica da figura 25 é possível verificar um constante aumento da massa de gelo à medida que o tamanho de elemento diminui, isto é, que o número de elementos da malha de sólido aumenta.

É importante referir também que o aumento do número de elmentos da malha de sólido não é constante, sendo que é cada vez maior de uma simulação para outra, esta leitura permite ver que o aumento consecutivo da quantidade de gelo em cada uma das simulações torna-se muito reduzido. Esta análise pode ser feita por observação dos resultados numéricos relativos ao tamanho de elemento de 0.0007 m, 0.0006 m e 0.0005 m. Para uma diferença de cerca de 854 758 elementos da malha de sólido, isto é, uma diferença entre 0.0006 m e 0.0007 m de tamanho de elemento, verificou-se um aumento de 0.0005 kg de massa de gelo e para uma diferença de cerca de 1 781 910 elementos da malha de sólido, ou seja, uma diferença entre 0.0005 m e 0.0006 m de tamanho de elemento, registou-se um aumento de 0.0007 kg de massa de gelo. Ou seja, aumentos de massa de gelo bastante reduzidos.

Isto permite concluir que o tamanho de elemento que conduz a uma análise mais fiel e com menor esforço e tempo computacional é o de 0.0006 m. A utilização do tamanho de elemento de 0.0005 m não seria viável do ponto de vista computacional uma vez que a diferença a nível numérico da massa de gelo formada seria bastante reduzida para o esforço exigido.

A partir deste gráfico também é possível verificar a importância e a necessidade de ambas as malhas utilizadas terem uma densidade idêntica, isto é, o mesmo tamanho de elemento. Deste modo, conclui-se que a variação do tamanho de elemento de ambas as malhas tem grande influência nos resultados obtidos. Isto é percetível por comparação direta das figuras 23 e 25.

Relativamente à convergência do módulo *CHT3D* foram atingidos melhores resultados, como é possível ver na figura 26.

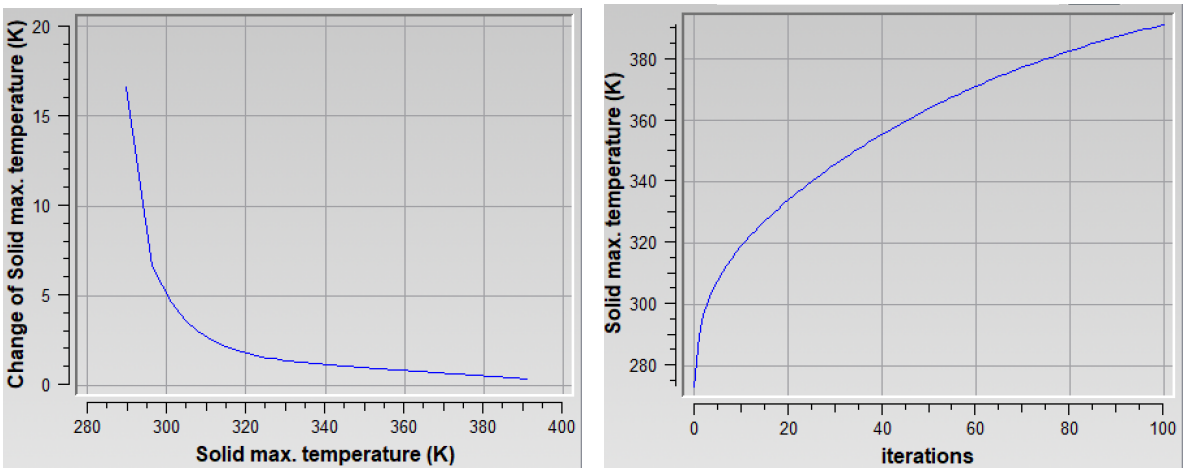


Figura 26: Relação entre a temperatura máxima atingida pelo sólido e a mudança de temperatura máxima do sólido (esquerda) e relação entre o número de iterações e a temperatura máxima do sólido (direita) - Para um tamanho de elemento de 0.0006 m e 100 iterações.

Por fim, considerando as conclusões retiradas, foi feita uma análise da qualidade de ambas as malhas consideradas relevantes para o estudo, isto é para um tamanho de elemento de 0.0006 m.

Esta análise passou pela avaliação do parâmetro para controlo da ortogonalidade da malha tetraédrica do sólido e fluido definida como ideal e pela análise de *Skweness*.

É relevante referir que a avaliação do parâmetro de ortogonalidade é descrita numa escala de 0 a 1, sendo que quanto mais alto é o valor melhor. Relativamente ao *Skewness*, o mesmo é traduzido numa escala de 0 a 1, sendo que quanto menor for o seu valor melhor é.

Na figura 27 é apresentada a ortogonalidade dos elementos da malha de fluido para um tamanho de elemento de 0.0006 m e na figura 28 a *Skewness* dos mesmos elementos.

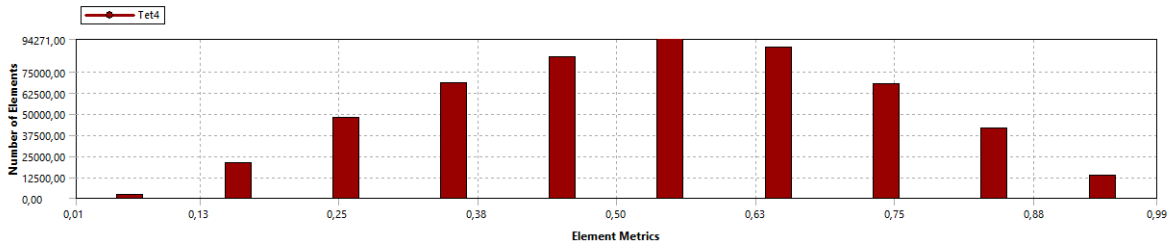


Figura 27: Ortogonalidade dos elementos de malha de fluido para uma tamanho de elemento de 0.0006 m.

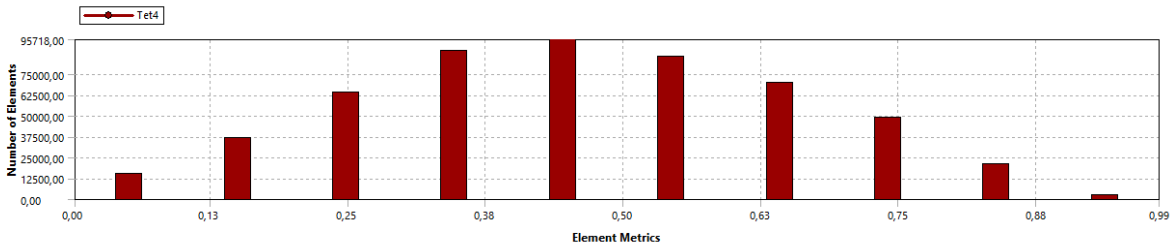


Figura 28: *Skewness* dos elementos da malha de fluido para um tamanho de elemento de 0.0006 m.

Relativamente ao parâmetro de ortogonalidade dos elementos de malha de fluído, a maioria dos elementos apresentam valores acima de 0.5 até 0.99, no entanto apresenta ainda alguns elementos com valores reduzidos.

Quanto à *Skewness* dos elementos é possível afirmar que a maioria deles apresenta valores abaixo de 0.5 até 0.0, ainda que existam alguns elementos com valores superiores.

Quanto à malha de sólido, na figura 29 é apresentada a ortogonalidade dos elementos da malha de sólido para um tamanho de elemento de 0.0006 m e na figura 30 a *Skewness* dos mesmos elementos.

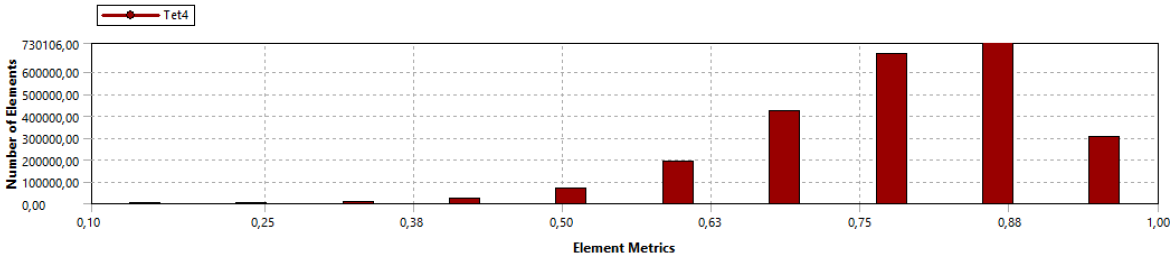


Figura 29: Ortogonalidade dos elementos de malha de sólido para uma tamanho de elemento de 0.0006 m.

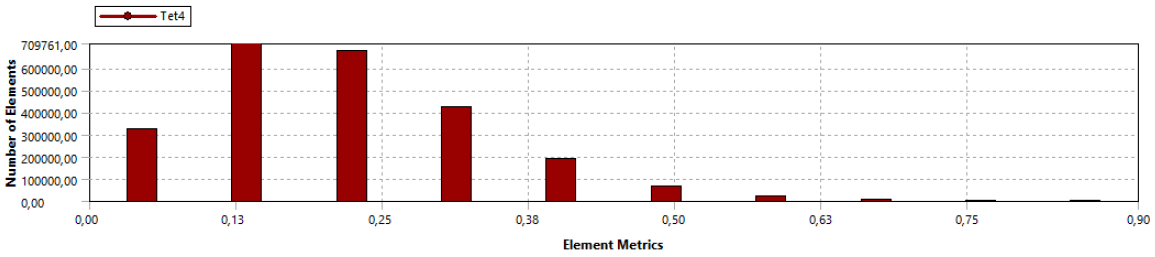


Figura 30: *Skewness* dos elementos da malha de sólido para um tamanho de elemento de 0.0006 m.

Relativamente ao parâmetro de ortogonalidade dos elementos de malha de sólido, a maioria dos elementos apresentam valores acima de 0.63 até 1.00, mantendo todos os seus elementos com valores superiores a 0.1. Relativamente à *Skewness* destes elementos é possível verificar que a sua maioria apresenta valores reduzidos, abaixo de 0.38 e que consegue manter todos os seus elementos com valores até 0.9.

Conclui-se que ainda que a densidade de elementos de ambas as malhas seja idêntica e que isso seja um ponto fundamental, a qualidade da malha de sólido é superior à malha de fluido. No entanto, apesar desta desigualdade de qualidade entre malhas é possível afirmar que os parâmetros analisados em ambas revelam a qualidade das mesmas.

É importante referir que apesar de apenas ter sido analisada uma geometria de sistema de aquecimento, todas as conclusões retiradas são aplicáveis às restantes geometrias propostas e otimizadas, dado que a área associada a cada uma delas é próxima.

4.6 Processo de otimização das geometrias dos sistemas de aquecimento

Considerando as conclusões retiradas anteriormente, nomeadamente ao tamanho de elemento de ambas as malhas mais indicado para realizar as simulações numéricas associadas a este projeto, iniciou-se a análise de diversas geometrias do *Heater* e sua posterior otimização.

Ao longo do projeto foram desenvolvidas algumas geometrias que poderiam ser analisadas, como é apresentado na figura 31.

No entanto, nem todas as geometrias inicialmente propostas seriam possíveis de serem testadas experimentalmente, como foi o caso da geometria 1.1 e 1.2, uma vez que do ponto de vista elétrico, nunca seria possível que as pistas horizontais de cada uma das geometrias fossem percorridas por energia elétrica.

Foram escolhidas apenas 3 das geometrias apresentadas, considerando a sua diferença geométrica e o interesse do seu estudo. Deste modo foram testadas apenas as geometrias apresentadas nas figuras 32.

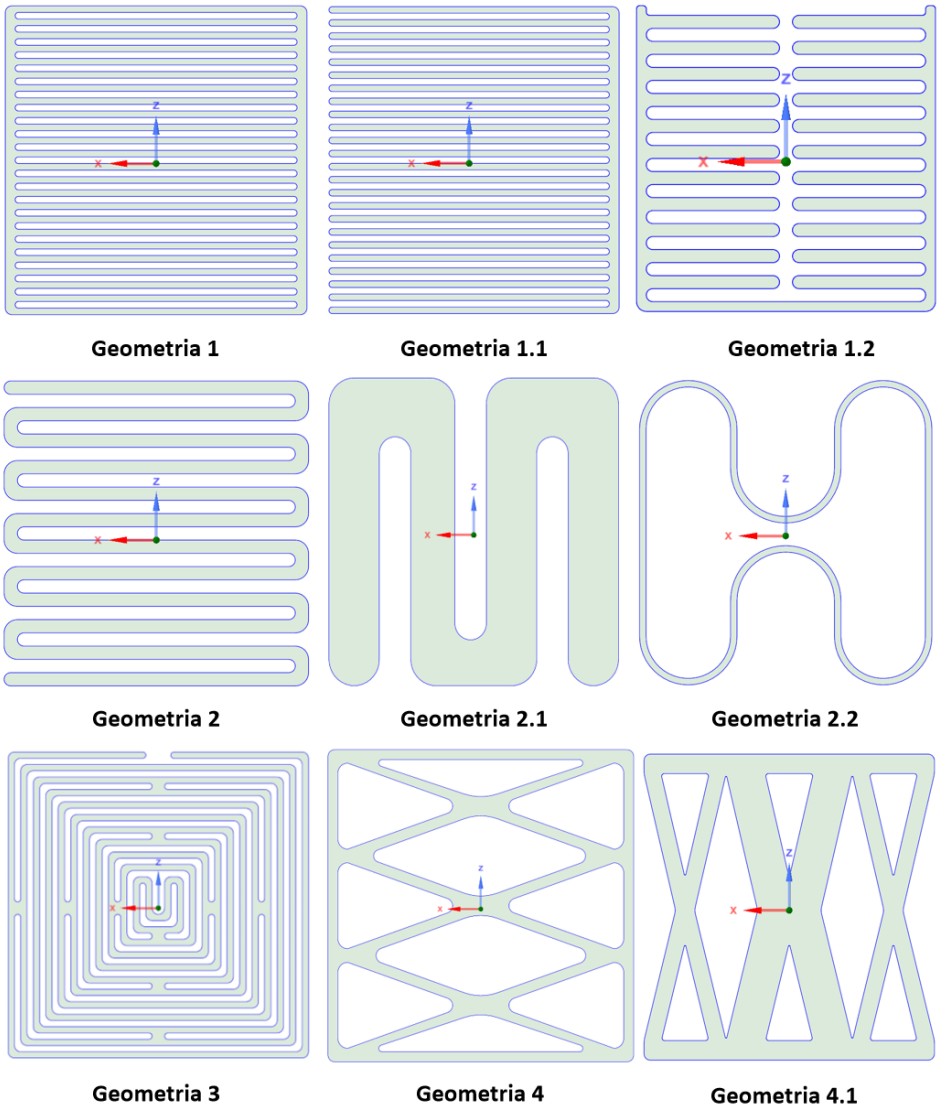


Figura 31: Geometrias inicialmente propostas para estudo.

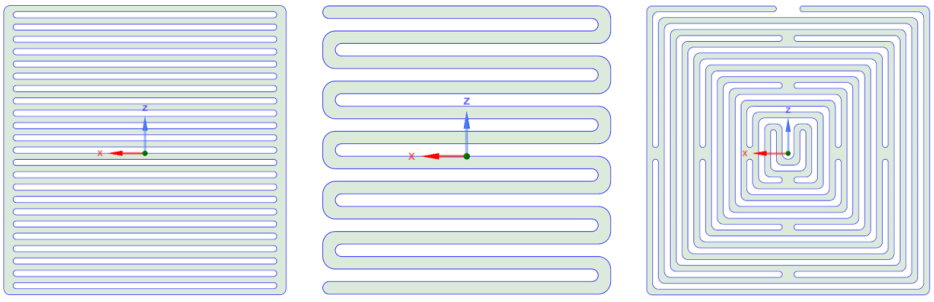


Figura 32: Geometrias analisadas - Geometria 1 (esquerda), Geometria 2 (centro) e Geometria 3 (direita).

É importante referir que a nível de análise numérica, nenhuma destas geometrias apresentava qualquer limitação. Contudo, a nível do teste experimental, algumas alterações tiveram que ser realizadas para que fosse possível a sua impressão e o correto funcionamento experimental destas geometrias. Foram impressas as geometrias apresentadas na figura 32 através do processo de Serigrafia, explicado no capítulo 2. Tanto a geometria 1 e 2 sofrem poucas ou nenhumas modificações relevantes, no entanto a geometria 3 sofreu várias alterações. Estas resultaram na geometria apresentada na figura 33, que foi impressa pelo mesmo método.

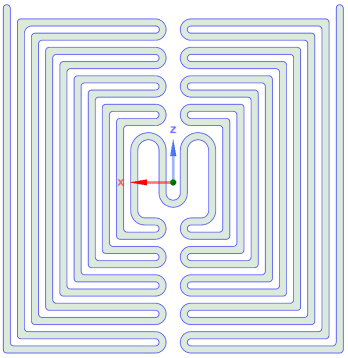


Figura 33: Geometria 3 modificada.

4.7 Processo de impressão

Foi utilizado o processo Serigrafia (*Screen Printing*), explicado no capítulo 2. A sua utilização deve-se à sua disponibilidade no CeNTI, à sua rapidez de impressão e à quantidade de amostras necessárias (produção em pequena escala).

Este processo foi realizado com recurso ao equipamento de impressão por Serigrafia - *Rocku Print* - apresentado na figura 34 e às ferramentas apresentadas na figura 35.

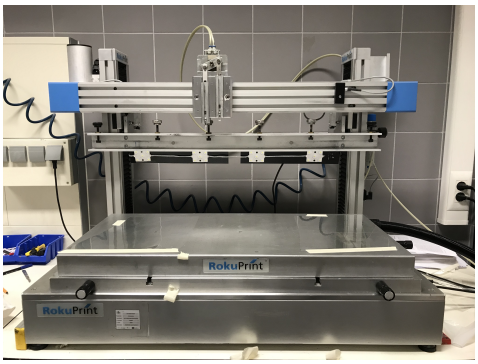


Figura 34: Equipamento de Serigrafia (*Screen Printing*).

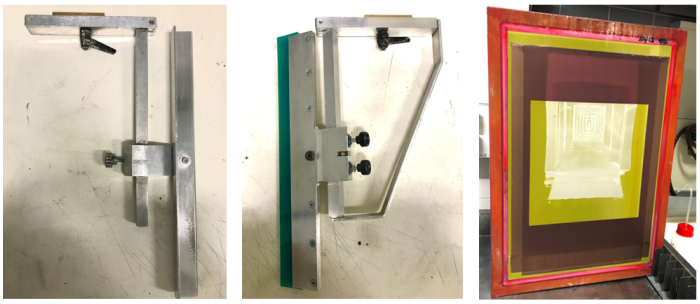


Figura 35: Ferramentas utilizadas no equipamento de impressão - Lâmina (esquerda), Racla (centro) e Quadro (direita).

Para a impressão dos circuitos, uma vez que o quadro não apresentava qualquer geometria pretendida para análise, foi fulcral fazer uma máscara por vinil e por isso, foi necessário cortar em Vinil, com recurso a uma impressora/cortadora *Roland*, as geometrias apresentadas e analisadas numericamente, para posteriormente, definir a geometria no quadro.

Algumas alterações tiveram que ser realizadas relativamente à sua geometria, de modo a garantir o seu correto funcionamento. Estas alterações são apresentadas no subcapítulo 4.6.

Posteriormente e com o objetivo de transferir estas geometrias para o quadro, utilizou-se papel transferência, como é apresentado na figura 36.

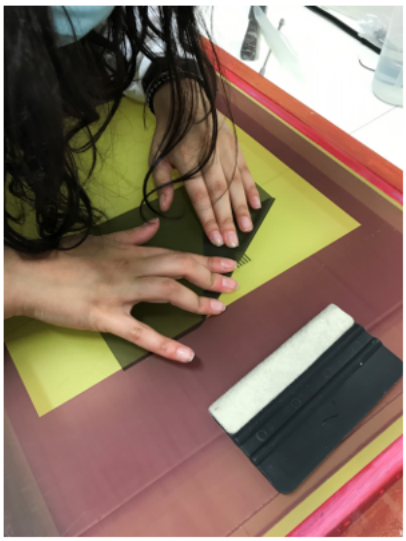


Figura 36: Transferência da geometria para o quadro.

Posteriormente removeu-se o Vinil não necessário da geometria, foi pintado todo

o quadro com uma solução aquosa ("Tinta azul") e por fim removeu-se o vinil que representava a geometria do circuito a imprimir, como é apresentado na figura 37.

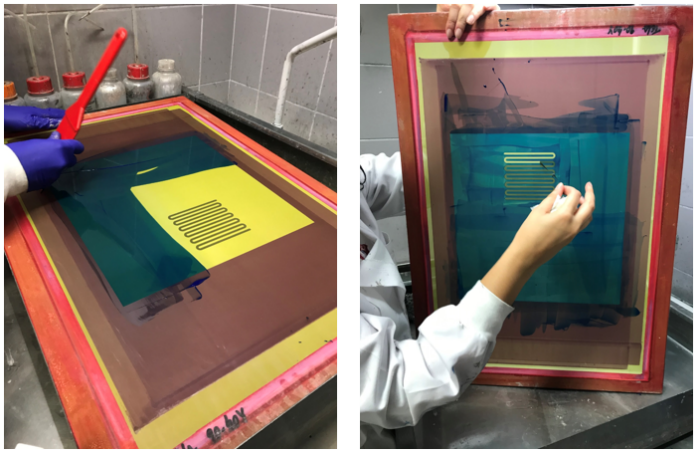


Figura 37: Cobertura do quadro com a solução aquosa (esquerda) e remoção do vinil (dirieita).

Por fim é colocado o quadro no equipamento de impressão, sendo que deve ficar o mais paralelo possível à plataforma de impressão. Para tal é utilizado um nível de modo a garantir essa condição. É também colocada a Racla e a lâmina. O posicionamento relativo destas ferramentas no equipamento utilizado é apresentado na figura 38.

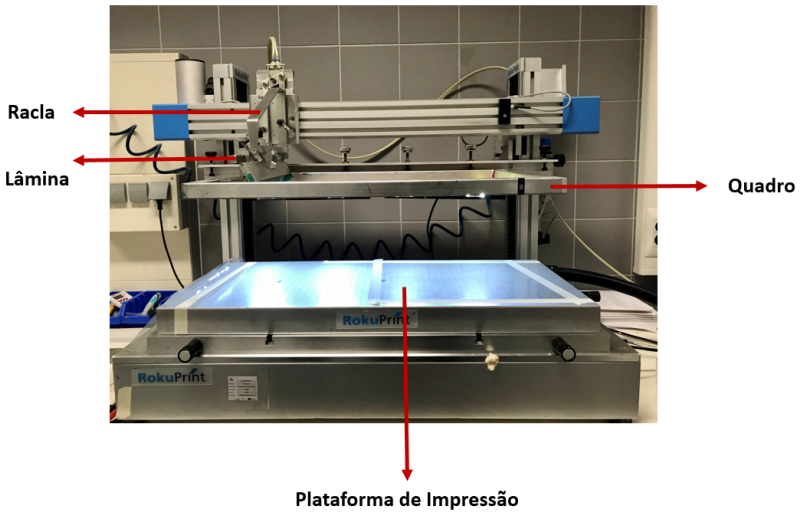


Figura 38: Posicionamento dos equipamentos (Quadro, racla e lâmina) no equipamento de impressão.

Posteriormente são definidos 3 parâmetros de funcionamento da impressão:

- Altura de Impressão (*Snap-off*): corresponde à distância entre o quadro e a plataforma de impressão, no momento de impressão.

- Posição onde a lâmina pára de espalhar o filme: deve ser tal que garanta a cobertura completa por filme da geometria do quadro.

- Posição em que a racla deixa de exercer pressão sobre a malha do quadro: deve ser tal que garanta a sua passagem sobre toda a geometria do quadro e mais um pouco, para garantir a aderência do filme ao substrato, na plataforma de impressão.

Esta definição deve ser feita com a racla e a lâmina a uma altura tal da malha do quadro, que não exerça qualquer esforço sobre a mesma.

Depois desta definição a lâmina é possicionada de modo a fazer pressão sobre a malha do quadro e a racla a uma altura tal que permita a impressão do filme com as características pertendidas.

Por fim, é colocado o filme sobre a malha do quadro, à frente da racla, como é possível ver na figura 39 e colocado um substrato de PC sobre a plataforma de impressão.

Nesta análise experimental foram utilizadas 2 tipos de filmes, prata e carbono, sendo que tanto a geometria 2 e 3 foram impressas em prata e a geometria 1 foi impressa em carbono (pistas horizontais) e prata (pistas verticais).

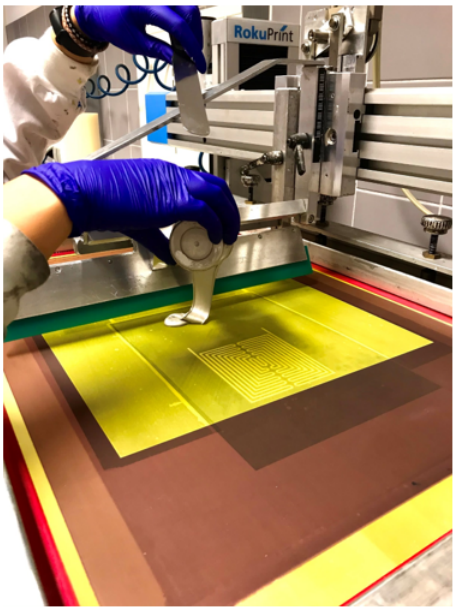


Figura 39: Colocação do filme de prata sobre a malha.

Deste modo, após iniciar o processo de impressão, a lâmina espalha a tinta sobre a malha e sobre a geometria no quadro, depois o quadro desce até a altura de impressão e por fim a racla exerce pressão sobre a malha e pressiona a tinta a passar pela mesma, para o substrato. Na figura 40 é possível ver algumas amostras impressas em PC, com prata e carbono.

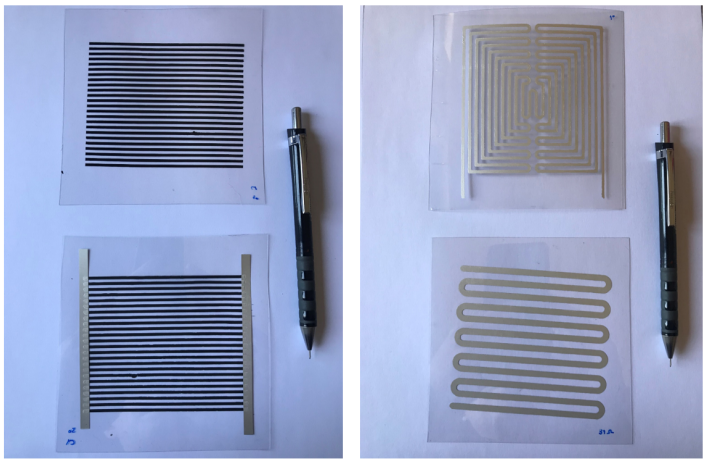


Figura 40: Exemplos de amostras impressas utilizando carbono e prata em PC.

Como foi explicado anteriormente, neste processo de impressão é necessário um processo de cura. Neste caso foi feito um pré aquecimento com recurso a um secador e depois colocaram - se as amostras impressas numa estufa durante 10 minutos a 110 ^oC.

Nos fim da impressão e da escolha de 3 amostras para cada geometria, foi feita a medição da resistência do circuito, com recurso a um multímetro.

4.8 Preparação dos circuitos elétricos para carcaterização térmica

Após a impressão dos circuitos no substrato pretendido, foi necessário preparar as pistas impressas para posterior análise da distribuição de temperaturas nas mesmas e avaliação dos *inputs* necessários dar nos ensaios na câmara climática, com recurso a uma câmara termográfica.

Deste modo, utilizou-se um equipamento de crimpagem para colocar um crimpo nas extremidades de cada um dos circuitos impressos.

Este processo tem como finalidade ligar os fios elétricos ao circuito impresso. É possível fazer o mesmo processo apenas com recurso a soldadura direta, noutras cir-

cunstâncias. No entanto, neste caso em específico, tal não é recomendado, uma vez que ao soldar diretamente no circuito o fio poderia tornar frágil o contacto que estava a ser criado ou simplesmente derreter o circuito impresso devido às elevadas temperaturas associadas.

Este processo de crimpagem foi feito diretamente sobre a tinta do circuito impresso em todas as geometrias com excepção da geometria 1.

No caso da geometria 1, onde foram utilizados 2 tipos de filmes, carbono e prata, foi importante colocar fita de cobre sobre o filme de prata. A colocação da fita de cobre é necessária para garantir que não se verifiquem gradientes de temperatura ao longo destas pistas. O cobre vai permitir que a prata receba energia de forma igual em todos os pontos, isto é, verifica-se uma condução uniforme entre o cobre e a prata.

Na figura 41 é possível ver a colocação da fita de cobre sobre as pistas verticais impressas em prata.

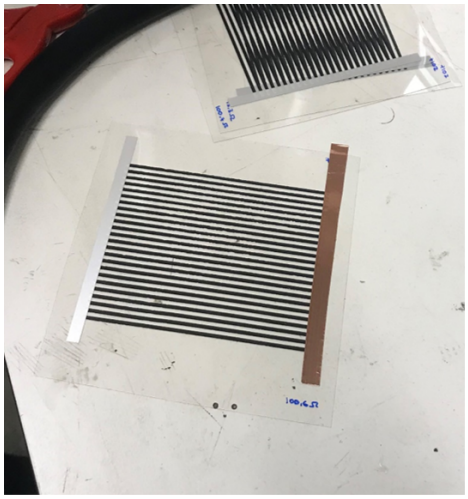


Figura 41: Colocação de fita de cobre sobre a prata da geometria 1 impressa.

Neste caso, não foi colocado nenhum crimpo para estabelecer a ligação entre o circuito e o fio elétrico, foi feita soldadura direta do fio no cobre.

Na figura 42 é possível ver o equipamento utilizado para colocar o crimpo no circuito (esquerda) e alguns crimpos (direita), na figura 43 é possível ver o processo de crimpagem (esquerda) e o posicionamento do crimpo no circuito impresso (direita).



Figura 42: Equipamento de crimpagem (esquerda) e exemplos de crimpos (direita).

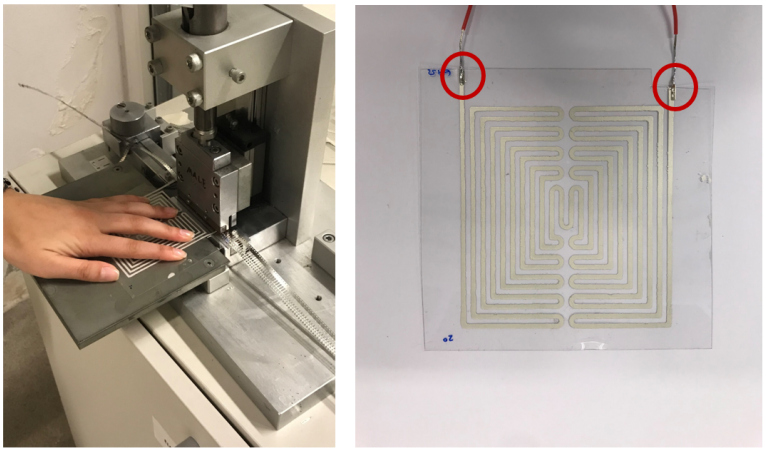


Figura 43: Processo de crimpagem (esquerda) e posicionamento do crimpo no circuito impresso (direita).

Depois procedeu-se à colocação do fio elétrico nos circuitos impressos. Os fios utilizados são de cobre estanhado, revestidos com PVC, cujas temperaturas de funcionamento não devem ser inferiores a -30 ^oC.

Foi necessário descarnar o fio em ambas as extremidades e posteriormente soldar o mesmo ao crimpo, no caso da geometria 2 e 3, na geomertria 1 foi feita soldadura direta na fita de cobre, como é possível na figura 44.

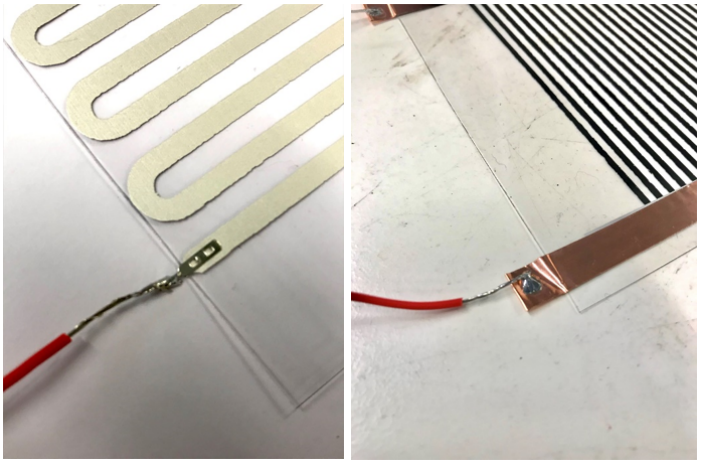


Figura 44: Método utilizado nas diferentes geometrias para fazer o contacto do circuito com o fio elétrico (Geometria 2 (esquerda) - soldadura no crimpo e Geometria 1 (direita) - soldadura direta sobre a fita de cobre).

Na figura 45 é possível ver a soldadura do fio ao crimpo. Nesta soldadura foi utilizado estanho.

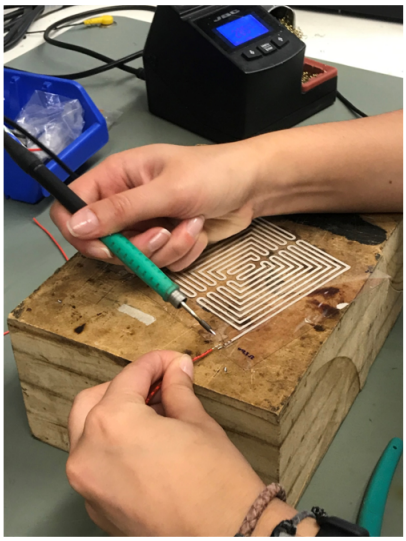


Figura 45: Processo de soldadura dos fios elétricos aos crimpos nos circuitos impressos.

4.9 Caracterização térmica dos circuitos

Nesta etapa do processo foi feita a caracterização dos circuitos impressos por Serigrafia, isto é, determinação dos *inputs* necessários, como é o caso da tensão e da intensidade de corrente a fornecer ao circuito aquando do teste e análise na câmara

climática, bem como o fluxo de calor real associado a cada circuito e, por fim, análise da distribuição de temperaturas ao longo de todo o sistema.

Para tal foi utilizado um *display* (figura 46 (esquerda)), uma fonte de tensão (figura 46 (centro)) e uma câmara termográfica (figura 46 (direita)).

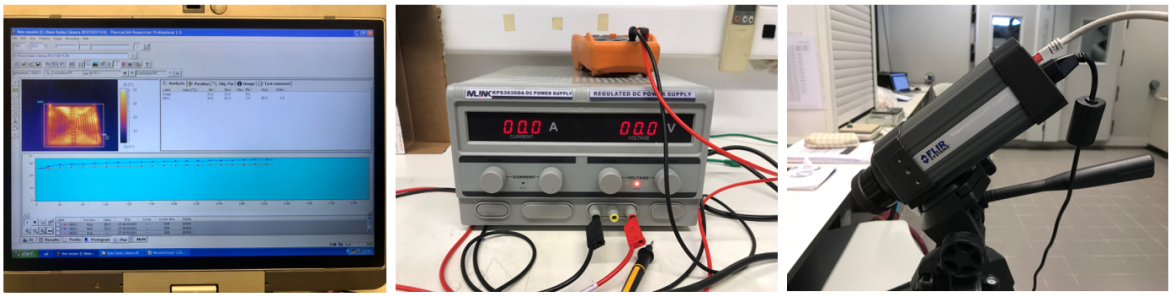


Figura 46: Equipamentos necessários na caracterização térmica - *display* (esquerda), fonte de tensão (centro), câmara termográfica - FLIR A320 (direita)

A câmara termográfica funciona de acordo com o princípio da termografia, o que lhe permite fazer uma leitura da radiação infravermelha emitida por um corpo e posteriormente essa informação é convertida num ficheiro digital. Com o auxílio a um *software* é possível ler as temperaturas verificadas na área em análise. Na tabela 12 é possível ver as especificações de funcionamento da câmara termográfica - FLIR A320.

Tabela 12: Especificações técnicas da câmara termográfica.

Propriedades	**Valor**
Temperatura	-20 ^oC a 120 ^oC $\pm$ 2 ^oC

Considerando que todos os corpos a uma dada temperatura emitem radiação, este processo de análise torna-se dependente de vários fatores, desde da quantidade de corpos e da sua emissividade, da temperatura ambiente, da humidade relativa, da distância da câmara ao circuito em análise, entre outros fatores.

Na figura 47 é possível ver a montagem de todo o *set up* de caracterização térmica dos circuitos.

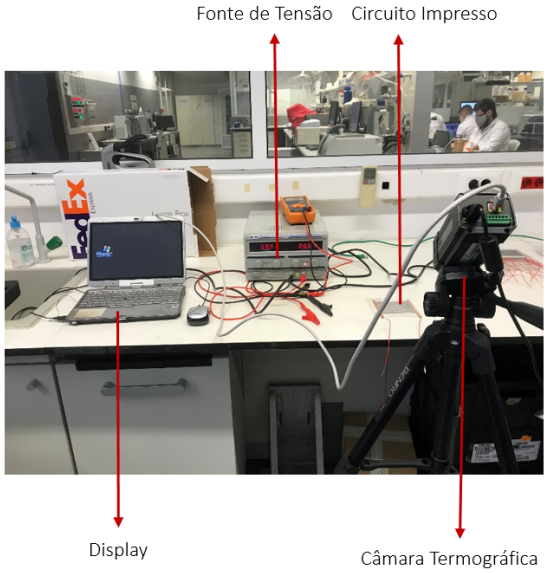


Figura 47: *Set up* de caracterização térmica dos circuitos.

Primeiramente, é feita a montagem de todo o *set up*, incluindo todas as ligações necessárias ao funcionamento e transferência de informação entre a câmara termográfica com o *display*. Posteriormente, é posicionado o circuito impresso a analisar. Em seguida, é ligada a fonte de tensão ao circuito e é iniciada a análise termográfica do circuito em questão.

Para cada geometria foi necessário fazer um varrimento inicial da variação da temperatura com a tensão fornecida ao sistema, isto é, verificar que tensão deveria ser fornecida ao sistema no instante incial, para que a mudança de temperatura não fosse demasiado lenta e, começar a ser registada uma variação da mesma com a tensão fornecida.

Após esta determinação para cada geometria iniciou-se a análise termográfica, isto é, a variação da temperatura com a tensão fornecida ao sistema. No instante inicial, foi fornecida a tensão determinada no varrimento e a partir desse instante deixou-se estabilizar a temperatura verificada e posteriormente, mais ou menos de 3 em 3 minutos, aumentou-se a tensão em 1V até que a temperatura máxima registada fosse cerca de 80 ^oC. Este patamar de temperatura foi estabelecido como medida de segurança da integridade do circuito e do susbtrato, uma vez que o PC apresenta uma temperatura de transição próxima dos 140 ^oC.

A cada 3 minutos foi registada a tensão, a intensidade de corrente e a hora a que se verificou a mudança de tensão.

É importante referir que no ínicio de cada ensaio foi registado o valor da temperatura ambiente da sala onde foram realizados os ensaios, bem como a humidade relativa, uma vez que estes parâmetros tem grande influência nos resultados obtidos.

Relativamente à emissividade foi considerado que todos os corpos envolventes teriam uma emissividade de aproximadamente 0.96, o que permite afirmar que todos eles refletem tudo o que recebem e por isso terão pouca ou nenhuma influência nesta análise, tornando, teoricamente, as condições de análise ideais. Quanto à distância entre a câmara e o circuito em análise foi definido cerca de 0.5m.

No fim de cada análise termográfica foi medida a resistência do circuito impresso com o objetivo de verificar se foi alterado o valor da resistência anteriormente medida aquando da impressão dos mesmos. É, deste modo, expectável uma ligeira variação deste valor mas não algo muito elevado, caso contrário conclui-se que se verificou oxidação dos elementos do circuito impresso, nomeadamente da tinta de prata utilizada provocado pela variação da temperatura.

4.10 Análise na câmara climática

Após a caracterização térmica e por isso, determinação da tensão a fornecer aos cirucitos analisados para atingir uma certa temperatura foi feito um teste dos circuitos impressos funcionando como sistema de anti-gelo e degelo.

Deste modo, foi necessário proceder à montagem da amostra final de acordo com o modelo inicial, estabelecido e utilizado nas simulações numéricas. Isto é, o acoplamento do substrato de PC, onde foi impresso o circuito ao corpo "Lente".

Ao contrário daquilo que foi definido nas simulações numéricas foi utilizado PMMA (Polimetilmetacrilato, comumente denominado de Acrílico) como corpo "Lente"como é possível ver na figura 48.

Em algumas amostras este acoplamento entre o PC e o PMMA foi feita com recurso a PET-G e outras com fita-cola, como é apresentado na figura 48. É também importante referir que devido a este isolamento não foi possível evitar uma camada fina de ar entre os substratos utilizados, que não foi considerada nas simulações numéricas realizadas previamente.

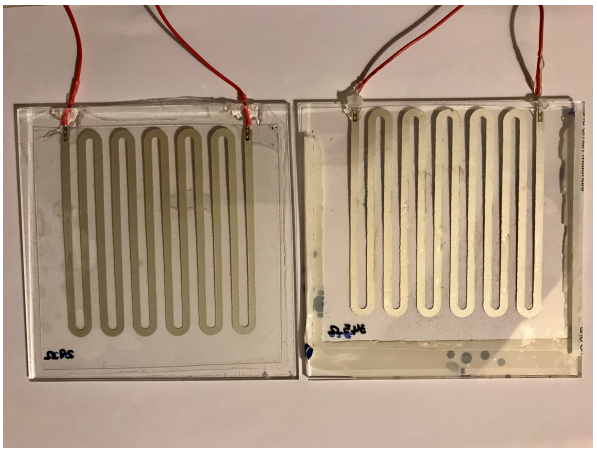


Figura 48: Preparação final das amostras de acordo com o modelo físico estabelecido (Base (PC) - Sistema de aquecimento - Lente (PMMA)), com diferentes acoplamentos - PET-G (esquerda) e Fita-cola (direita).

Com o objetivo de proteger os fios elétricos e os contactos dos circuitos impressos, os crimpos colocados e o fio elétrico no contacto foram isolados com recurso a silicone.

Após esta preparação foram realizados os ensaios na câmara climática. Foi definida uma temperatura de -10 ^oC, foi registada a humidade relativa da mesma, uma vez que era difícil de a estabilizar dada a recorrente abertura da mesma devido ao procedimento a realizar para testar as amostras como sistemas de anti-gelo e degelo.

Considerando os ensaios para testar o circuito impresso como um sistema de anti-gelo e degelo foi necessário, inicialmente arrefecer a câmara climática até à temperatura de ensaio, demorou cerca de 20 a 30 minutos.

Todas as amostras a testar como sistema de degelo e anti-gelo foram pesadas numa balança com uma precisão à quarta casa decimal. No caso dos ensaios de sistemas de degelo foi utilizado um volume de controlo (VC) enquanto que nos ensaios dos sistemas de anti-gelo este não foi utilizado.

Estes ensaios foram realizados numa câmara climática - *Fitoclima-24000 EDTU30*, cujas condições de funcionamento são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13: Especificações técnicas da câmara climática.

Propriedades	**Valor**
Temperatura	-20 ^oC a 40 ^oC $\pm$ 1 ^oC
Humidade	30% a 70% $\pm$ 4%

Na figura 49 é possível ver um exemplo do *set up* utilizado nos ensaios na câmara

climática.

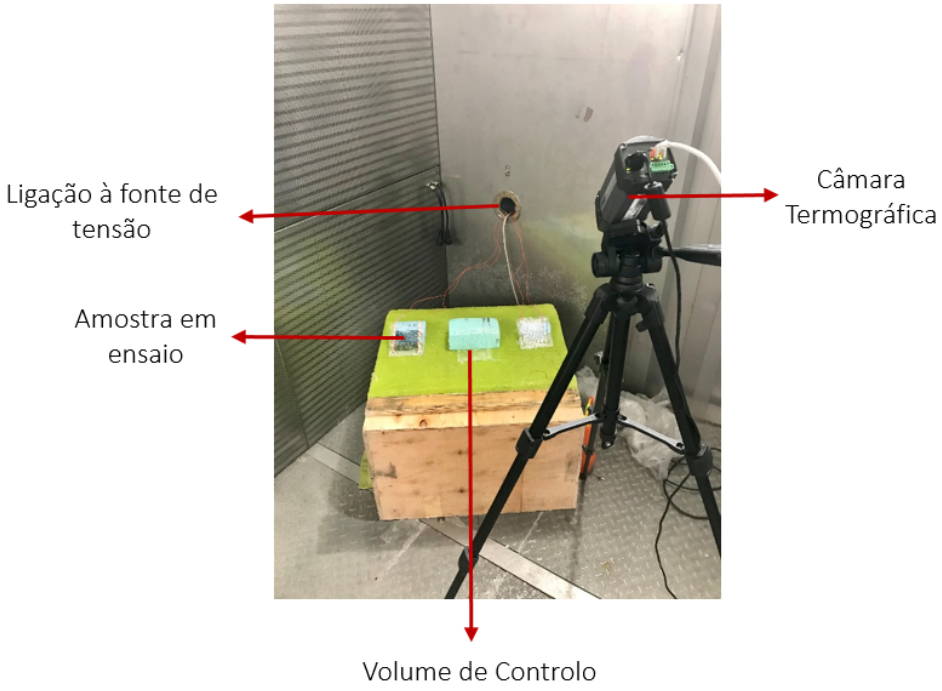


Figura 49: *Set up* dos ensaios dos sistemas de degelo e anti-gelo.

Para ambos os ensaios, isto é, tanto para os ensaios dos sistemas de degelo como anti-gelo, foi utilizado uma superfície para colocar as amostras, uma câmara termográfica, uma fonte de tensão e dois borrifadores de água com diferentes aberturas, ou seja, associados a tamanhos de gota diferentes.

Inicialmente, antes de se iniciar qualquer dos ensaios foi feito um ensaio para verificar qual a técnica que se traduzia numa quantidade de gelo significativa à superfície das amostras. Os resultados referentes a esta análise são apresentados no capítulo 5.2.3.

O procedimento consiste em borrifar durante 60 minutos as amostras e o volume de controlo de forma descontínua (1ª técnica analisada) ou de forma contínua (2ª técnica analisada). E no fim, deixar as amostras durante 5 minutos na câmara climática, com o objetivo de conseguir solidificar as últimas gotas de água borrifadas manualmente à superfície das amostras e do volume de controlo.

Considerando o procedimento nos ensaios do sistemas de anti-gelo, é pesada a amostra em análise antes de iniciar o ensaio. Posteriormente, esta é colocada na câmara climática com o objetivo de atingir uma temperatura superficial próxima da temperatura da câmara climática.

Foi definida a tensão a fornecer ao sistema aquela que no ensaio de caracterização térmica permitisse à amostra atingir aproximadamente 60 ^oC de temperatura máxima.

É feita a ligação do circuito à fonte de tensão e iniciado o funcionamento do sistema impresso para anti-gelo. Com recurso à câmara termográfica é novamente registada a evolução da temperatura superficial da amostra em análise.

Durante o ensaio é necessário borrifar água manualmente, durante 30 minutos. No fim, deixa-se repousar a amostra em estudo, durante 5 minutos, na câmara climática. Depois a amostra é pesada e registada a sua massa.

Quanto aos ensaios dos sistemas de degelo e considerando que é necessário a formação de gelo à superfície da amostra em análise e do volume de controlo, antes de se iniciar esta formação, as amostras são pesadas e novamente colocadas na câmara climática.

É iniciado o procedimento de formação de gelo, que consiste em aplicar a técnica definida inicialmente, borrifando as amostras durante 1 hora e deixar repousar 5 minutos no fim com o objetivo das últimas gotas de água depositadas sobre as amostras congelem.

Posteriormente, as amostras são pesadas bem como o volume de controlo e depois colocadas novamente na câmara climática, para que a quantidade de gelo que tenha derretido durante o processo de pesagem seja estabelecida novamente, ainda que, em alguns casos, esta recuperação seja parcial.

Depois, é feita a ligação do circuito à fonte de tensão. É definida a tensão a fornecer a cada circuito considerando os resultados obtidos com a caracterização térmica dos mesmos. Ou seja, é fornecida a tensão que no ensaio de carcaterização térmica permitisse à amostra atingir uma temperatura máxima próxima de 60 ^oC.

Com recurso à câmara termográfica é registada a evolução da temperatura superficial das amostra em análise, durante o ensaio de degelo, bem como o tempo que o sistema demora até inciar o degelo, caso tal se verifique.

Depois, com o circuito ligado à fonte de tensão, foi necessário, durante 30 minutos, borrifar água manualmente sobre as amostras e o volume de controlo.

Passados 30 minutos de ensaio e com o sistema ainda ligado, deixou-se as amostras na câmara climática sem borrifar água durante 5 minutos, de modo a que as últimas gotas de água tivessem tempo para formar mais gelo ou verficar que as mesmas não formavam gelo. No fim, procedeu-se à pesagem da amostra e do volume de controlo.

É importante referir que ao longo de todos os ensaios, tanto os ensaios dos sistemas de degelo como de anti-gelo, nem sempre foram utilizados os mesmos borrifadores de

água. A direção em que foi borrifada água, na maioria dos ensaios, foi feita de forma lateral em relação às amostras.

Outro fator a considerar é uma etapa intermédia, que apenas acontece em alguns ensaios, que consiste num repouso de 1.5h das amostras na câmara climática, após a etapa de formação de gelo, devido à falta de disponibilidade humana, nesse periodo de tempo.

5 Resultados e discussão

5.1 Resultados numéricos

Numa primeira fase do processo de análise dos resultados obtidos através das simulações numéricas realizadas para as condições tipo I e II, para cada uma das geometrias propostas, foi avaliada a quantidade de gelo associada a cada uma destas geometrias para as diferentes condições fronteira consideradas.

É importante referir que a análise feita anteriormente, explicada no capítulo 4.5, referente à análise de malha, considerou apenas a geometria 1, condições tipo I (apresentadas na tabela 9), no entanto a velocidade utilizada foi cerca de 10 $m \cdot s^{-1}$.

Nesta etapa do processo de teste e análise das geometrias e da influência da mesma na não formação de gelo à superfície do corpo, foram realizadas simulações numéricas para os dois tipos de condições (I e II) para a velocidade de 5 $m \cdot s^{-1}$, como foi definido incialmente, para cada uma das geometrias selecionadas e modificadas.

No Apêndice C é possível analisar as tabelas que contêm todos os resultados associados a estas simulações numéricas.

Na figura 50 são apresentados os resultados da quantidade de gelo formada à superfície, para cada geometria e diferentes condições fronteira.

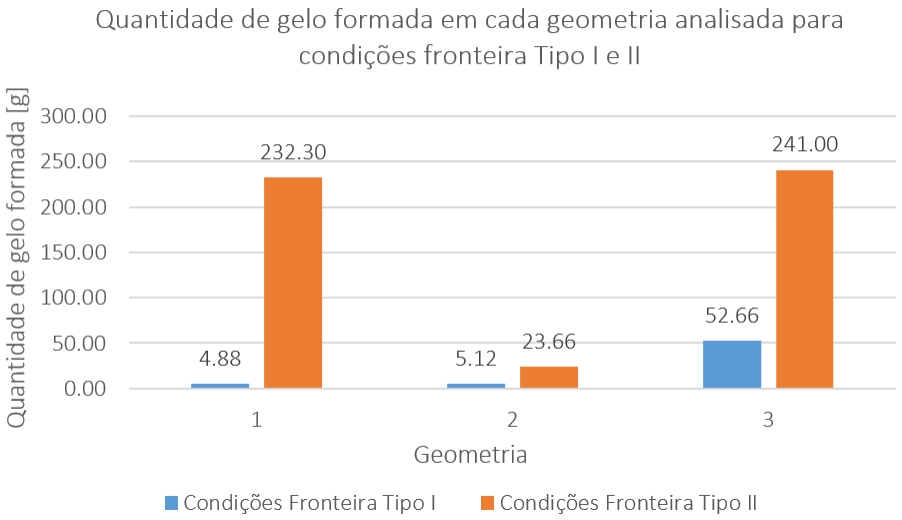


Figura 50: Quantidade de gelo formada (g) associada a cada geometria para cada condição fronteira (Tipo I e II).

Analisando apenas os resultados obtidos pelas simulações numéricas referentes à

quantidade de gelo formada para cada tipo de condição fronteira e cada geometria, conclui-se que de uma maneira geral as condições tipo II estão associadas a maiores quantidades de gelo formadas independentemente da geometria, como seria expectável, uma vez que são condições fronteira associadas a condições atmosféricas mais rigorosas.

Considerando apenas as condições tipo I, a geometria 1 está associada a um valor menor da quantidade de gelo produzido, seguindo a geometria 2 e posteriormente a geometria 3. Deste modo, considerando a geometria 1 como aquela que apresenta melhor desempenho em termos de evitar a produção e acumulação de gelo à superfície de um equipamento, a quantidade de gelo associada à geometria 2 é cerca de 1.1 vezes superior à quantidade gelo associada à geometria 1, enquanto que a quantidade de gelo associada à geometria 3 é aproximadamente 10.8 vezes superior à quantidade associada à geometria 1.

Nas condições fronteira tipo II, já não se verifica o mesmo padrão, sendo que a geometria 2 está associada a menores produções de gelo à superfície, seguindo a geometria 1 e depois a geometria 3. Deste modo, considerando a geometria 2 como aquela que apresenta melhor desempenho em ambientes com condições próximas das condições tipo II é possível afirmar que a quantidade de gelo associada à geometria 1 é cerca de 9.8 vezes superior à quantidade de gelo associada à geometria 2, quanto à geometria 3, a quantidade de gelo formada é 10.2 vezes superior à quantidade de gelo formada à superfície da geometria 2.

De um modo geral, e considerando os valores apresentados e a análise feita, selecionando apenas uma geometria "ideal" para qualquer tipo de condição fronteira, a geometria 2 apresenta o melhor desempenho em ambas as condições, como um sistema de anti-gelo.

5.2 Resultados Experimentais

Como foi sendo explicado ao longo do capítulo 4, os trabalhos experimentais foram feitos em várias etapas, sendo que todas elas tiveram influência na análise final relativa à eficácia do sistema de anti-gelo e degelo produzido.

5.2.1 Impressão dos circuitos por serigrafia (*Screen Printing*)

Para testar experimentalmente as geometrias propostas para o sistema de aquecimento a utilizar no sistema de anti-gelo e degelo, foi necessário a impressão das mesmas e a sua avaliação visual.

A resolução, uniformidade e qualidade do circuito impresso está diretamente dependente da abertura da malha utilizada, da qualidade e resolução da máscara usada, na pressão da racla sobre o filme, nas características do filme utilizado, da aderência do mesmo ao substrato utilizado e do processo de cura.

Considerando todos estes aspetos que influenciam a qualidade do circuito e a sua eficácia, foi necessário a avaliação minuciosa de cada umas das amostras impressas. Alguns defeitos foram identificados, sendo que os mais comuns eram o filme impresso começar a quebrar (figura 51 (esquerda)), falhas de filme ao longo do circuito impresso (figura 51 (centro)), excesso de filme ou acumulação do mesmo em algumas regiões (figura 51 (direita)) ou não uniformidade da quantidade de filme impresso ao longo do circuito, provocado pelo mau posicionamento da racla em relação ao quadro.

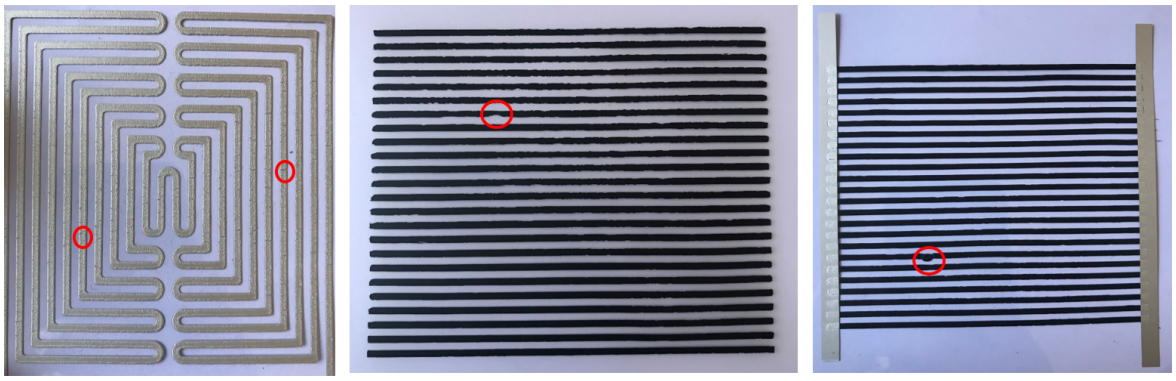


Figura 51: Exemplos de alguns defeitos identificados nas amostras impressas.

Posteriomente à análise visual das amostras impressas foi feita uma seleção de 3 amostras para cada geometria. Mediu-se a resistência do filme associada a cada uma das 3 amostras selecionadas para cada geometria impressa. Na tabela 14 é possível analisar o valor da resistência do filme para cada uma das geometrias.

Considerando a equação 3.12 e 3.13 apresentada no capítulo 3 é expectável que a geometria 1 apresente valores de resistência bastante mais elevados do que as restantes resistências. Estes valores mais elevados estarão, de acordo com a lei de Ohm apresentada na equação 3.8, no capítulo 3, associados a valores de tensão imposta ao sistema mais elevados, como será visto no subcapítulo seguinte.

Tabela 14: Resistência de filme dos circuitos impressos por Serigrafia.

Geometria	**Material**	**Resistência do Filme (Ω)**	**Média (Ω)**
Geometria 1	Prata e Carbono	100.7	98.2
		93.3	
		100.6	
Geometria 2	Prata	31.0	29.7
		34.5	
		29.0	
Geometria 3	Prata	72.2	70.3
		69.5	
		69.0	

5.2.2 Caracterização térmica dos circuitos impressos

Nesta etapa foi realizada a análise termográfica de cada uma das 3 amostras de cada geometria.

Tal como foi explicado no subcapítulo 4.8 foi fulcral determinar que tensão deveria ser fornecida ao sistema num primeiro instante do ensaio, de modo a evitar fornecer uma tensão muito reduzida, aumentando o tempo necessário para realizar o ensaio, ou evitar fornecer uma tensão tão elevada que poderia pôr em causa o bom funcionamento do sistema. Na tabela 15 é possível verificar a tensão inicial fornecida a cada geometria após a realização do varrimento inicial.

Tabela 15: Tensão inicial determinada e imposta a cada geometria.

Geometria	**Tensão Inicial (V)**	**Intensidade de Corrente (A)**
1	15	0.2
2	10	0.3
3	12	0.2

Após esta análise, para cada um dos ensaios de cada geometria foi registada a temperatura ambiente e a humidade relativa, como é apresentada na tabela 16, uma vez que estes são fatores influenciadores do ensaio de caracterização térmica.

Tabela 16: Condições ambientes associadas a cada ensaio da geometria 1, 2 e 3.

Geometria	**Amostra**	**Resistência do Filme (Ω)**	**Temperatura Ambiente (^oC)**	**Humidade Relativa (%)**
Geometria 1	1	100.7	22.9	36.1
	2	93.3	23.2	42.4
	3	100.6	22.4	53.8
Geometria 2	1	31.0	23.3	30.8
	2	34.5	23.4	41.9
	3	29.0	21.5	54.6
Geometria 3	1	72.2	23.4	42.0
	2	69.5	20.9	59.1
	3	69.0	22.0	53.9

Geometria 1 - Amostra 1

O primeiro ensaio é referente à amostra 1 (100.7 Ω) da geometria 1, foi fornecida uma tensão incial de 15 V ao sistema, sendo a temperatura média inicial de 23.7 ^oC e a temperatura máxima inicial de 26.1 ^oC. Para esta tensão inicial verificou-se um aumento de 21 ^oC (26.1 ^oC - 47 ^oC) da temperatura máxima e 3.5 ^oC (23.7 ^oC - 27.1 ^oC) da temperatura média.

Num intervalo médio de 3 minutos verificou-se um aumento médio da temperatura máxima de 3.9 ^oC e um aumento médio da temperatura média de 0.7 ^oC, a cada aumento de tensão. É possível afirmar que a temperaura máxima sofre maior variação quando é aplicada uma tensão de 19 V, variando 9.5 ^oC (54 ^oC- 63.5 ^oC), a menor variação registou-se imediatamente a seguir aos 20 V, onde se verificou uma variação de 2.9 ^oC (63.4 ^oC - 66.3 ^oC). Quanto à temperatura média foi registada maior variação quando foi fornecida uma tensão de 19 V, fazendo-a variar cerca de 1 ^oC (28.8 ^oC-29.8 ^oC) e a sua menor variação foi registada no momento em que foi fornecida uma tensão de 16 V, cerca de 0.4^oC (27.1 ^oC - 27.5^oC).

No global, a temperatura máxima variou 53.9 ^oC (26.1 ^oC - 80^oC) e a temperatura média variou 8.8 ^oC (23.7 ^oC-32.5 ^oC), em 35 minutos, com uma variação de tensão de 8 V (15 V-23 V).

Na figura 52 é possível ver a evolução da temperatura média e máxima em função do tempo de ensaio e na figura 53 é possível verificar a evolução da temperatura máxima

e média em função da tensão de alimentação.

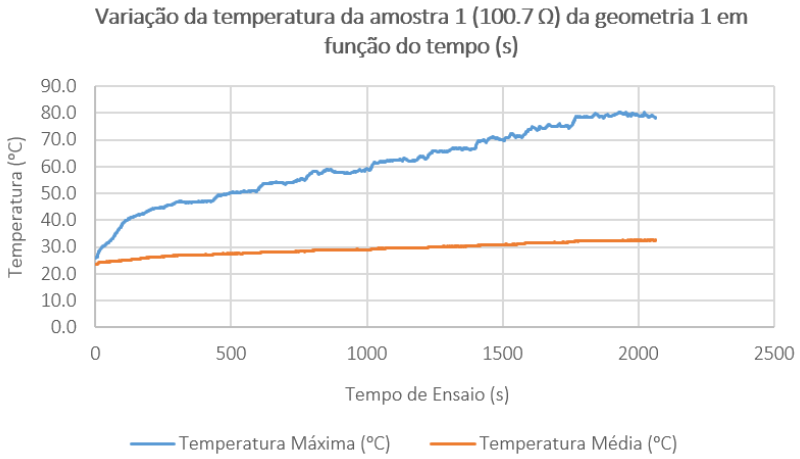


Figura 52: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 1 em função do tempo.

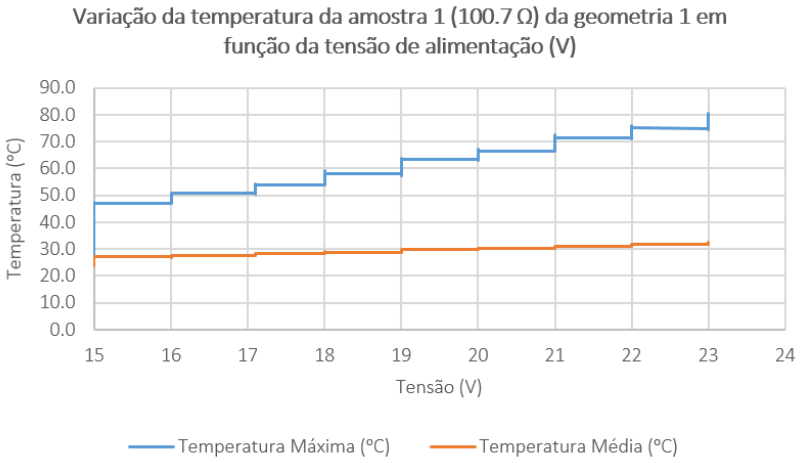


Figura 53: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 1 em função da tensão.

Graficamente é possível afirmar que a temperatura máxima sofre uma maior variação ao longo de todo o ensaio do que a temperatura média, cuja variação global é reduzida.

Quanto à análise da distribuição de temperatura sobre o substrato e o circuito impresso a partir da informação recolhida pela câmara termográfica, é possível verificar que o aquecimento ocorre tendencialmente do pólo negativo para o positivo, da esquerda para a direita, como era expectável, no entanto este acontece primeiro na parte inferior do circuito do que na parte superior, ao contrário do que seria de esperar. Este aquecimento de baixo para cima pode ser explicado pelo facto das pistas horizontais

superiores desta primeira amostra apresentarem mais defeitos, tornando-se mais resistivos à passagem de corrente elétrica, forçando-a a passar, inicialmente, nas pistas mais em baixo onde não se verificam tantas falhas de filme de carbono. Com recurso à evolução apresentada na figura 54 é possível também concluir que é dificil atingir uma homogenização da temperatura ao longo de toda a área e que a concentração de pontos quentes é superior no canto inferior esquerdo.

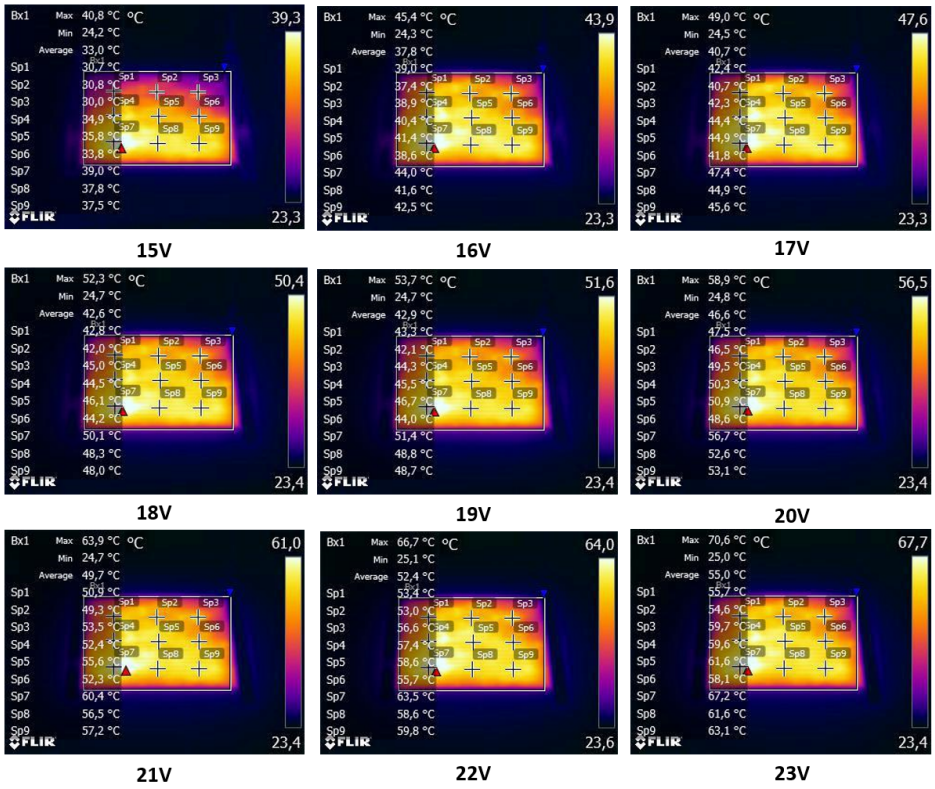


Figura 54: Evolução da distribuição de temperaturas da visual da amostra 1 da geometria 1.

Quanto à distribuição homogénea da temperatura em todo o substrato, numa fase inicial como se pode ver a partir das temperaturas referentes a cada ponto assinalado (Sp1 a Sp9), em cada imagem da figura 54 verifica-se uma distribuição homogénea da temperatura, no entanto a partir do instante em que é fornecida uma tensão próxima dos 20 V a diferença de temperatura entre o ponto mais frio (Sp2) e o ponto mais quente (Sp7) é aproximadamente 10.2 ^oC, valor elevado para a distância entre estes pontos. À medida que é aumentada a tensão fornecida esta diferença acentua-se, demonstrando que a homogenização incial verificada deixa de o ser.

Geometria 1 - Amostra 2

Quanto à amostra 2 (93.3 Ω) foi fornecida incialmente uma tensão de 15 V, onde a temperatura média incial era 23.7 ^oC e a temperatura máxima era 25.5 ^oC. Para esta tensão verificou-se um aumento da temperatura máxima de 14.8 ^oC (25.5 ^oC - 40.3 ^oC) e cerca de 2.3 ^oC (23.7 ^oC - 26.0 ^oC) da temperatura média.

Em média, a cada 3 minutos, é possível afirmar que tanto o aumento da temperatura máxima como da temperatura média é 3.5 ^oC e 0.6 ^oC, respetivamente. Verificou-se um maior aumento da temperatura máxima quando foi fornecida uma tensão de 23 V, onde foi resgitado um aumento de 4.5 ^oC (63.7 ^oC - 68.2 ^oC). A menor variação foi registada para 17 V, onde apenas se verificou um aumento de 3 ^oC (43.4 ^oC - 46.4 ^oC). Relativamente à temperatura média, o maior aumento foi verificado quando foi fornecida uma tensão de 23 V e 24 V, cerca de 0.8 ^oC (29.7 ^oC - 30.5 ^oC e 30.5 ^oC - 31.3 ^oC, respetivamente). O menor aumento foi verificado quando o sistema foi alimentado com 17 V, cerca 0.4 ^oC (26.6 ^oC - 27.0 ^oC).

No global, a temperatura máxima variou 54.6 ^oC (25.4 ^oC - 80 ^oC) e a temperatura média 7.7 ^oC (23.7 ^oC - 31.4 ^oC), em 34 minutos, com uma variação de tensão de 9 V (15 V - 24 V). Na figura 55 e 56 é possível ver a evolução da temperatura média e máxima em função do tempo de ensaio e da tensão de alimentação, respetivamente.

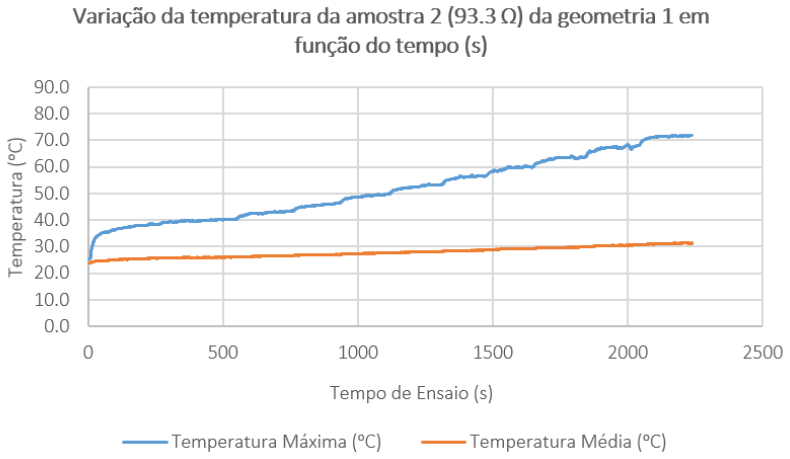


Figura 55: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 1 em função do tempo.

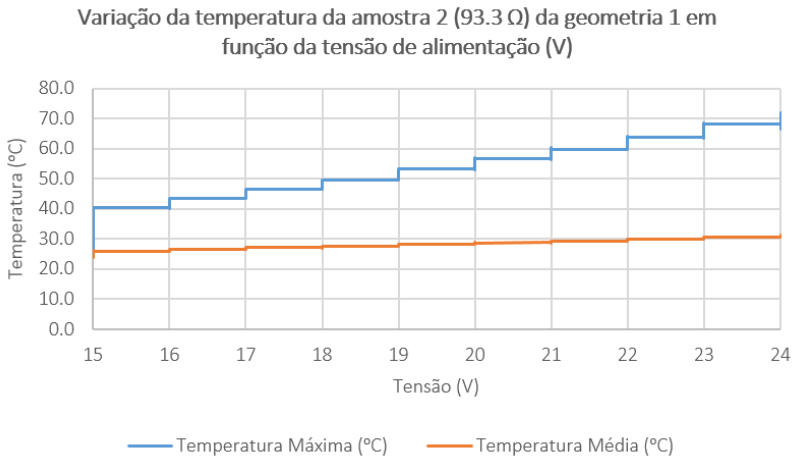


Figura 56: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 1 em função da tensão.

Mais uma vez se verifica maior variação da temperatura máxima do que da temperatura média ao longo do ensaio, sendo essa diferença de variação bastante significativa.

Fazendo uma análise da distribuição de temperaturas ao longo do substrato e das pistas impressas apresentada na figura 57. Foram definidos 9 pontos (Sp1 a Sp9) com o objetivo de verificar a homogenização da temperatura ao longo de todo o ensaio de caracterização térmica, como foi feito anteriormente.

Ao contrário daquilo que aconteceu na amostra 1 desta geometria, numa fase inicial a diferença de temperaturas entre o ponto de maior temperatura (Sp1 ou Sp3 da figura 57) e o de menor temperatura (Sp7, Sp8 e Sp9 da figura 57) é aproximadamente de 10 ^oC, o que não representa uma homogeneidade da temperatura ao longo do substrato e da resistência impressa. O mesmo se verifica para tensões mais elevadas, sendo que por exemplo para 23V verifica-se uma diferença de aproximadamente 22 ^oC entre o ponto Sp3, de temperatura mais elevada e o ponto Sp7, de temperatura mais baixa.

É possível verificar que o aquecimento é feito de cima para baixo, da esquerda para a direita, como era expectável, uma vez que contrariamente ao que acontece na amostra 1, a amostra 2 apresenta mais defeitos nas pistas horizontais impressas na zona inferior do que na zona superior.

É visível também que a zona superior do sistema de aquecimento acaba por atingir temperaturas mais elevadas, quando comparadas com a zona inferior do mesmo.

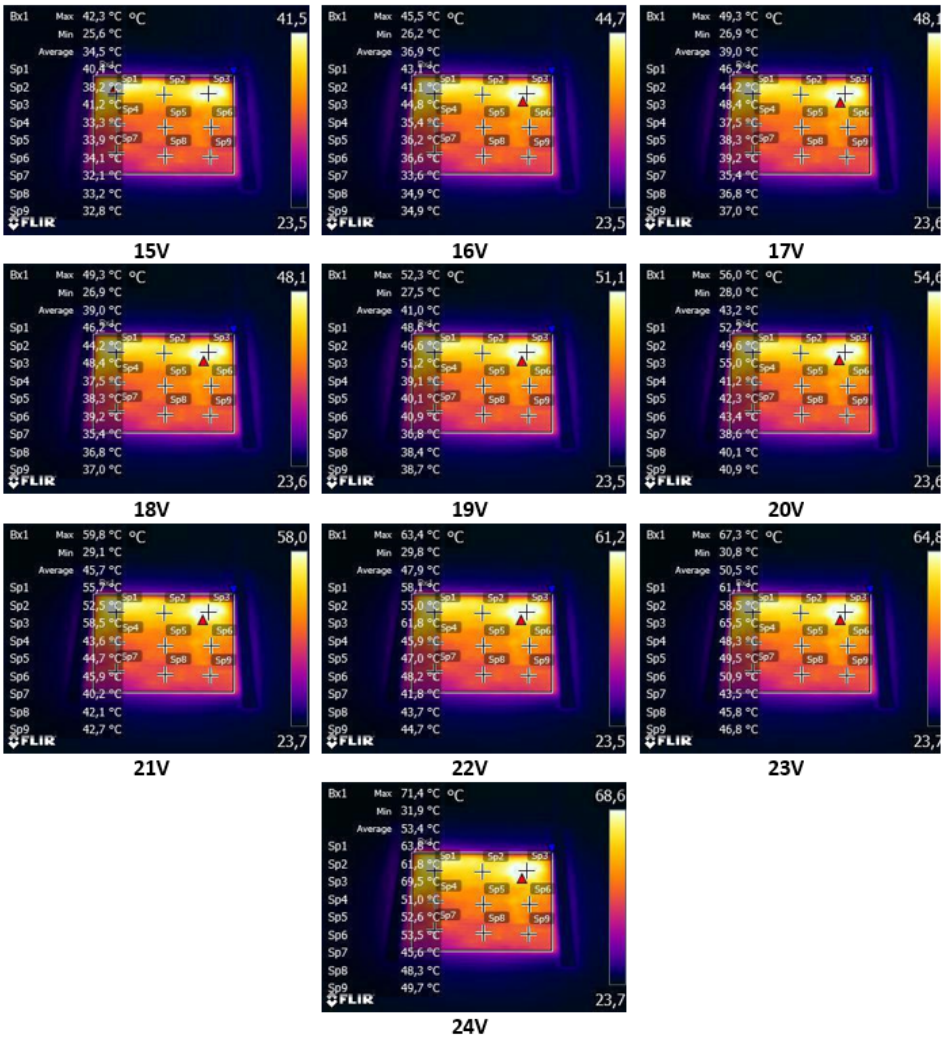


Figura 57: Evolução da distribuição de tempraturas da amostra 2 da geometria 1.

Geometria 1 - Amostra 3

Quanto à amostra 3 (100.6 Ω) desta geometria e iniciando a análise à mesma tensão fornecida às restantes amostras desta geometria, isto é 15 V, a temperatura média incial é aproximadamente 23.5 ^oC e a temperatura máxima incial é cerca de 24.2 ^oC. Para esta tensão verificou-se uma variação da temperatura média de 8 ^oC (23.5 ^oC - 31.5 ^oC) e uma variação da temperatura máxima de 16.2 ^oC (24.2 ^oC - 40.4 ^oC).

Em média, num intervalo de tempo próximo de 2 minutos, a temperatura média aumentou 1.9 ^oC e a temperatura máxima, cerca de 3.7 ^oC. A maior variação da temperatura média foi registada para os 24 V, cerca de 3.6 ^oC (44.9 ^oC - 48.5 ^oC) e a menor para os 16 V, cerca de 1.3 ^oC (31.4 ^oC - 32.7 ^oC). Relativamente à temperatura

máxima, a maior variação foi registada aos 24 V, cerca de 7.5 ^oC (65.3 ^oC - 72.8 ^oC) e a menor aos 16 V, cerca de 2.4 ^oC (40.0 ^oC - 42.4 ^oC).

No global, a temperatura média variou cerca de 25 ^oC (23.5 ^oC - 48.5 ^oC) e a temperatura máxima variou aproximadamente 48.6 ^oC (24.2 ^oC - 72.8 ^oC), durante 24 minutos, com uma variação da tensão fornecida de 9 V (15 V - 24 V). A duração deste ensaio foi menor, uma vez que o intervalo considerado para aumento da tensão foi reduzido devido à disponibilidade do equipamento em utilização.

Nas figuras 58 e 59 é possível analisar a evolução da temperatura máxima e média em função do tempo de ensaio e da tensão fornecida, respetivamente.

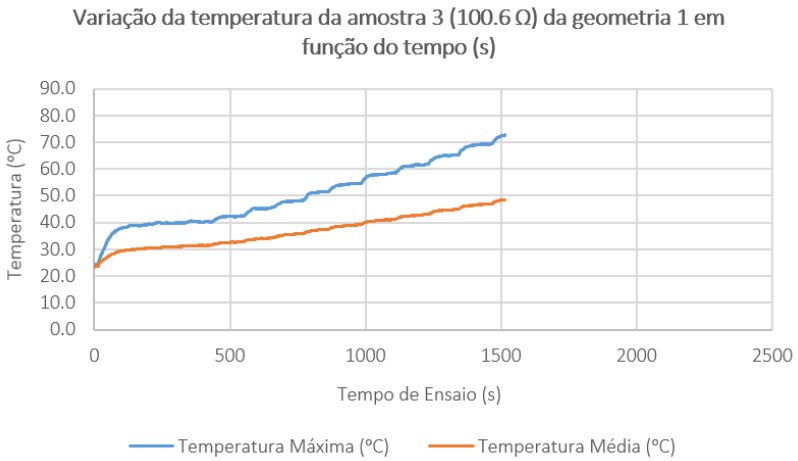


Figura 58: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 1 em função do tempo.

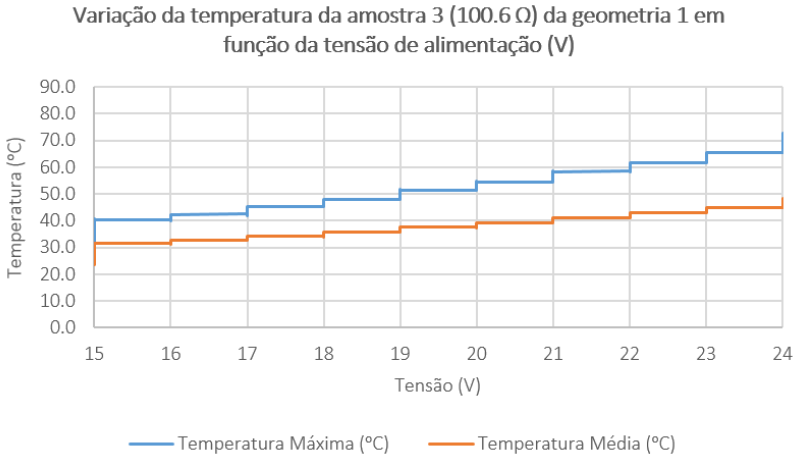


Figura 59: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 1 em função da tensão.

Graficamente conclui-se que a variação da temperatura máxima é superior à variação da temperatura média, ao longo do ensaio. Esta diferença é menor do que aquela que foi verificada para as amostras 1 e 2 da geometria 1.

Na figura 60 é possível ver a evolução da distribuição de temperaturas ao longo do esnaio, da amostra 3.

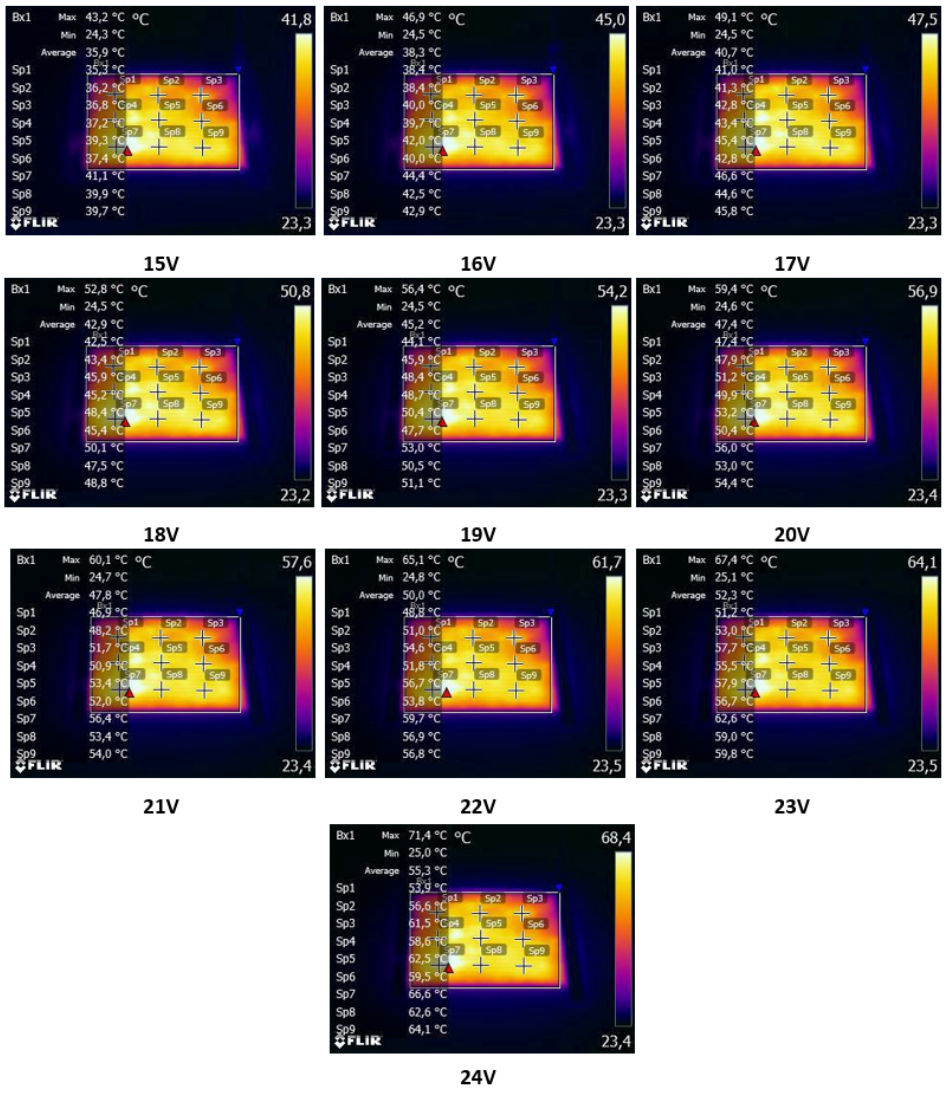


Figura 60: Evolução da distribuição de temperaturas da visual da amostra 3 da geometria 1.

Visualmente, verifica-se uma aquecimento da esquerda para a direita, de baixo para cima, tal como acontece com a amostra 1. Este facto é justificável pelo facto das pistas horizontais impressas desta amostra apresentarem algumas falhas de filme nessa região,

fazendo aumentar a resistência e levando a um aquecimento de baixo para cima e não o contrário, como acontece na amostra 2. Assim como na amostra 1 e com recurso à figura 60 é possível concluir que não se verifica homogeneidade da distribuição de temperaturas ao longo de toda a área estudada, apesar de numa fase incial do ensaio a diferença de temperatura entre o ponto mais frio e mais quente assinalado (Sp1 a Sp9) não ser muito elevada, mas considerando a distância entre os pontos é uma diferença considerável. Isto é percetível por exemplo por comparação dos pontos Sp1 e Sp7 quando ao sistema é fornecida uma tesão de 15 V (tensão inicial), onde a diferença de temperaturas entre eles é próxima de 6 ^oC. No entanto, à medida que se fornece ao sistema uma tensão mais elevada verifica-se um aumento desta diferença, como por exemplo na diferença de temperaturas dos pontos Sp1 e Sp7, cerca de 13 ^oC, alimentando o sistema com a tensão máxima analisada, tornando-se esta diferença significativa tendo em conta a área considerada e a distância dos pontos considerados.

Ao longo de todo o ensaio o ponto quente apresenta sempre a mesma localização, canto inferior esquerdo, tal como na amostra 1.

Comparando os 3 ensaios pode-se concluir que o comportamento é idêntico em todas as amostras, verificando-se uma ligeira diferença na maneira como o aquecimento é feito, isto é, apesar de todas as amostras aquecerem do lado esquerdo para o direito, apenas a amostra 2 aquece como seria expectável, de cima para baixo. O mesmo não se verifica nas amostras 1 e 3 dados os defeitos apresentados pelas pistas horizontais na zona superior do circuito, fazendo aumentar a resistência à passagem de corrente elétrica, tal como já foi explicado.

Em todas as amostras, no fim do ensaio é díficil afirmar que se verifica uma homogenização da temperatura, uma vez que se verificam diferenças de temperatura elevadas para a distância dos pontos considerados. É também possível afirmar que se verifica um maior aquecimento do substrato do que a própria resistência. Isto é explicado pelo facto do substrato (PC) ser um material que oferece mais resistência à transferência de calor, acabando por acumular a energia térmica do sistema de aquecimento.

Quanto à variação das resistências de cada circuito após ensaio, na figura 61 é possível verificar uma ligeira diminuição do valor da resistência, no entanto este valor não é significativo, o que permite afirmar que não se verificou qualquer oxidação ou danificação total do circuito.

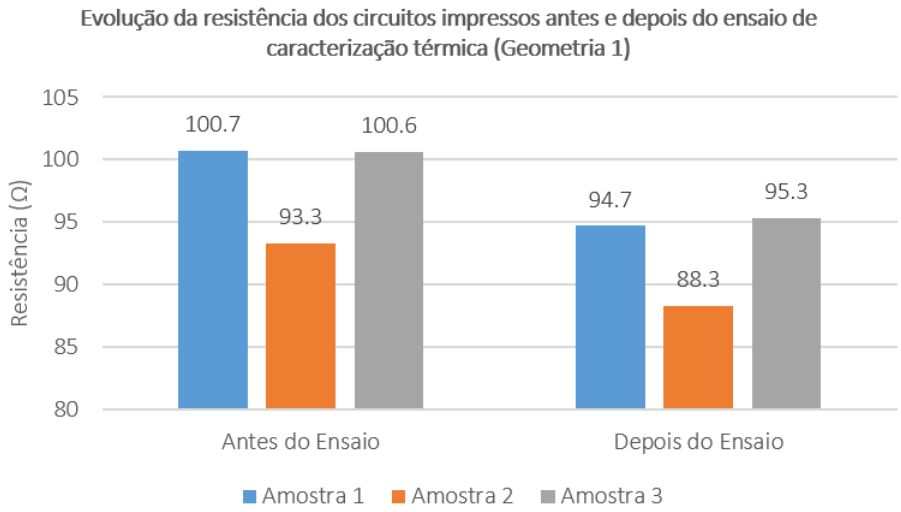


Figura 61: Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 1.

Geometria 2 - Amostra 1

Começou-se por analisar a amostra 1 (31 Ω), foi inicialmente fornecida uma tensão de aproximadamente 10 V. A temperatura média incial era 24.1 ^oC e a temperatura máxima inicial de 25.4 ^oC. Para esta tensão inicial registou-se uma variação da temperatura máxima de 14 ^oC (25.4 ^oC - 39.4 ^oC) e uma variação da temperatura média aproximadamente de 1.9 ^oC (24.1 ^oC - 26.0 ^oC).

A variação da temperatura máxima foi, em média, de 5.3 ^oC por cada aumento de 1 V e a variação de atemperatura média foi, em média, 1 ^oC por cada 1V aumentado. A maior variação da temperatura média se verificou aos 17 V, variando cerca de 1.1 ^oC (31.7 ^oC - 32.8 ^oC) e a menor variação aos 11.1 V, variando cerca de 0.7 ^oC (26.0 ^oC - 26.7 ^oC). Quanto à temperatura máxima, o maior aumento verificou-se aos 18 V, cerca de 5.7 ^oC (70.7 ^oC - 76.4 ^oC) e a menor variação aos 11.1 V, cerca de 4.8 ^oC (39.2 ^oC - 44 ^oC).

De uma maneira geral, registou-se uma variação da temperatura máxima de 49.5 ^oC (25.4 ^oC - 74.9 ^oC) e uma variação de aproximadamente 9.9 ^oC (24.1 ^oC - 34.0 ^oC) da temperatura média, com uma variação de 8 V (10 V - 18 V), durante 30 minutos de ensaio.

A figura 62 apresenta a evolução da temperatura máxima e média, em função do tempo de ensaio e a figura 63 apresenta a evolução da temperatura máxima e média,

em função da tensão de alimentação.

Graficamente e de acordo com os resultados descritos, é possível afirmar que a variação da temperatura média é inferior à variação da temperatura máxima, ao longo do ensaio, registando-se ainda uma diferença considerável.

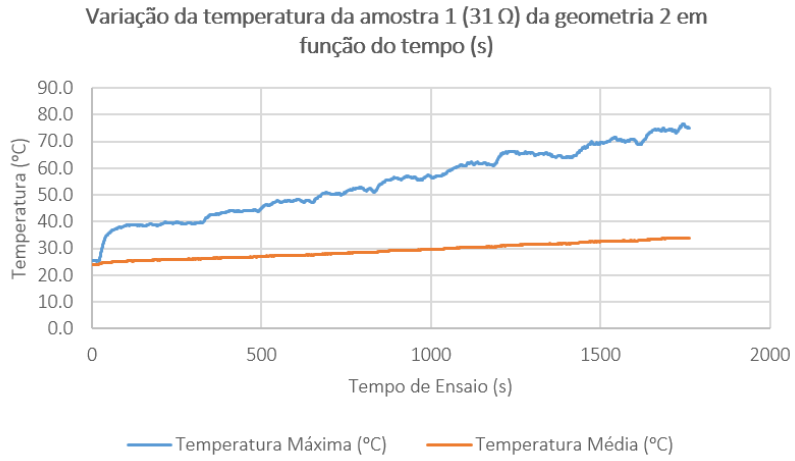


Figura 62: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 2 em função do tempo.

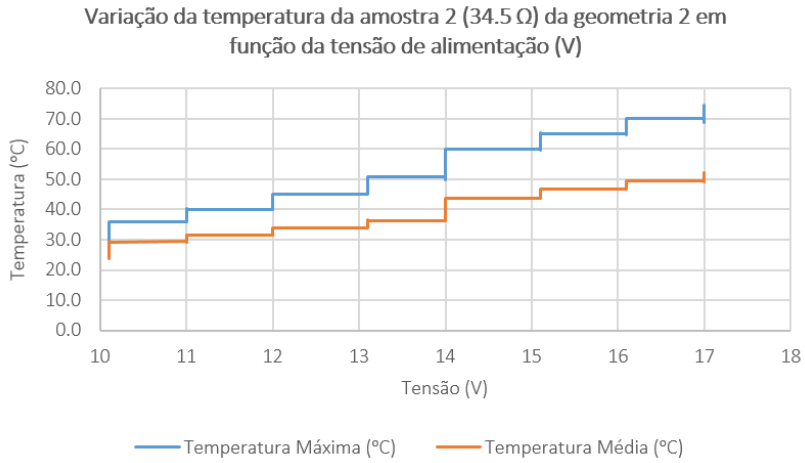


Figura 63: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 2 em função da tensão.

A nível de avaliação da condução de calor do circuito foi feita uma análise considerando as informações obtidas a partir da câmara termográfica, como é possível ver na figura 64.

Analisando as imagens apresentadas na figura 64 verifica-se um aquecimento da esquerda para a direita, como seria de esperar.

Quanto à homogeneização da temperatura, numa fase incial é uniforme, como por exemplo quando é fornecido ao sistema 11.1 V. No entanto, a partir dos 12 V de alimentação do circuito verifica-se uma aumento desta diferença de temperatura. Isto é visível a partir da comparação do ponto Sp1 (ponto assinalado de maior temperatura) e o ponto Sp4 (ponto assinalado de menor temperatura) aos 12 V, onde a diferença resgitada é de aproximadamente 9 ^oC, o que é bastante considerando a distância relativa dos pontos.

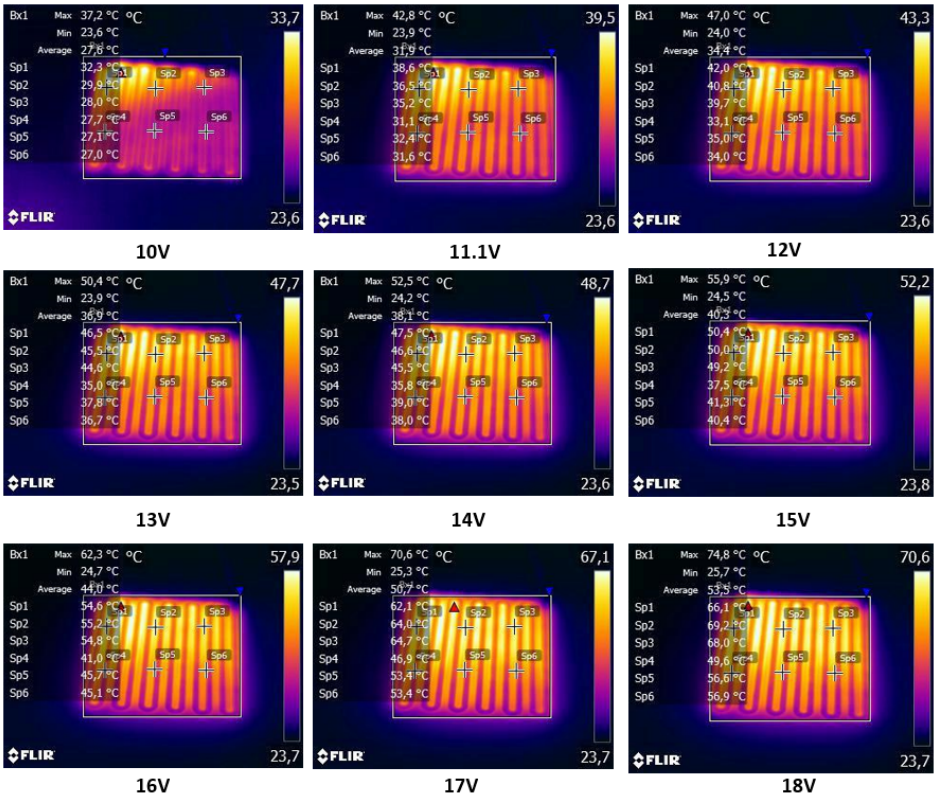


Figura 64: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 1 da geometria 2.

Assim como aconteceu na geometria 1, verifica-se uma maior temperatura no substrato do que no circuito impresso, o que permite concluir, como era expectável, que o substrato (PC) é um material que oferece maior resistência à transferência de calor, acabando por acumular a energia térmica do sistema de aquecimento, como foi explicado anteriormente.

Relativamente aos pontos quentes (assinalados com um triângulo vermelho na figura 64) é possível verificar que se localizam próximos das zonas mais curvilíneas do circuito impresso, uma vez que esta forma torna-se mais resistiva à passagem de energia.

Geometria 2 - Amostra 2

Quanto à amostra 2 (34.5 Ω) da geometria 2 aplicou-se incialmente a mesma tensão aplicada à amostra 1, cerca de 10.1 V. A temperatura média inicial é 23.9 ^oC e a temperatura máxima inicial é 24.7 ^oC. Para esta tensão verificou-se um aumento da temperatura média de 5.4 ^oC (23.9 ^oC - 29.3 ^oC) e cerca de 11.3 ^oC (24.7 ^oC - 36.0 ^oC), da temperatura máxima.

Em média, a temperatura média aumentou cerca de 3.2 ^oC e a temperatura máxima aumentou cerca de 5.5 ^oC, num intervalo de tempo de aproximadamente 3 minutos. Registou-se uma maior variação da temperatura média quando foi fornecida uma tensão de 14 V ao sistema, resultando num aumento de 7.2 ^oC (36.4 ^oC - 43.6 ^oC) e a menor variação registou-se aos 11 V e aos 12 V, cerca de 2.3 ^oC (29.4 ^oC - 31.7 ^oC e 31.7 ^oC - 34 ^oC), respetivamente. Quanto à temperatura máxima, a maior variação verificou-se quando foi fornecido ao sistema uma tensão de 14 V, cerca de 9.4 ^oC (50.7 ^oC - 60.1 ^oC) e a menor aos 11 V, cerca de 4.1 ^oC (36.0 ^oC - 40.1 ^oC).

Neste ensaio registou-se uma variação da temperatura máxima de 50 ^oC (24.7 ^oC - 74.7 ^oC) e uma variação da temperatura média de 28.1 ^oC (23.9 ^oC - 52 ^oC), em 27 minutos, com uma variação da tensão fornecida aproximadamente de 7 V (10.1 V - 17 V).

Nas figuras 65 e 66 é possível ver a evolução da temperatura máxima e média ao longo do ensaio, em função do tempo e da tensão fornecida, respetivamente.

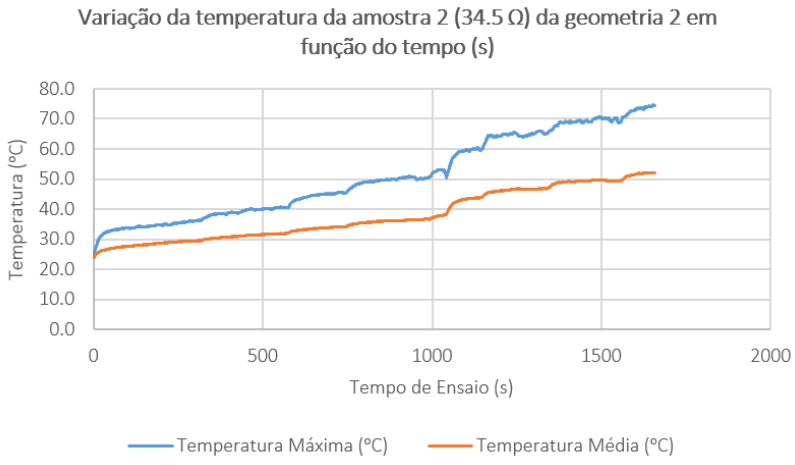


Figura 65: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 2 em função do tempo.

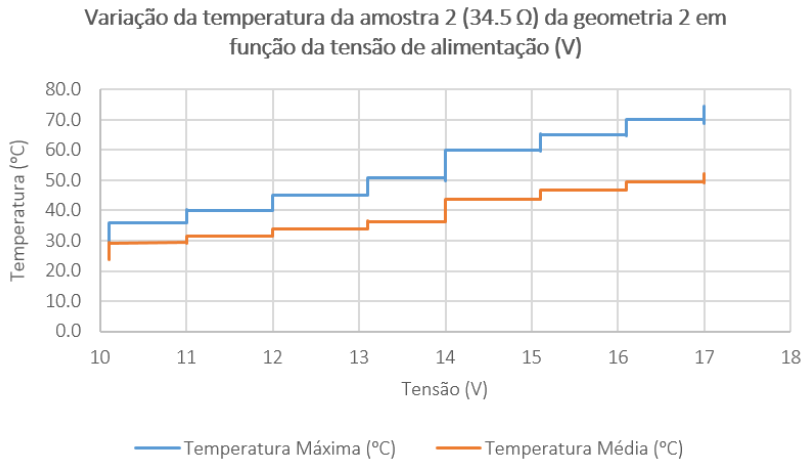


Figura 66: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 2 em função da tensão.

Graficamente e com recurso aos dados descritos acima é possível concluir que a variação da temperatura máxima é superior a variação da temperatura média, ao longo do ensaio.

Fazendo uma análise da distribuição de temperaturas ao longo do tempo do circuito impresso analisado, por observação da figura 67 é possivel verificar que a condução de calor é feita da esquerda para a direita, como na amostra 1, como expectável.

É importante destacar que numa fase incial é possível verificar uma homogeneididade da temperatura em toda superfície, uma vez que a temperatura registada pelos pontos Sp1 a Sp6 das imagens da figura 67 é próxima. Quando o sistema é alimentado com 15.1 V verifica-se um aumento da diferença de temperaturas entre os pontos assinalados. Ou seja, por observação da temperatura máxima registada desses pontos, Sp4 (56.7 ^oC) e observação da temperatura mínima resgitada por esses mesmos pontos, Sp3 (43.2 ^oC), e considernado a distância de um em relação ao outro, é possível afirmar que a diferença verificada é aproximadamente 13 ^oC, bastante elevada. Esta diferença aumenta à medida que se aumenta a tensão fornecida ao sistema.

De uma maneira geral, é possível concluir também que, mais uma vez o substrato atinge sempre temperaturas superiores às temperaturas atingidas pela própria resistência do circuito, pelo motivo já explicado. Quanto aos pontos quentes, verifica-se o mesmo padrão que foi registado na amostra 1, isto é, localizam-se próximos das zonas curvilíneas.

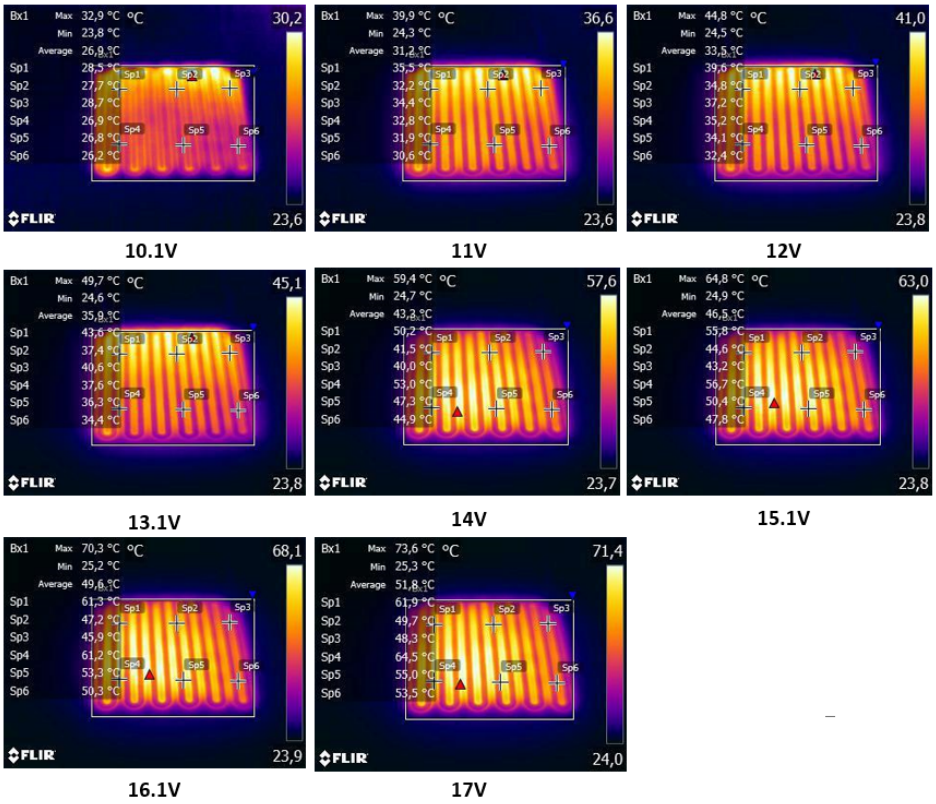


Figura 67: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 2 da geometria 2.

Geometria 2 - Amostra 3

Por fim, analisando a amostra 3 (29 Ω) da geometria 2, foi fornecida uma tensão incial de 10 V. A temperatura média inicial é de 21.8 ^oC e a temperatura máxima inicial é de 24.3 ^oC. Para esta tensão registou-se uma variação de 12.9 ^oC (24.3 ^oC - 37.2 ^oC) da temperatura máxima e 0.5 ^oC (21.8 ^oC - 22.3 ^oC) da temperatura média.

Em média, a temperatura máxima variou 5.8 ^oC, em 3 minutos de ensaio e variou cerca de 0.4 ^oC da temperatura média. A maior variação da temperatura máxima foi resgitada aos 15 V, cerca de 5.7 ^oC (56.4 ^oC - 62.1 ^oC) e a menor foi registada aos 12 V cerca de 4 ^oC (42.7 ^oC - 46.7 ^oC). A maior variação de temperatura média foi resgitada aos 18 V, cerca de 0.4 ^oC (24.3 ^oC - 24.7 ^oC) e a menor foi registada aos 13 V e 17 V, cerca de 0.2 ^oC (22.9 ^oC - 23.1 ^oC e 24.1 ^oC - 24.3 ^oC, respetivamente).

No global, o ensaio durou cerca de 30 minutos e registou-se uma variação da temperatura máxima de 49.2 ^oC (24.3 ^oC - 73.5 ^oC) e 2.9 ^oC (21.8 ^oC - 24.7 ^oC) da temperatura média, com uma variação de 8 V (10 V-18 V) da tensão fornecida.

Na figura 68 e 69 é possível ver a evolução da temperatura máxima e média da amostra 3 da geometria 2 em função do tempo e da tensão fornecida, respetivamente.

Graficamente é visível a maior variação da temperatura máxima em relação à variação da temperatura média. Esta amostra apresenta, deste modo, a maior diferença entre as variação da temperatura máxima e média, quando comparada com as restantes amostras desta geometria.

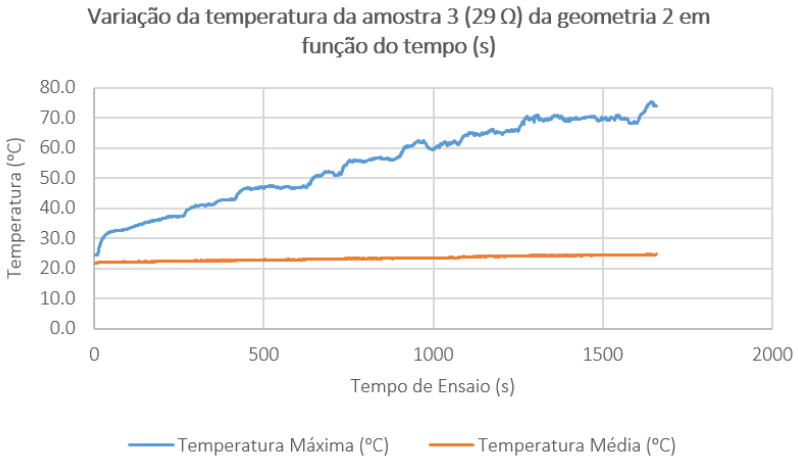


Figura 68: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 2 em função do tempo.

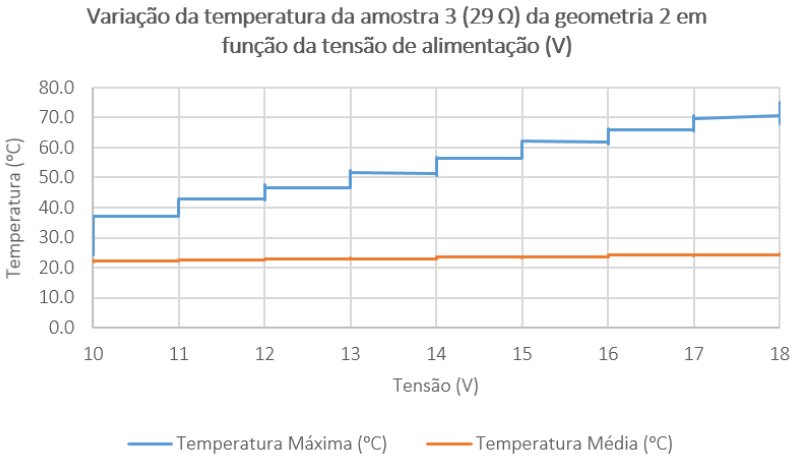


Figura 69: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 2 em função da tensão.

Considerando a distribuição de temperatura ao longo da superfície, é possível afirmar com recurso às imagens da figura 70, que o aquecimento ocorre da esquerda para a direita, como era expectável.

Quanto à diferença de temperaturas dos pontos assinalados (Sp1 a Sp6), numa fase inicial essa difernça é reduzida ou nula, no entanto a partir do instante em que o sistema é alimentado com 13 V, a diferença de temperatura, por exemplo entre o ponto Sp6 e Sp1 é cerca de 9 ^oC, o que é bastante significante considerando a distância entre eles. Esta diferença aumenta à medida que a tensão fornecida aumenta, como por exemplo quando o sistema é alimentado com 17 V, a diferença entre a temperatura do ponto Sp4 e Sp3 é aproximadamente de 16 ^oC.

Relativamente aos pontos quentes (assinalados com um triângulo vermelho na figura 70) é possível verificar que se localizam próximos das zonas mais curvilíneas do circuito impresso, tal como nas restantes amostras desta geometria.

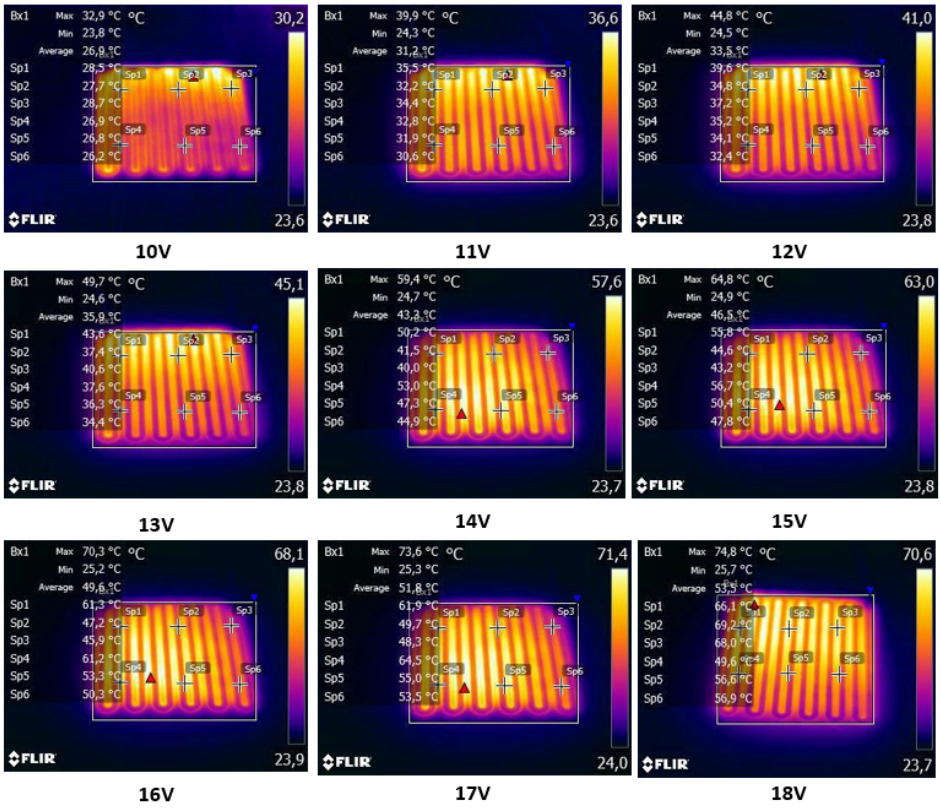


Figura 70: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 3 da geometria 2.

Tal como aconteceu com as amostras anteriores, verfica-se que o substrato aquece mais que a própria resistência.

Após a realização dos ensaios referentes à geometria 2 foi medida novamente a resistência dos circuitos analisados. Deste modo, verificou-se que não houve uma grande alteração do seu valor, o que permite concluir que o ensaio de caracterização térmica

não degradou substancialmente os circuitos analisados.

Na figura 71 é possível verificar esta diferença do valor das resistências dos ciruitos impressos e analisados.

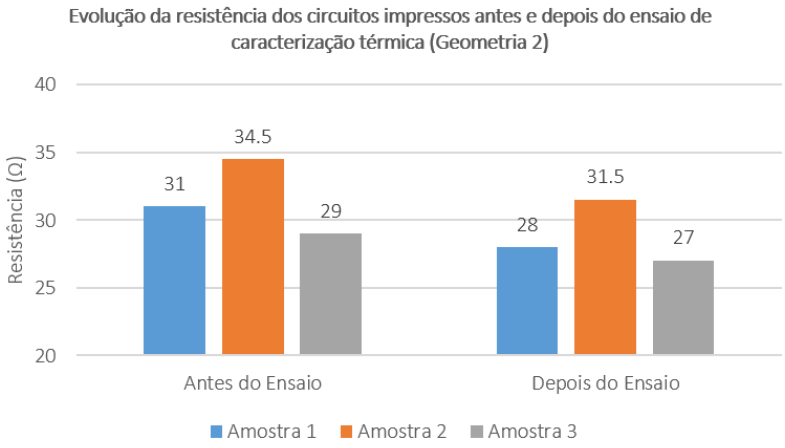


Figura 71: Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 2.

Como é possível verificar, não foi registada uma variação muito significativa dos valores das reistências dos filmes, o que significa que o mesmo não sofreu oxidação ou qualquer dano que impeça o seu correto funcionamento. Esta variação pode estar associada à diferença da temperatura ambiente, associada à medição antes e depois do ensaio.

Geometria 3 - Amostra 1

Quanto à amostra 1 (72.2 Ω) foi fornecida uma tensão próxima de 12 V, a temperatura média icinial é cerca de 24.2 ^oC e a temperatura máxima inicial é cerca de 24.7 ^oC. Para esta tensão registou-se uma variação de temperatura média de 3.6 ^oC (24.2 ^oC - 27.9 ^oC) e cerca de 6.4 ^oC (24.7 ^oC - 31.0 ^oC) de temperatura máxima.

Contudo, para um intervalo médio de 3 minutos, a temperatura média aumenta, em média, cerca de 1.6 ^oC e a temperatura máxima varia, em média, cerca de 6.4 ^oC. Após o preíodo de estabilização, a maior variação da temperatura média ocorre quando o sistema é alimentado com 22 V, cerca de 2.4 ^oC (40.9 ^oC - 43.3 ^oC) e a menor variação registou-se com o fornecimento da tensão de 15 V e 16V, cerca de 1 ^oC (30.4 ^oC - 31.4 ^oC e 31.4 ^oC - 32.4 ^oC). Quanto à temperatura máxima, a maior variação registou-se quando o sistema foi alimentado com 21.1 V, cerca de 4.6 ^oC (54.6 ^oC - 59.2 ^oC) e a

menor variação verificou-se aos 14 V, 15 V e 16 V, cerca de 2 ^oC (34.1 ^oC - 36.1 ^oC, 36.2 ^oC - 38.2 ^oC e 38.2 ^oC - 40.2 ^oC, respetivamente).

No geral, registou-se uma variação da temperatura média de 24.4 ^oC (24.2 ^oC - 48.6 ^oC) e a temperatura máxima variou aproximadamente 50.5 ^oC (24.7 ^oC - 75.2 ^oC), em 43 minutos, com uma variação de 12 V (12 V - 25 V).

Nas figuras 72 e 73 é possível analisar a evolução da temperatura máxima e média ao longo ensaio, em função do tempo e da tensão, respetivamente.

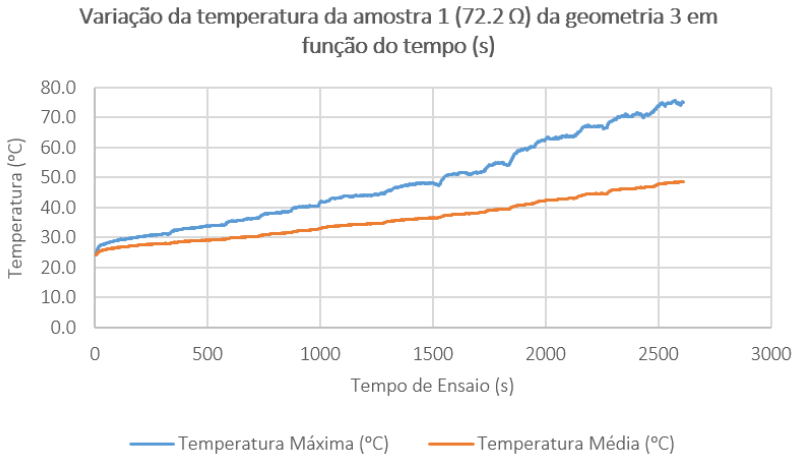


Figura 72: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 3 em função do tempo.

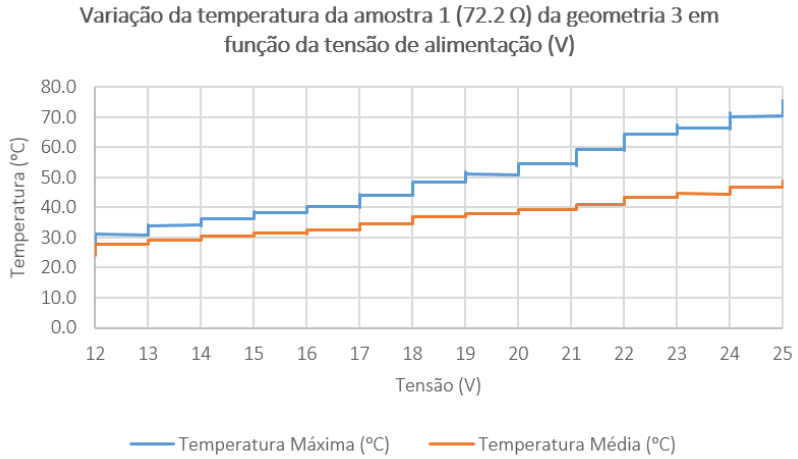


Figura 73: Variação de temperatura da amostra 1 da geometria 3 em função da tensão.

Na figura 74 é possível ver a evolução da distribuição de temperaturas da amostra 1, ao longo do ensaio de carcaterização térmica.

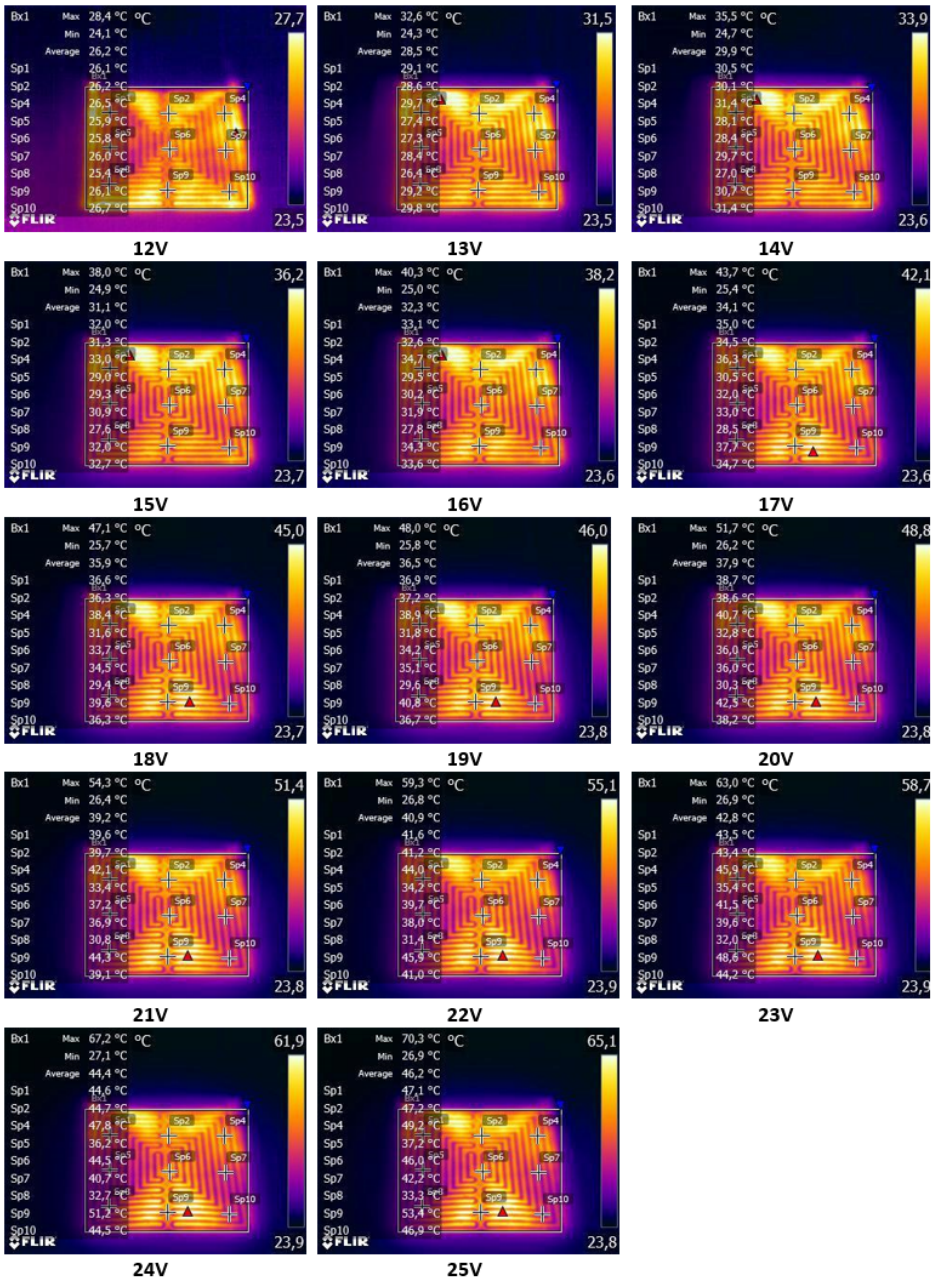


Figura 74: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 1 da geometria 3.

De acordo com a figura 74 numa fase inicial do ensaio é possível verificar que existe uma distribuição homogénea da temperatura, no entanto à medida que os valores de tensão fornecida ao sistema se elevam, essa distribuição começa a ser menos homogênea, verificando - se por exemplo, uma diferença de aproximadamente 9 ^oC entre o ponto Sp5 e Sp4 quando ao sistema é fornecida uma tensão de 21 V. À medida que se aumenta

a tensão fornecida ao sistema, esta diferença de temperatura acentua-se, chegando a ser próxima de 20 ^oC. Mais uma vez, é possível ver que o substrato atinge temperaturas superiores às temperaturas registadas pela própria resistência.

Relativamente aos pontos quentes, verifica-se uma mudança da sua localização ao longo do ensaio, no entanto, à medida que se aumenta a tensão, estes aproximam-se das zonas mais curvilíneas do circuito, nomeadamente na zona mais central do mesmo, como é possível ver através da localização do triângulo vermelho das imagens da figura 74.

Geometria 3 - Amostra 2

Quanto à amostra 2 (69.5 Ω), inicialmente foi fornecida uma tensão próxima dos 12 V, a temperatura média incial é 21.3 ^oC e a temperatura máxima incial, cerca de 25 ^oC. Para esta tensão a temperatura máxima variou cerca de 4.6 ^oC (25 ^oC - 29.6 ^oC e a temperatura média variou aproximadamente 0.2 ^oC (21.3 ^oC - 21.5 ^oC).

Em média, num intervalo de tempo próximo de 3 minutos, a temperatura máxima varia 4.0 ^oC e a temperatura média varia cerca de 0.3 ^oC. A maior variação da temperatura máxima foi resgistada quando ao sistema é fornecida a tensão 22 V, cerca de 7.7 ^oC (56.9 ^oC - 64.6 ^oC) e a menor foi registada aos 23 V, aproximadamente 0.2 ^oC (64.6 ^oC - 64.8 ^oC). Quanto à temperatura média, a maior variação foi registada aos 22 V, cerca de 0.3 ^oC (22.8 ^oC - 23.1 ^oC) e a menor aos 23 V, cerca de 0.1 ^oC (23.2 ^oC - 23.3 ^oC).

No geral, verificou-se uma variação da temperatura máxima em 48 ^oC (25 ^oC - 73.0 ^oC) e a temperatura média veriou cerca de 2.3 ^oC (21.3 ^oC - 23.6 ^oC) durante 38 minutos, com uma variação da tensão fornecida de 13 V (12 V - 25 V).

Na figura 75 é apresentada a relação entre a variação da temperatura máxima e média em função do tempo e na figura 76 é possível ver a relação entre a variação da temperatura máxima e média em função da tensão.

No gráfico da figura 75, no instante inicial do ensaio, é possível ver uma variação da temperatura máxima e média, no entanto esta variação foi registada devido a um erro durante o ensaio de caracterização térmica desta amostra, onde a câmara termográfica registou um outro corpo, a uma temperatura bastante diferente.

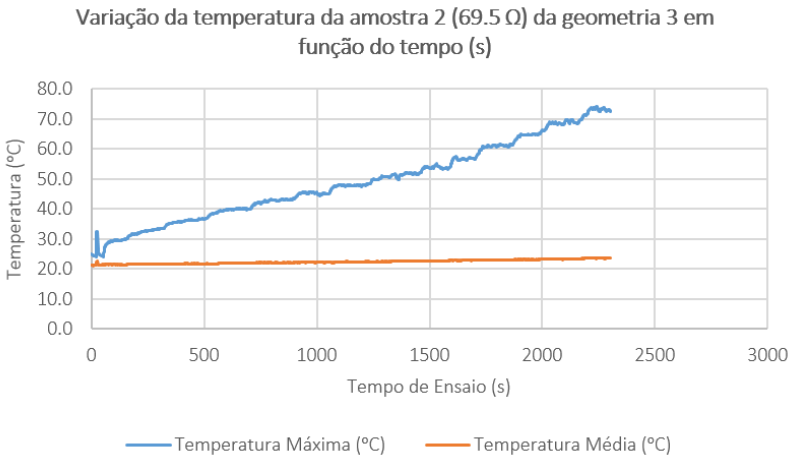


Figura 75: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 3 em função do tempo.

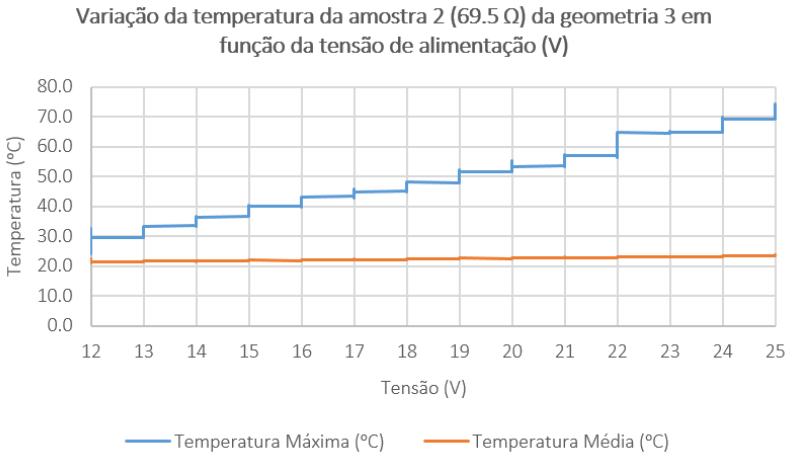


Figura 76: Variação de temperatura da amostra 2 da geometria 3 em função da tensão.

Ao contrário do que foi apresentado nas amostras e geometrias anteriores, na figura 77 apenas é possível ver a evolução de temperaturas sem análise ponto a ponto, uma vez que esta iria impedir a análise da imagem recolhida pela câmara.

É, ainda assim possível verificar um maior aquecimento no substrato do que na própria resistência, à luz do que acontece com as restantes amostras.

Relativamente aos pontos quentes, verifica-se uma mudança da sua localização ao longo do ensaio, no entanto à medida que se aumenta a tensão, estes aproximam-se das zonas mais curvilíneas do circuito, nomeadamente na zona mais central do mesmo, como é possível ver através da localização do triângulo vermelho. Todas as zonas assinaladas

com um triângulo vermelho das imagens da figura 77 representam a localização do ponto com maior temperatura e analisando a geometria impressa, verifica-se que a sua localização ocorre em zonas com algumas falhas de impressão, levando a um aumento da resitência nessa zona, gerando um ponto quente.

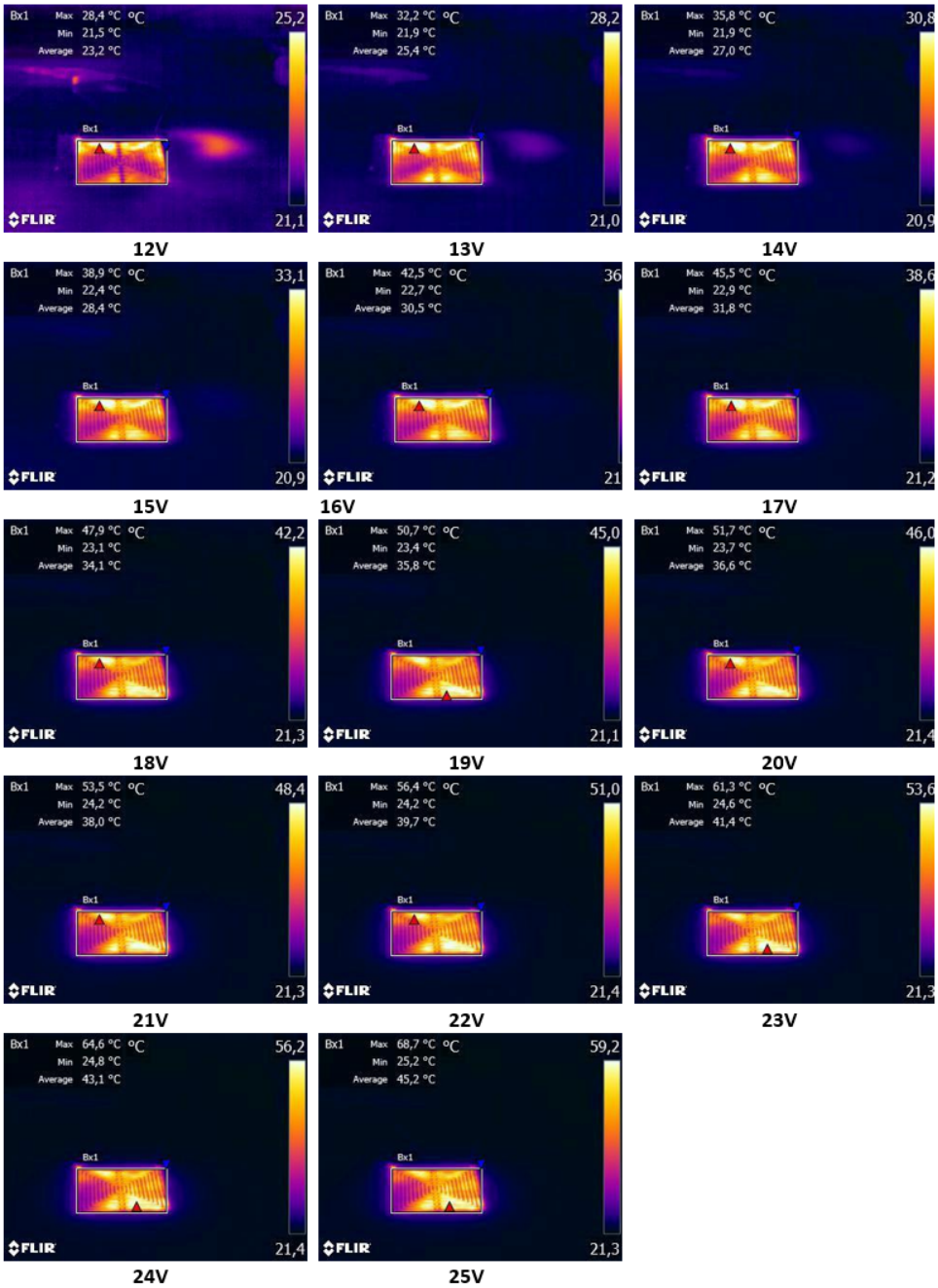


Figura 77: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 2 da geometria 3.

À luz do que foi feito para as restantes amostras, nesta amostra foram definidos 9 pontos (Sp1 a Sp9) para analisar a homogeneização da distribuição de temperaturas ao longo da amostra analisada.

Numa fase inicial, como é possível na figura 78 (esquerda), para 12 V de tensão fornecida, verifica-se que as temperaturas de todos os pontos considerados são próximas. No entanto, a partir dos 18 V de tensão é possível verificar uma diferença de temperaturas entre o ponto Sp9 (38.1 ^oC) e Sp7 (27.9 ^oC) consideráveis, aproximadamente de 10 ^oC, o que ainda é bastante, considerando a distância entre estes pontos (figura 78 (centro)). Esta diferença aumenta bastante, à medida que a tensão fornecida também aumenta, como por exemplo para 23 V a diferença de temperaturas entre o ponto Sp9 e Sp4 é aproximadamente 28.4 ^oC, como é possível ver na figura 78 (direita).

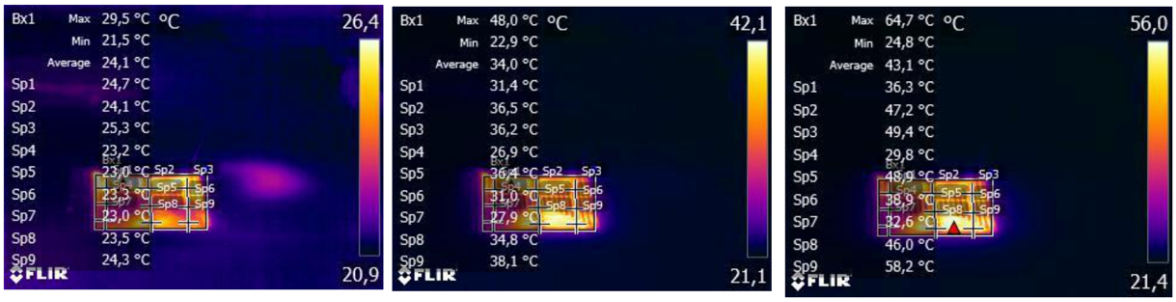


Figura 78: Análise da distribuição de temperaturas dos pontos assinalados para uma tensão de 12 V - esquerda, para uma tensão de 18 V - centro e para uma tensão de 23 V - direita, da Amostra 2 da geometria 3.

Geometria 3 - Amostra 3

Analisou-se a amostra 3 (69Ω) onde foi fornecida inicialmente uma tensão próxima de 12 V, registou-se que a temperatura média incial é aproximadamente 21.6 ^oC e a temperatura máxima próxima de 28 ^oC. Para esta tensão, a temperatura máxima varia cerca de 1.6 ^oC (28 ^oC - 29.6 ^oC) e a temperatura média varia cerca de 0.2 ^oC (21.6 ^oC - 21.4 ^oC).

Em média, a temperatura média variou aproximadamente 0.3 ^oC, num intervalo de tempo de 3 minutos e a temperatura máxima variou cerca de 4 ^oC, no mesmo intervalo de tempo. A maior variação da temperatura média registou-se aos 22 V, cerca de 0.3 ^oC (22.8 ^oC - 23.1 ^oC) e a menor aos 23 V, cerca de 0.1 ^oC (23.2 ^oC - 23.3 ^oC). Quanto à temperatra máxima, a maior variação registou-se aos 22 V, cerca de 7.8 ^oC (56.8 ^oC - 64.6 ^oC). A menor variação foi registada aos 23 V, cerca de 0.2 ^oC (64.6 ^oC - 64.8

^oC).

No global, possível afirmar que a temperatura média variou cerca de 2 ^oC (21.6 ^oC - 23.6 ^oC) e a temperatura máxima variou cerca de 45.5 ^oC (28 ^oC - 73.5 ^oC), durante 37 minutos, com uma variação de 12 V da tensão (12 V-25 V).

Na figura 79 é apresentada a variação da temperatura máxima e média em função do tempo e na figura 80 é possível ver a variação da temperatura máxima e média em função da tensão.

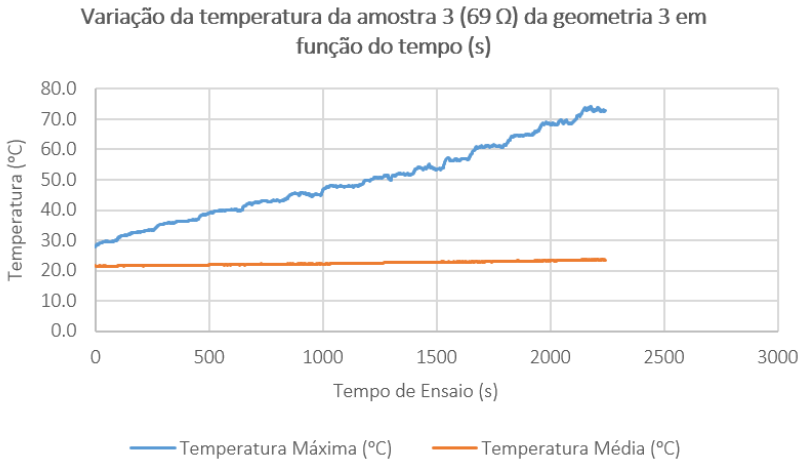


Figura 79: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 3 em função do tempo.

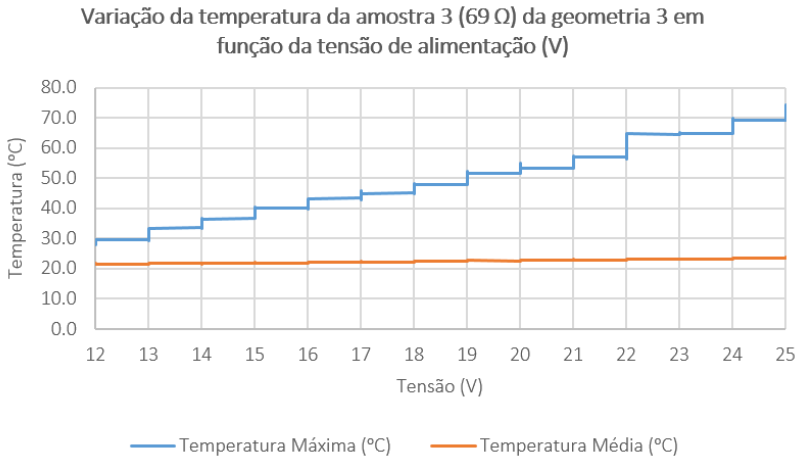


Figura 80: Variação de temperatura da amostra 3 da geometria 3 em função do tempo.

Na figura 81 é possível analisar a evolução da distribuição de temperaturas ao longo do ensaio.

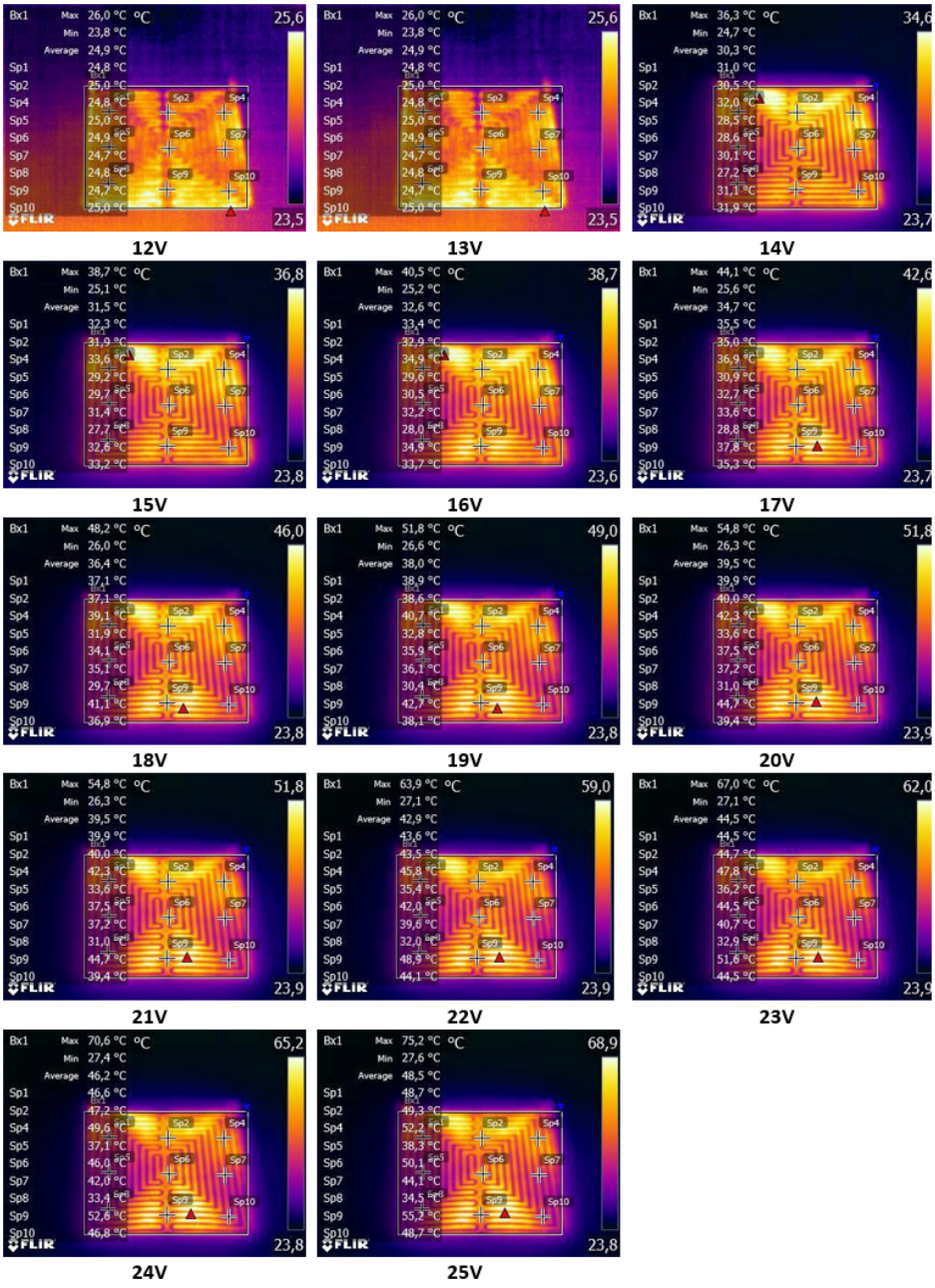


Figura 81: Evolução da distribuição de temperaturas da amostra 3 da geometria 3.

Fazendo uma análise visual da distribuição de temperaturas é possível verficar que o substrato aquece mais que a própria resistência. Quanto à distribuição de temperaturas ao longo da amostra é possível afirmar que numa fase inicial as temperaturas dos pontos assinalados (Sp1 a Sp9) são próximas, no entanto a partir da tensão de 18 V verifica-se uma diferença de temperaturas entre o ponto Sp5 e Sp9 de aproximadamente 10 ^oC, o

que é bastante considerando a distância entre ambos os pontos. Esta diferença acentua-se bastante à medida que a tensão fornecida aumenta, como é visível ver nas imagens da figura 81.

Relativamente ao posicionamento dos pontos quentes, verifica-se uma alteração ao longo do tempo de ensaio. No entanto, à luz do que acontece com as restantes amostras da geometria 3, à medida que a tensão fornecida aumenta, verifica-se uma migração dos pontos quentes para junto da zona central, nomeadamente nas zonas mais curvilíneas do circuito.

Por fim, à luz do que foi feito anteriormente, relativamente à influência do ensaio de caracterização térmica na intergridade do circuito impresso, foi feita a medição da resistência das pistas antes e depois do ensaio.

Por observação do gráfico apresentado na figura 82 é possível concluir que o ensaio realizado a cada amostra provocou uma ligeira variação do valor da resistência, mas nada significativo. Esta variação pode estar relacionada com a variação da tempertaura ambiente no momento em que é feita a medição da resistência do circuito e não com a degradação ou oxidação do mesmo.

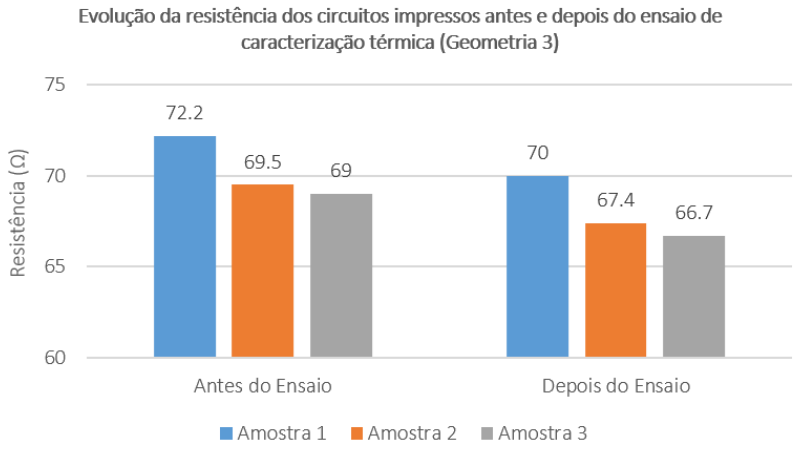


Figura 82: Influência do ensaio de caracterização térmica na integridade e funcionamento do circuito impresso da geometria 3.

De um modo geral, para além da análise do comportamento do circuito impresso ao fornecimento de tensão, bem como do comportamento do substrato à variação de temperatura foi feita a determinação do fluxo de calor associado a cada amostra de acordo com o ensaio realizado.

Esta determinação era o foco desta etapa do projeto de modo a garantir o correto

funcionamento do circuito aquando do teste na câmara climática. Deste modo, foi estipulado que seria fornecida ao circuito uma tensão tal que permitisse que o mesmo atingisse temperaturas próximas de 60 ^oC.

Para proceder ao cálculo do fluxo de calor associado ao sistema foram utilizadas as equações 3.8 e 3.12 apresentadas no capítulo 3.

Na tabela 17 são apresentados os valores tensão fornecida ao sistema quando a amostra atingisse 60 ^oC de temperatura máxima durante o ensaio da caracterização térmica, a intensidade de corrente correspondente, o fluxo de calor e a área de todo o circuito impresso.

Tabela 17: Área, Tensão de alimentação, Intensidade de corrente e fluxo de calor médio associado a cada amostra da geometria 1, 2 e 3 para que a mesma atinja 60 ^oC de temperatura máxima no ensaio de carcaterização térmica.

Geometria	**Área** (m^2)	**Amostra**	**Tensão (V)**	**Intensidade de Corrente (A)**	**Fluxo de Calor** ($W \cdot m^{-2}$)
Geometria 1	0.004377	1	19	0.2	868
		2	22	0.2	1005
		3	22	0.2	1005
Geometria 2	0.004532	1	15	0.5	1655
		2	15	0.4	1324
		3	15	0.4	1324
Geometria 3	0.0044538	1	22	0.3	1482
		2	22	0.2	988
		3	22	0.2	988

Considerando os resultados obtidos e as conclusões retiradas nos ensaios de caracterização térmica, foram apenas selecionadas 2 amostras da geometria 1 e 2 para análise na câmara climática e apenas 1 amostra da geometria 3.

A escolha foi feita de forma aleatória e considerando apenas as amostras que tinham sido analisadas nos ensaios de caracterização térmica até ao momento, uma vez que nem todos os ensaios foram feitos no mesmo dia.

5.2.3 Ensaios na Câmara Climática

Considerando os ensaios de caracterização térmica realizados previamente, foram selecionadas as amostras para analisar o seu comportamento como sistema de degelo e anti-gelo, como foi já explicado.

Cada uma destas amostras foi isolada de forma distinta, isto é, no caso da geometria 1 a amostra 1 foi isolada com fita-cola e a amostra 2 com PET-G, no caso da geometria 2 a amostra 2 foi isolada com fita-cola e a amostra 3 com PET-G. A geometria 3, a amostra 1 foi isolada com fita-cola.

Inicialmente, foi estudada a melhor técnica para permitir a formação de gelo à superfície das amostras. Deste modo, a primeira técnica passa por, com recurso a um borrifador, borrifar manualmente, de 2 em 2 minutos, água para as amostras, durante 1 hora. A segunda técnica passa por borrifar continuamente manualmente água para as amostras, durante 1 hora.

Na figura 83 é possível ver a evolução da massa da amostra durante o ensaio referente a cada uma das técnicas definidas.

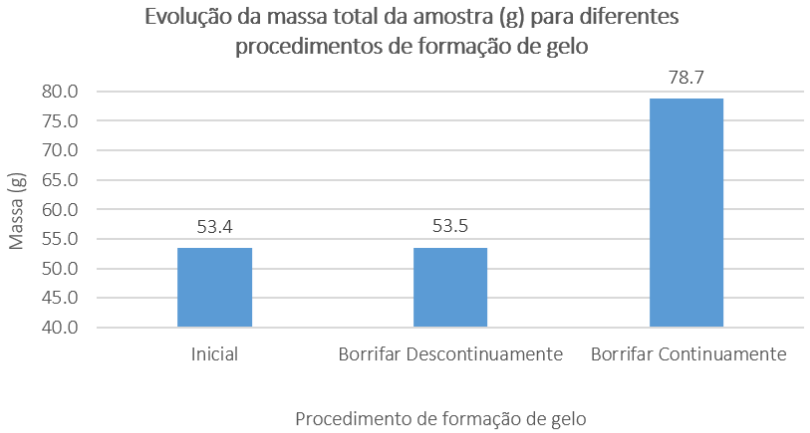


Figura 83: Evolução da massa total ao longo do ensaio de formação de gelo com recurso a diferentes técnicas.

Deste modo, é claramente vísivel que borrifar continuamente aumentou bastante a quantidade de gelo formada à superfície da amostra quando comparada com a técnica de borrifar descontinuamente. Verificou-se um aumento de 0.25% da massa inicial com a técnica de borrifar descontinuamente e um aumento de aproximadamente 47.41% da massa inicial, borrifando continuamente.

Por isso e considerando a melhor técnica, foram borrifadas manualmente as amostras, em intervalos de tempo de 5 minutos, de forma contínua, isto é, cada pessoa que borrifava permanecia 5 minutos na câmara climática e ao fim desse tempo trocava com outra pessoa. Este processo de troca influencia não só a humidade relativa da câmara climática, uma vez que a porta era aberta sempre que se verificava uma troca, mas também na acumulação de gelo à superfície das amostras, uma vez que o processo é executado por diferentes pessoas, cujo o ritmo, a distância e a direção em que a água é borrifada varia ainda que ligeiramente, inevitavelmente.

Com o objetivo de alargar o estudo realizado, foi feita uma análise de todas as amostras selecionadas para os ensaios, tanto como sistemas de degelo e anti-gelo. A recolha dos dados referentes às massas é apresentada nos subcapítulos seguintes e no apêndice D.

5.2.3.1 Ensaios de sistemas de anti-gelo

Geometria 1 - Amostra 1 e 2

Começando pela análise da geometria 1, na figura 84 é possível ver a evolução da massa total da amostra 1 e 2 da geometria 1.

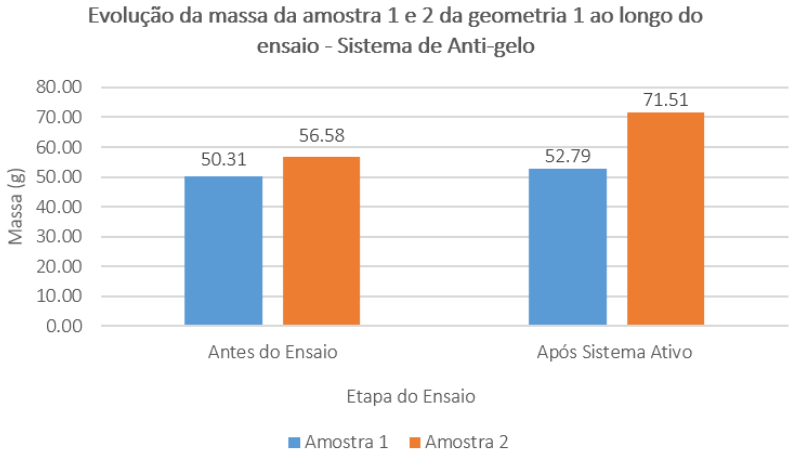


Figura 84: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 1 e 2 da geometria 1.

É importante referir que na amostra 1 o sistema foi alimentado com uma tensão próxima dos 19 V e a amostra 2 com uma tensão próxima dos 22 V.

Como é possível verificar, registou-se um aumento da massa de total de ambas as amostras, no entanto é possível afirmar que a amostra 1 registou um menor aumento da massa total quando comparado com a amostra 2. Estes traduzem-se em aumentos percentuais de 4.9% e 26.4% de massa de gelo ganho, respetivamente.

Na figura 85 é possível ver as amostras 1 (esquerda e centro) e 2 (centro e direita) da geometria 1 antes de inciar o ensaio.

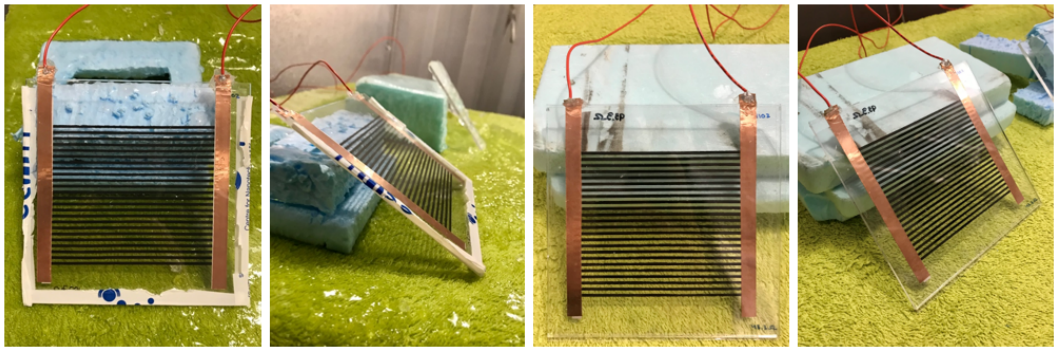


Figura 85: Amostra 1 (Esquerda e centro) e 2 (centro e direita) antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo

Na figura 86 é possível analisar visualmente cada uma das amostras analisadas após o ensaio do sistema de anti-gelo.

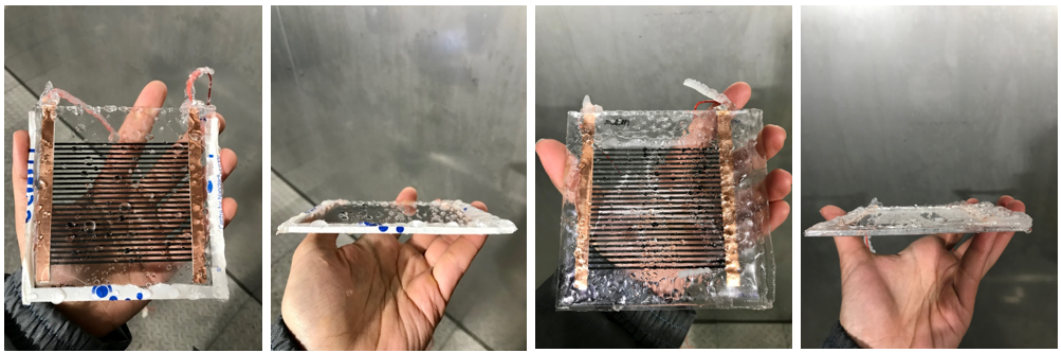


Figura 86: Amostra 1 (Esquerda e centro) e 2 (centro e direita) depois do ensaio do sistema de anti-gelo

Como é possível verificar a amostra 2 registou uma maior acumulação de gelo à superfície, nomeadmente na zona lateral da mesma.

Essencialmente, em ambas as amostras não se verificou formação de gelo à superfície das mesmas, na região onde o circuito impresso é colocado. No entanto, registou-se

uma maior acumulação de gelo na região periférica. Essa diferente distribuição da acumulação de gelo traduz a incapacidade do sistema em conduzir o calor em toda a amostra, isto é, a má condução de calor em toda a superfície da mesma, evitando uma homogenização da temperatura ao longo de toda a superfície.

Analisando as zonas onde foi registada a maior acumulação de gelo é vísivel que esta é superior na zona lateral direita. Isto deve-se ao facto da incidência das gotículas de água borrifadas ser superior nesta região devido à posição relativa da amostra em relação ao borrifador.

Na zona inferior da amostra 1 é visível uma não formação de gelo, enquanto que na amostra 2 essa acumulação é ligeiramente superior, mas pouco significativa.

Considerando a forma como ambas as amostras foram acopladas, isto é com fita-cola ou com PET-G, após os ensaios verificou-se que a amostra 1 apresentava uma camada de água entre o circuito impresso e o acrílico, para além de uma camada de ar. No caso da amostra 2, essa acumulação de água não foi verificada.

Do ponto de vista da condução, existir uma camada extra entre o circuito e o acrílico, aumenta a resistência à transferência de calor, o que se traduz, nesta situação, numa dificuldade de aquecimento da amostra e por isso, um consequente aumento da formação de gelo à superfície relativamente à quantidade de gelo formada à superfície da amostra isolada com PET-G. Por outro lado, a partir de um certo instante, essa camada de água acumulada poderia atingir uma temperatura tal que facilitasse o aquecimento da amostra e por isso reduzir a quantidade de gelo formada à superfície da amostra 1, quando comparada com quantidade de gelo formada à superfície da amostra 2.

No entanto, conclui-se que esta diferença de acumulação de gelo à superfície não foi influenciada de forma tão signficativa pela acumulação ou não, de água entre o circuito e o acrílico, isto é, o tipo de acoplamento não influenciou de forma conclusiva os resultados obtidos.

O que poderá ter influenciado esta diferente acumulação em cada uma das amostras poderá ter sido o facto de terem sidos realizados estes ensaios em dias diferentes, o que se traduz em pessoas distintas a fazer o procedimento, ou seja, diferente ritmo a borrifar água, diferente direção a borrifar em relação à amostra, utilização de diferentes borrifadores, com diferentes aberturas. Por exemplo, no caso da amostra 1 foram utilizados 2 borrifadores distintos, um com menor abertura, logo tamanho de gotas maiores e um com maior abertura, logo com tamanhos de gota menores. No caso da amostra 2, o ensaio foi realizado com recurso apenas ao borrifador com maior abertura, isto é, menor tamanho de gota, o que acaba por se traduzir numa maior dispersão da água e

maior facilidade em solidificar a água depositada.

Geometria 2 - Amostra 2 e 3

Analisando agora, as amostras referentes à geometria 2, a amostra 2 e 3 foram alimentadas durante o ensaio com uma tensão próxima de 15 V.

Na figura 87 é possível ver a evolução da massa total das amostras 2 e 3 ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo.

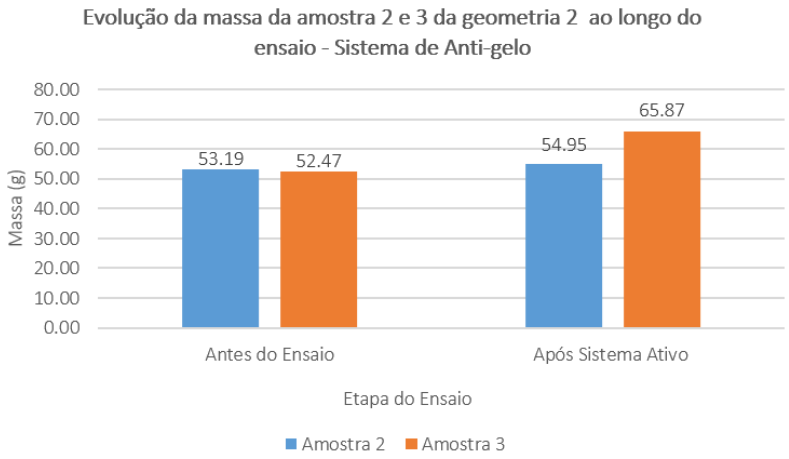


Figura 87: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 2 e 3 da geometria 2.

Fazendo uma análise dos dados apresentados na figura 87 é possível verificar que tanto na amostra 2 como na 3 se verificou um aumento da massa total da amostra, o que implica uma agregação e acumulação de gelo à superfície da mesma, no entanto a amostra 3 apresentou um aumento superior ao registado na amostra 2.

A amostra 2 registou aumento de massa próximo de 1.77 g, o que se traduz num aumento de 3.3%. A amostra 3 verificou um aumento de 13.40 g da massa total, o que representa um aumento de 25.5%.

Na figura 88 é possível ver as amostras 2 e 3 da geometria 2 antes do início do ensaio.

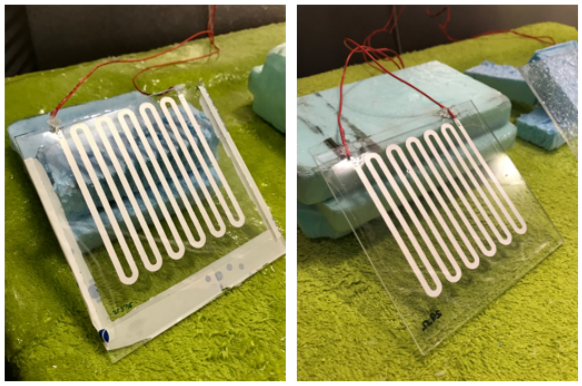


Figura 88: Amostra 2 (Esquerda) e 3 (direita) antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo

Na figura 89 é possível ver as amostras 2 e 3 da geometria 2 depois do ensaio.

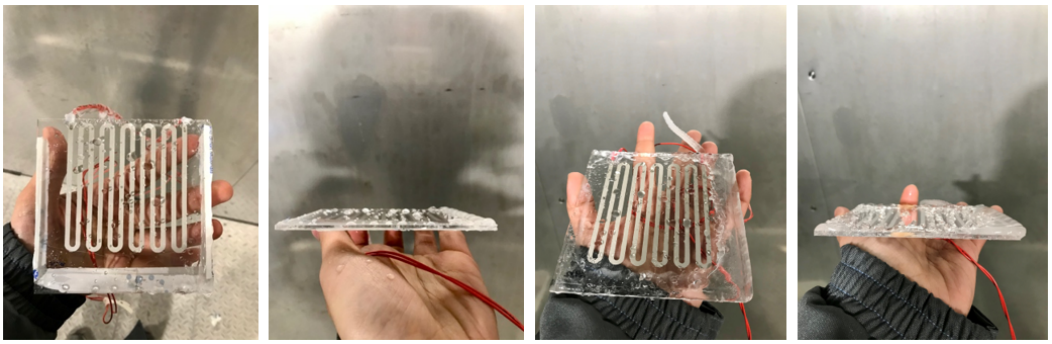


Figura 89: Amostra 2 (Esquerda) e 3 (direita) depois do ensaio do sistema de anti-gelo

Os resultados apresentados nas figuras 88 e 89 vão ao encontro dos resultados apresentados no gráfico da figura 87, uma vez que é visível a maior agregação de gelo à superície da amostra 3 e menor agregação de gelo na amostra 2 da geometria 2. Tal como já aconteceu nas amostras anteriores, relativamente a outras geometrias é possível verificar uma maior acumulação de gelo nas zonas lateriais, o que pode ser explicado pelo dificuldade de condução de calor ao longo de toda a superfície, acabando apenas por derreter o gelo na região onde o sistema foi colocado.

A maior acumulação de gelo do lado direito da amostra está relacionada com a maior taxa de deposição de gotas água naquela região devido à posição relativa da amostra em relação ao borrifador de água, durante o ensaio, como foi explicado anteriormente.

Relativamente à influência do isolamento na condução de calor e formação de gelo à

superfície, mais uma vez se verifica que as amostras isoladas com PET-G estão associadas à maior agregação de gelo à superfície, menor quantidade de água entre o circuito impresso e a superfície de PMMA, e, as amostras isoladas com fita-cola estão associadas a menor agregação de gelo à superfície, no entanto maior quantidade de água entre o circuito impresso e a superfície de PMMA.

À luz do que foi concluido na geometria 1, acredita-se que este acoplamento não teve uma influência tão significativa ao ponto de se ter registado uma diferença tão grande na acumulação de gelo, nas amostras isoladas com PET-G.

O que poderia melhorar esta análise da influência do acoplamento da formação de gelo seria realizar mais ensaios e melhorar o procedimento, do ponto de vista do tipo de borrifadores utilizados, o número de pessoas a realizar o procedimento, a distância à amostra e a direção em que a água é borrifada.

Geometria 3 - Amostra 1

Por último, no caso da geometria 3 apenas foi analisada a amostra 1, isolada com fita-cola. Na figura 90 é possível ver a evolução da massa total da amostra 1 da geometria 3 ao longo de todo o ensaio. É importante referir que ao sistema foi fornecida uma tensão de alimentação próxima dos 22 V.

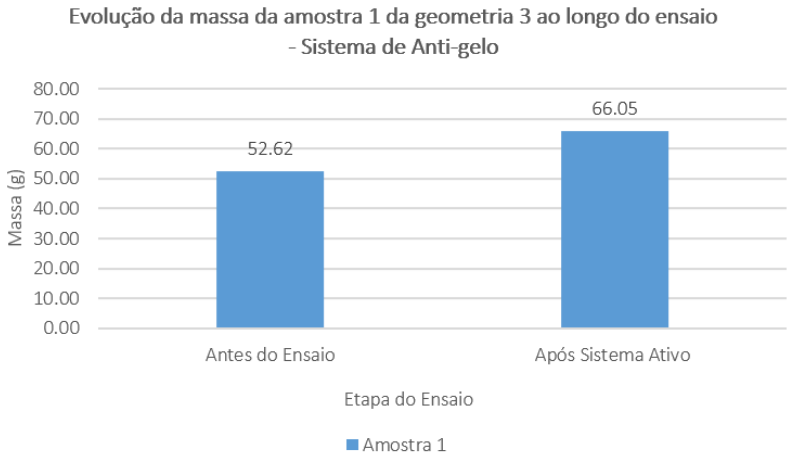


Figura 90: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de anti-gelo da amostra 1 da geometria 3.

Como é possível ver, verificou-se uma aumento da massa total da amostra 1 da geometria 3. Este aumento traduz-se num ganho de 13.43 g de gelo à superfície da

amostra, o que representa um aumento percentual de 25.5% de massa.

Fazendo uma análise visual da agregação e acumulação de gelo à superfície da amostra, na figura 91 é possível ver a amostra antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo e na figura 92 é possível ver a agregação de gelo na superfície da amostra após o ensaio.

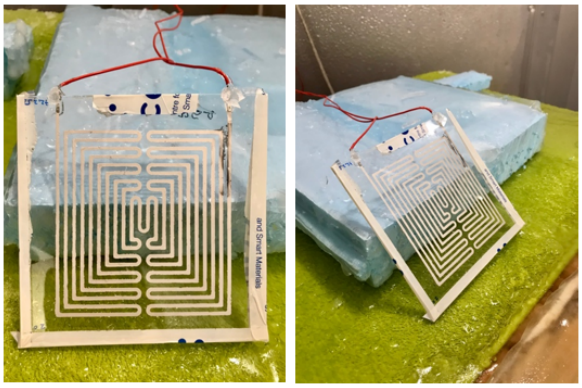


Figura 91: Amostra 1 da geometria 3 antes de iniciar o ensaio do sistema de anti-gelo.

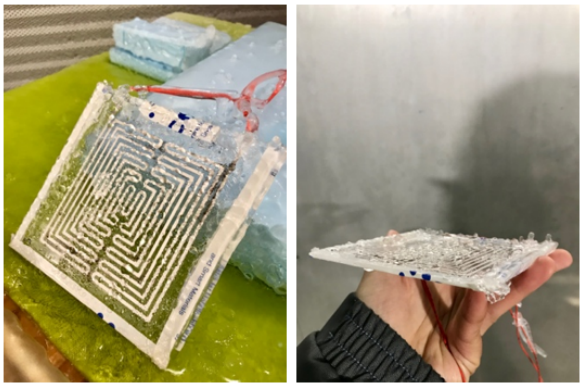


Figura 92: Amostra 1 da geometria 3 após o ensaio do sistema de anti-gelo.

É visível a formação de gelo à superfície e ao contrário daquilo que se verificou para outras geometrias, nesta amostra houve formação e agregação de gelo em diferentes zonas da superfície, incluindo na zona sobre o circuito impresso e não apenas nas zonas laterais. No entanto, e relembrando as regiões mais quentes durante o ensaio de caracterização térmica desta amostra, isto é, na zona central, nomeadamente nas zonas mais curvilíneas, é possível verificar que nesta região a acumulação de gelo é nula, mas que nas restantes zonas do circuito, o mesmo já não se verifica.

De uma maneira geral e considerando que quanto maior for o aumento percentual da massa total da amostra menos eficaz é o circuito impresso como sistema de anti-gelo,

é possível afirmar que a geometria 2 é a que apresenta melhores resultados tanto do ponto de vista de não formação de gelo à superfície das amostras, bem como da maior área da amostra livre de acumulação de gelo.

5.2.3.2 Ensaios de sistemas de degelo

Neste ensaios de sistema de degelo, é importante relembrar que em alguns ensaios foi necessário realizar uma etapa extra, um repouso das amostras na câmara climática, com uma duração próxima de 1.5h.

Geometria 1 - Amostra 1 e 2

Relativamentre à geometria 1 foram analisadas duas amostras, a amostra 1 (100.7 Ω) e a amostra 2 (93.3 Ω). A amostra 1 foi isolada com fita - cola e amostra 2 com PET-G. O circuito da amostra 1 foi alimentado com uma tensão de 19 V e o circuito da amostra 2 foi alimentado com uma tensão de 22 V.

É importante referir que estes ensaios não foram realizados no mesmo dia, nem pelas mesmas pessoas a executar o procedimento, nem com recurso aos mesmos borrifadores de água, tal como aconteceu nas amostras analisadas como sistemas de anti-gelo.

Na figura 93 é possível ver a evolução da massa, ao longo das várias etapas do ensaio do sistema de degelo da amostra 1 da geometria 1 e do volume de controlo (VC).

Por análise dos resultados relativos à quantidade de gelo formada e/ou derretida na amostra 1 após o ensaio do sistema de degelo é possível verificar que, após a etapa incial de formação de gelo e posterior repouso da amostra 1 na câmara climática, formou-se cerca de 48.83 g de gelo à superfície da mesma. Após o ensaio do sistema de degelo verificou-se uma perda de aproximadamente 0.72 g de gelo, o que é traduzido por uma perda percentual de aproximadamente 1.5%.

Relativamente ao volume de controlo verifica-se sempre um aumento da massa total, uma vez que ao longo do ensaio do sistema de degelo, todas as amostras são continuamente borrifadas durante 30 minutos. Após esta etapa, é feita a pesagem das amostras, no entanto nesse processo, em algumas situações verificou-se uma diminução da quantidade do gelo formada, dado que o gelo acabava por derreter, o que justifica a diminuição da massa total desta amostra da etapa de formação de gelo para a etapa de repouso na câmara climática.

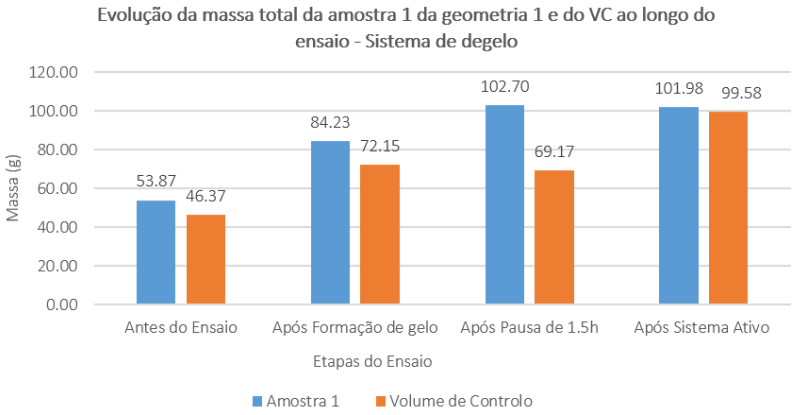


Figura 93: Evolução da massa total, ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 1 da geometria 1 e do volume de controlo.

Na figura 94 são apresentados os registos fotográficos referentes à amostra 1 (esquerda e centro) e do VC (centro e direita) durante o ensaio após 10 minutos do início da etapa de formação de gelo da amostra 1 e do volume de controlo, respetivamente. Visualmente verificou-se formação e agregação de gelo à superfície muito rapidamente, ainda que a camada de gelo formada fosse ainda bastante fina e fraca. É, também visível a maior formação e agregação de gelo na zona lateral direita, tanto do volume de controlo como da amostra 1. Isto é explicado pela posição relativa do borrifador em relação às amostras.

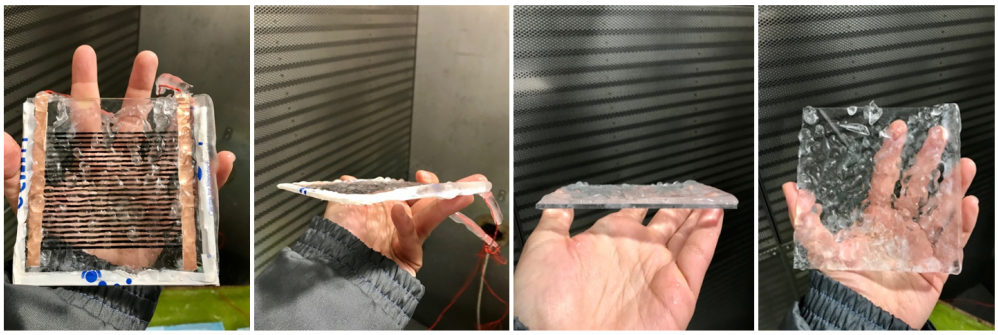


Figura 94: Registo fotográfico da amostra 1 (esquerda e centro) e do volume de controlo (centro e direita), 10 minutos após o início da etapa de formação de gelo, no ensaio do sistema de degelo.

Na figura 95 é possível ver a agregação de gelo à superfície tanto da amostra 1 como do volume de controlo após 1.5h de repouso na câmara climática. Tal como os resultados numéricos relativos à massa das amostras é possível verificar uma aumento considerável

da massa de gelo da amostra 1 da geometria 1 e pouca variação da quantidade de gelo à superfície do volume de controlo.

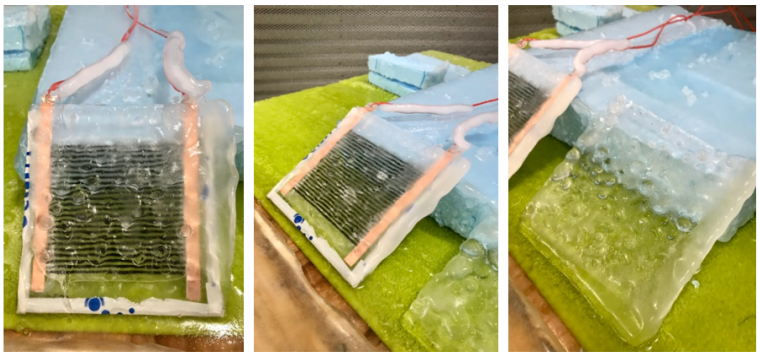


Figura 95: Amostra 1 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após repouso de 1.5h na câmara climática.

Na figura 96 é possível ver a agregação de gelo à superfície das amostras consideradas, após o sistema de degelo ser colocado em funcionamento e visualmente, relativamente ao volume controlo verifica-se efetivamente um aumento da quantidade de gelo à superfície da amostra.

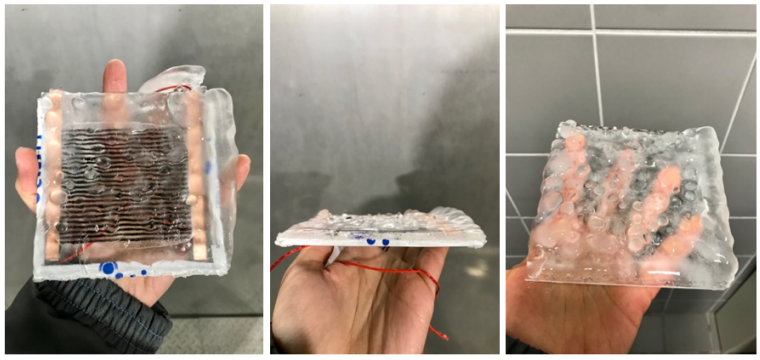


Figura 96: Amostra 1 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo após sistema de degelo ativo (direito).

Quanto à amostra 1 da geometria 1, os resultados referentes à massa total revelam uma diminuição pequena da massa total e visualmente é possível verificar que na zona das pistas impressas do circuito, a quantidade de gelo aí acumulada é menor depois do sistema de degelo se encontrar ativo. Contudo, e considerando que durante o ensaio se continua a borrifar água sobre as amostras, esta forma gelo à superfície ainda que não na zona central da amostra, onde se situa o circuito impresso. Também é possível ver

que a acumulação de gelo é superior nas zonas laterais, onde não há condução direta de calor pelo circuito impresso e devido ao posicionamento do borrifador em relação à amostra.

Isto é, apesar dos resultados numéricos referente à massa traduzirem uma redução ligeira da mesma, esta pequena redução resulta do balanço da redução considerável de gelo na zona central da amostra e do aumento da acumulação de gelo nas zonas lateriais da mesma, verificando-se quase uma compensação do gelo derretido na zona central, pela acumulação de gelo nas zonas laterais.

Na figura 97 é possível ver a evolução da temperatura da superfíficie da amostra, em diferentes etapas do ensaio com o sistema de degelo ativo.

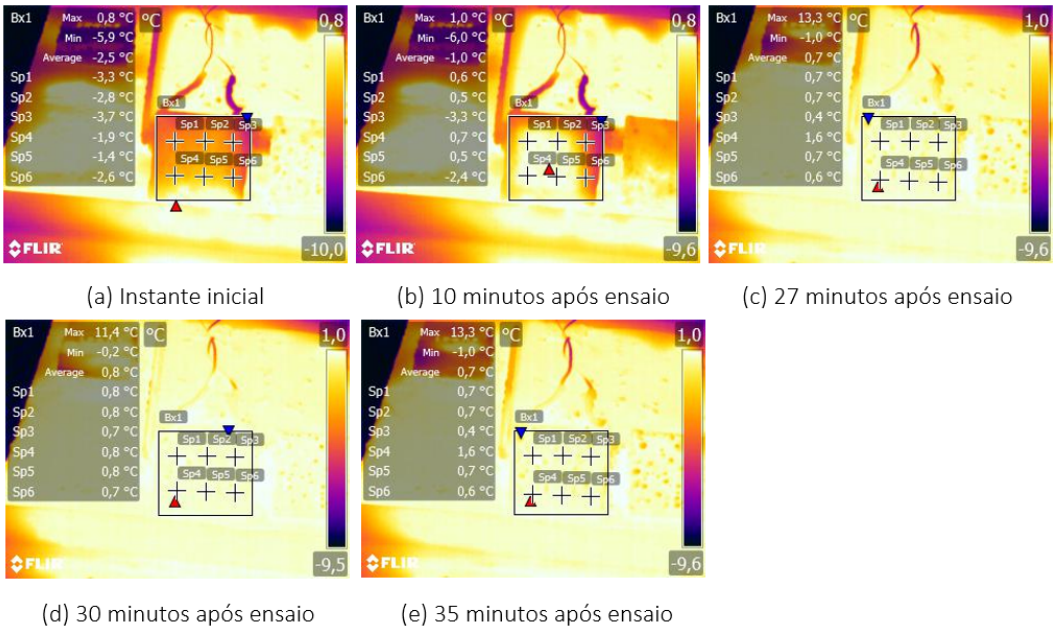


Figura 97: Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo ligado, da amostra 1 da geometria 1.

Com recurso à informação recolhida na câmara termográfica, cuja gravação foi iniciada momentos antes do sistema ser ativado, pode se verificar que a temperatura na zona central, no ponto mais quente da amostra varia cerca de 3.3 ^oC (-1.3 ^oC - 2.0 ^oC) , em 35 minutos de ensaio, o que permite afirmar que o sistema analisado teve a capacidade de derreter a massa de gelo na zona central da amostra, no entanto verificou-se uma dificuldade da condução de calor ao longo de toda a superfície, não permitindo que o gelo à sua superfície derrete-se totalmente ou parcialmente.

No caso desta amostra, onde ainda se verifica uma camada de gelo sobre toda a

superfície, a informação recolhida pela câmara termográfica não permite verificar o tempo que o ciruito impresso demora até derreter o gelo à sua superfície.

Quanto à amostra 2 da geometria 1, na figura 98 é possível ver a evolução da massa total da amostra 2 da geometria 1 e do volume de controlo ao longo de todas as etapas do ensaio, isto é, antes do ensaio, após a etapa de formação de gelo, após uma pausa de 1.5h na câmara climática e após o ensaio com sistema de degelo ativo.

Por análise gráfica da evolução da massa total da amostra 2 e do volume de controlo é possível verificar um aumento constante da da massa de gelo até ao ínicio do ensaio de sistema de degelo, isto é, até à etapa de pausa de 1.5h na câmraca climátiva, inclusive.

Foi registado no total, a formação de 46.16g de gelo à superfície da amostra 2 e 28.83g de gelo à superfície do volume de controlo, considerando tanto a etapa de formação de gelo e posterior pausa de 1.5h na câmara climática.

Após o ensaio do sistema de degelo verificou-se uma diminuição da massa de gelo da amostra 2 em 93.6 % da massa total de gelo, isto é, cerca de 43.21 g e uma aumento da massa de gelo sobre o volume de controlo de aproximadamente 5.52 g, resultando numa quantidade de gelo total formada em 34.35 g.

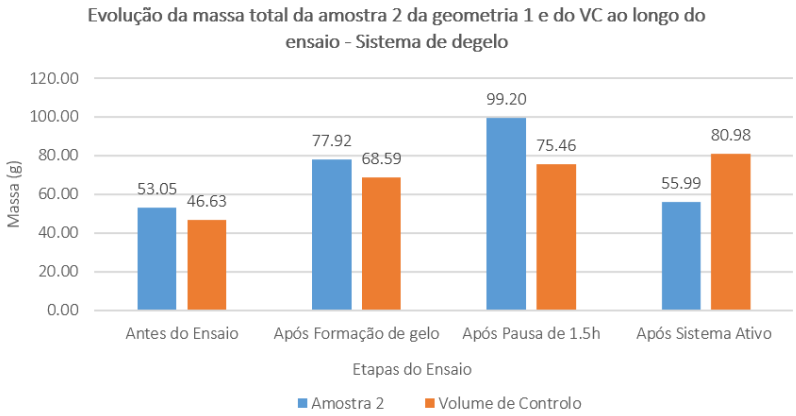


Figura 98: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 2 da geometria 1 e do volume de controlo.

Analisando agora, os registos fotográficos referentes às amostras em análise, na figura 99 é possível ver a formação de gelo à superfície da amostra e do volume de controlo após 10 minutos do início da etapa de formação de gelo.



Figura 99: Amostra 2 da geometria 1 e volume de controlo após 10 minutos da etapa de formação de gelo.

Na figura 100 é possível ver a agregação de gelo após a etapa de repouso de 1.5h na câmara climática da amostra 2 da geometria 1 e de acordo com os resultados apresentados no gráfico da figura 98 é possível verificar o claro aumento da massa total tanto do volume de controlo como da amostra 2 da geometria 1. É possível também verificar que tanto da amostra como do volume de controlo apresentam uma maior acumulação de gelo do lado direito, uma vez que foi borrifada água do lado direito em relação à amostra, isto é, verificou-se maior deposição de gotículas de água nesta região e por consequência maior agregação e formação de gelo.



Figura 100: Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após 1.5h de repouso na câmara climática.

Na figura 101 é possível ver a agregação de gelo após colocar o sistema de degelo em funcionamento, depois de 35 minutos de ensaio.

À luz do que foi já referido acerca da quantidade de gelo derretida à superfície da amostra, é possível ver que tal como aconteceu com a amostra 1 desta geometria, apenas foi derretido o gelo na zona onde o circuito é posicionado, ou seja, observa-se novamente uma dificuldade em que se verifique condução de calor homogénea por toda

a superfície, nomeadamente nas zonas laterais da mesma.

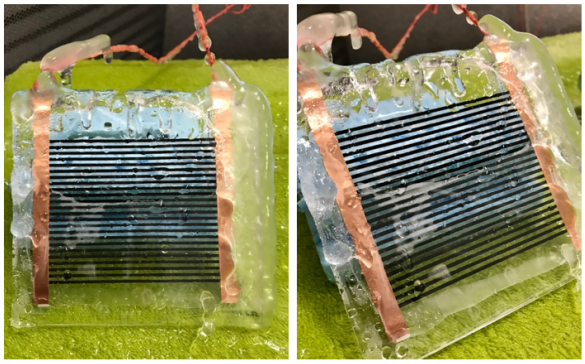


Figura 101: Amostra 2 da geometria 1 após o sistema de degelo estar em funcionamento 35 minutos.

Na figura 102 é possível ver a evolução da temperatura à superfície da amostra e o claro degelo. Quanto à informação recolhida pela câmara termográfica é possível verificar que o sistema derreteu o gelo formado à superfície na zona central 9 minutos depois do início do ensaio. A temperatura nesta zona varia aproximadamente 24.7 ^oC (-3.1 ^oC - 21.6 ^oC).

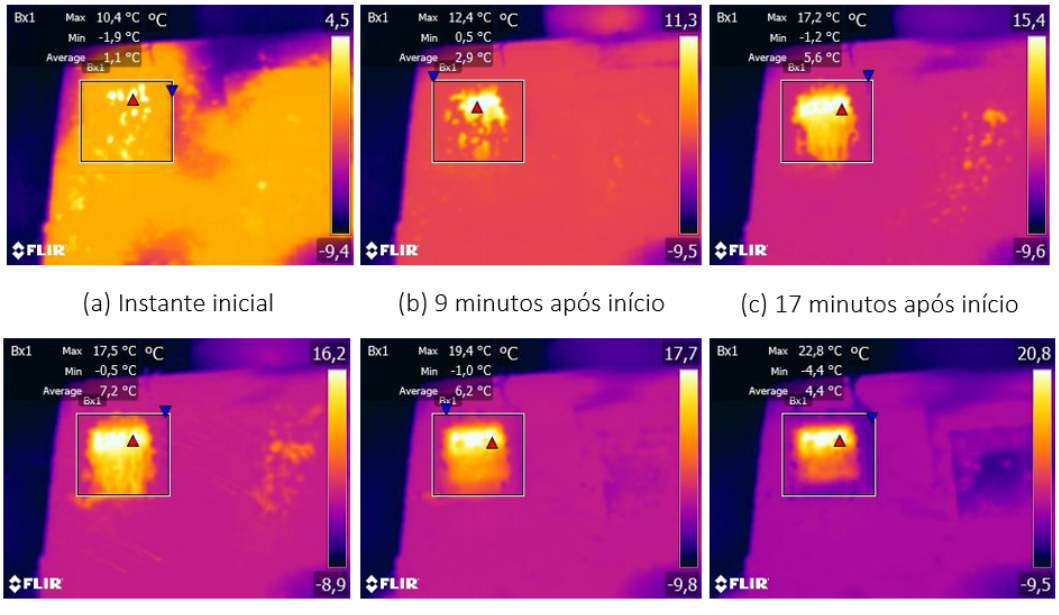


Figura 102: Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 2 da geometria 1.

Geometria 2 - Amostra 2 e 3

Para a geometria 2 foram anlisadas as amostra 2 e 3 onde cada uma delas foi isolada com fita-cola e com PET-G, resptivamente. Neste caso ambas as amostras foram alimentadas com uma tensão idêntica, cerca de 15 V.

Considerando agora a geometria 2, o procedimento tido em conta passou por 2 etapas principais, a formação de gelo, depois manter a mesma em repouso na câmara climática e por último ligar o circuito e continuar a borrifar a amostra continuamente, durante 30 minutos, depois manter a amostra na câmara climática por 5 minutos, em repouso.

Deste modo, na figura 103 é possível ver a evolução da massa total da amostra 2 e do volume de controlo ao longo das etapas do ensaio.

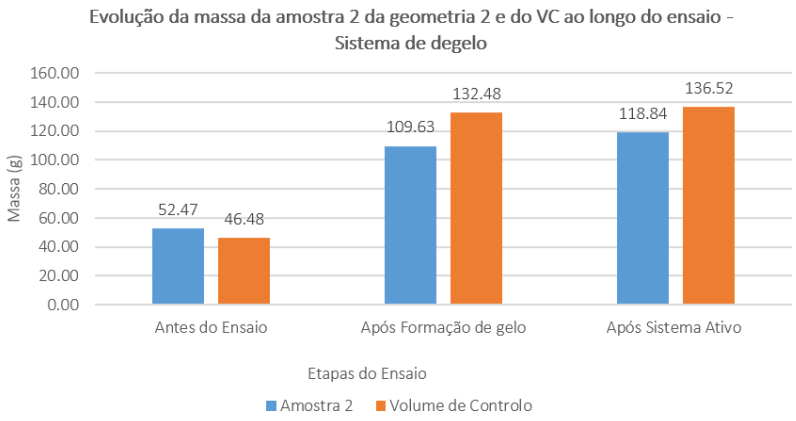


Figura 103: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo, da amostra 2 da geometria 2 e do volume de controlo.

Por análise dos dados apresentados na figura acima é possível verificar que após a etapa de formação de gelo verificou-se uma aumento da massa total, tanto da amostra 2 como do volume de controlo, como era expectável. Este aumento traduz-se em 57.16 g de gelo formada e agregada à superfície da amostra 2 e cerca de 85.99 g de gelo à superfície do volume de controlo. Esta diferença de massa de gelo formada da amostra para o volume de controlo pode estar diretamente relacioanda com a posição relativa de cada uma destas amostras ao borrifador. A água foi borrifada mais próximo do volume de controlo, o que explica a maior quantidade de gelo formada à sua superfície.

Após ligar o circuito à fonte de tensão e ser fornecida a tensão pré definida, verificou-se um aumento da massa total de ambas amostras, isto é, da amostra 2 da geometria 2

e do volume de controlo. O que se traduz num ganho de 9.21g de gelo à superfície da amostra 2, traduzindo-se num aumento de 16.1 % da massa de gelo. No caso do volume de controlo e uma vez que se continuou a borrifar água sobre o mesmo, verificou-se um aumento da quantidade de gelo total de 90.04 g.

Visualmente é possível confirmar os resultados numéricos acima discutidos. Na figura 104 é possível ver as amostras em análise no início da etapa de formação de gelo.

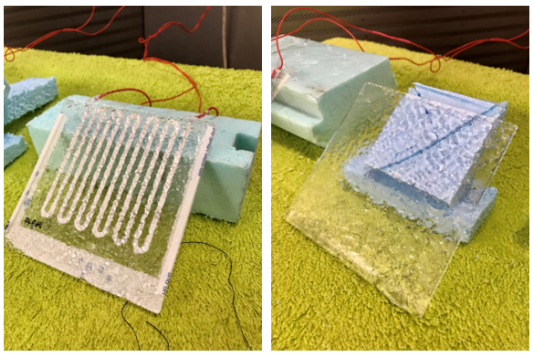


Figura 104: Amostra 2 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) no ínicio da etapa da formação de gelo.

Na figura 105 é possível verificar a formação de gelo á superfície das amostras após a etapa de formação de gelo. É claro o aumento da massa total tanto da amostra como do volume de controlo. É também possível verificar um aumento considerável e a formação de uma camada de gelo com uma espessura considerável. É ainda possível verificar que não se verificou a formação de uma camada homogênea de gelo, dada a posição em que a água foi borrifada para a amostra, ou seja, registou-se uma maior acumalação de gelo à direita e na zona inferior, uma vez que água acaba por escorrer pela amostra e acumular-se na zona inferior.

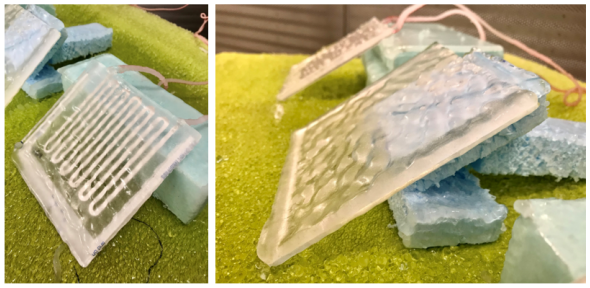


Figura 105: Amostra 2 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo.

Na figura 106 é possível ver a agregação de gelo à superfície da amostra 2 e volume de controlo após o sistema de degelo ter sido ligado. É visível que não se verificou uma redução da camada de gelo à superfície, parecendo ainda que se verificou um aumento da mesma, o que vai ao encontro dos resultados numéricos apresentados no gráfico. Isto permite concluir que, apesar do sistema ter funcionado e ter aquecido a superfície, uma vez que durante o ensaio se verificou um aumento da temperatura na zona do circuito, o mesmo, considerando a quantidade de gelo à superfície, não teve a capacidade de derreter a camada de gelo formada.

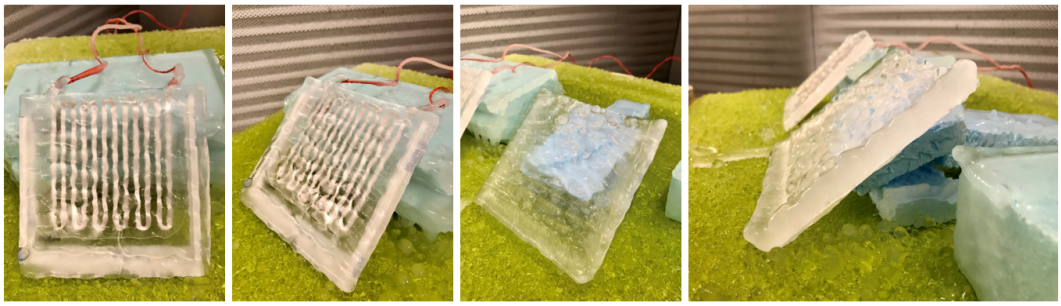


Figura 106: Amostra 2 da geometria 2 (esquerda e centro) e volume de controlo (centro e direita) após o ensaio de degelo.

Apesar do claro aumento da massa e formação de gelo, foi verificada uma região próxima da superfície, onde o contrário foi verificado. Na figura 107 é possível ver a zona próxima da superfície onde o gelo foi derretido.



Figura 107: Região da amostra 2 da geometria 2 onde se verificou que o gelo derreteu.

Após a pesagem da amostra e de uma análise mais próxima da mesma verificou-se

que na zona mais central da amostra, isto é, na zona do circuito impresso, junto à superfície, visivelmente era possível ver uma camada fina sem gelo, ou seja, o circuito teve a capacidade de derreter o gelo próximo da superfície apesar dessa quantidade de gelo derretida ter sido bastante pequena, quando comparada com a quantidade de gelo que se continuou a formar durante o ensaio.

Relativamente aos dados recolhidos pela câmara termográfica não foi possível detetar a camada de gelo mais à superfície a derreter, uma vez que a espessura da camada de gelo à superfície era bastante grande. Deste modo, a variação da tempertura é reduzida durante todo o ensaio variando apenas quando as gotas de água do borrifador caíam sobre a camada de gelo.

Analisando agora, a amostra 3 da geometria 2, na figura 108 é possível ver a evolução da massa total da amostra 3 e do volume de controlo no longo de todo o ensaio do sistema de degelo.

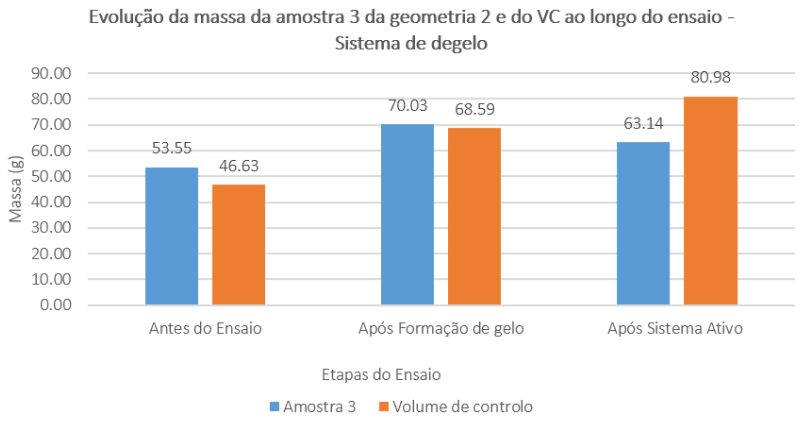


Figura 108: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 3 da geometria 2 e do volume de controlo.

Considerando os resultados apresentados, afirma-se que a etapa de formação de gelo se traduziu na formação de 16.48g de gelo, na superfície da amostra 3 e cerca de 34.35g de gelo à superfície do volume de controlo.

Após o sistema ativo verificou-se que uma perda de 6.89 g de gelo à superfície da amostra 3, o que se traduz numa perda percentual de 41.8% e na formação de 12.39 g de gelo à superfície do volume de controlo.

Verificando visualmente os resultados obtidos, na figura 109 é possível ver o estado incial das amostras uns minutos após o ínicio da etapa de formação de gelo.

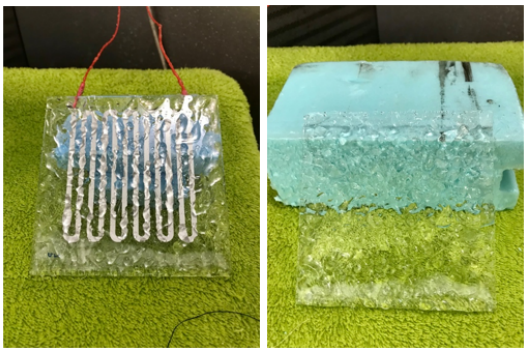


Figura 109: Amostra 3 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) no ínicio da etapa da formação de gelo.

Na figura 110 é visível a acumulação de gelo à superfície da amostra 3 e do volume de controlo.

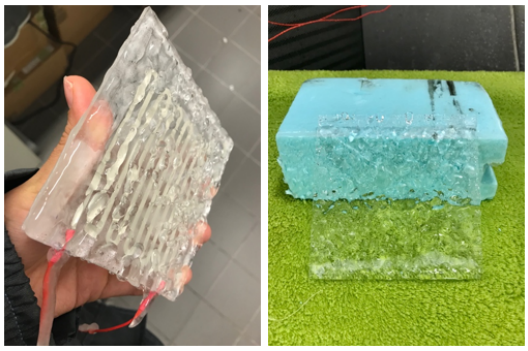


Figura 110: Amostra 3 da geometria 2 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo.

Na figura 111 é possível ver a perda de gelo verificada na amostra 3 da geometria 2 e a acumulação de gelo à superfície do volume de controlo.

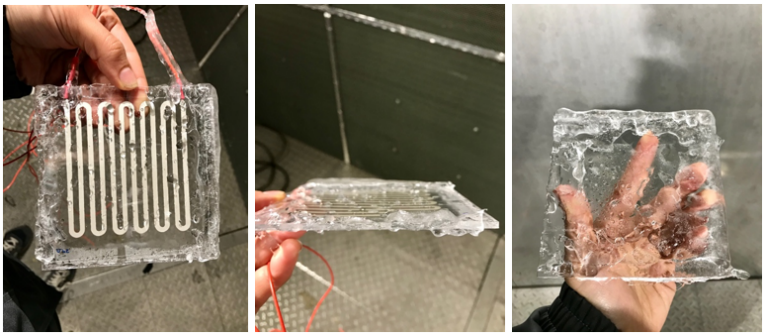
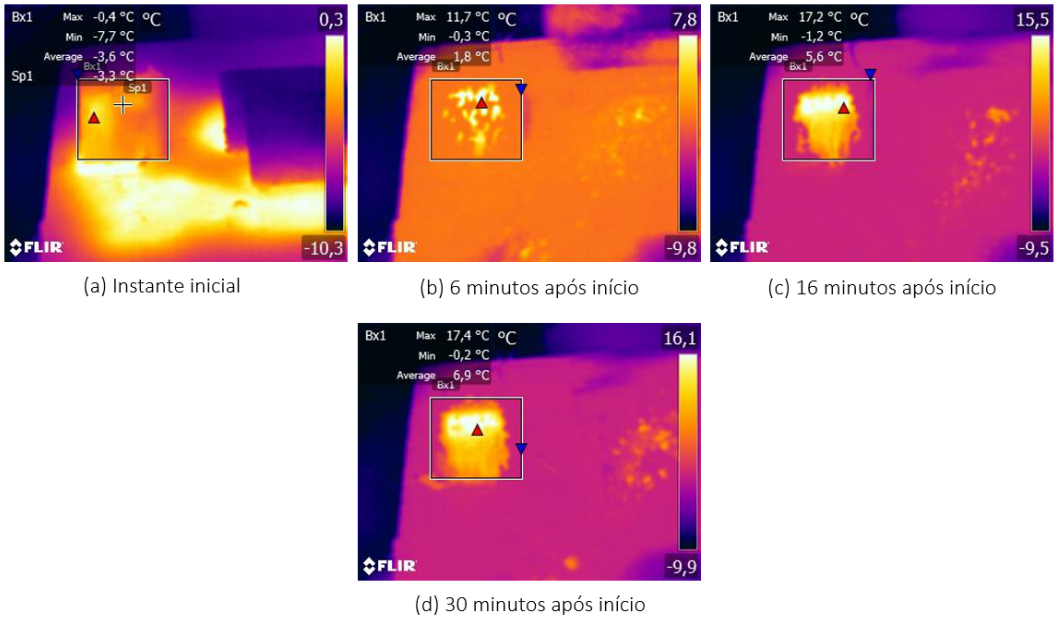


Figura 111: Amostra 3 da geometria 2 (esquerda e centro) e volume de controlo (centro e direita) após o ensaio.

Visivelmente os resultados vão ao encontro dos resultados apresentados graficamente, isto é, registou-se uma clara diminuição da quantidade de gelo às superfície da amostra, nomeadamente na zona central, onde o circuito está posicionado e na zona inferior, onde a o gelo que derretia na zona central escorria e acabava por facilitar o gelo aí acumulado a derreter.

Quanto à informação recolhida pela câmara termográfica verifica-se que o sistema efetivamente derreteu o gelo formado à superfície na zona central em 6 minutos de funcionamento do sistema. A temperatura nesta zona varia 17.8 ^oC (-0.4 ^oC - 17.4 ^oC). Na figura 112 é possível ver a evolução de temperatura à superfície da amostra 3 da geometria 2.



(a) Instante inicial (b) 6 minutos após início (c) 16 minutos após início

(d) 30 minutos após início

Figura 112: Distribuição de temperatura ao longo do ensaio com o sistema de degelo ligado, da amostra 3 da geometria 2.

Verifica-se, mais uma vez uma grande acumulação de gelo nas zonas lateriais, o que mais uma vez traduz a dificuldade de condução de calor por toda a superfície.

Geometria 3 - Amostra 1

Quanto à geometria 3 apenas foi analisada uma amostra, a amostra 1, isolada com fita-cola. Neste caso o circuito foi alimentado com uma tensão próxima de 22V.

Na figura 113 é possível ver a evolução da massa total da amostra 1 da geometria 3

e do volume de controlo.

Todo o procedimento foi realizado, como em todas amostras das restantes geometrias, no entanto neste ensaio foi necessário realizar uma pausa de 1.5h, na câmara climática, entre a etapa de formação de gelo e início do ensaio do sistema de degelo.

Após a etapa de formação de gelo verificou-se uma aumento da massa total das amostras analisadas, no entanto após a pausa na câmara climática, verificou-se uma diminuição ainda considerável da massa total das mesmas. Isto é justifado pelo facto de se ter verificado uma grande redução da massa de gelo no momento em que, a amostra 1 e o volume de controlo foram pesadas, após a etapa de formação de gelo.

Deste modo, verificou-se a formação e acumulação de 30.68 g de gelo à superfície da amostra 1 e cerca de 22.80 g de gelo à superfície do volume de controlo.

Posteriormente, foi inciado o ensaio com o sistema de degelo ligado, onde foi registada uma perda de 1.15g de gelo à superficie da amostra 1, o que se traduz numa perda percentual de 3.7% da massa de gelo total formada. No caso do volume de controlo verificou-se um aumento de 30.41 g de gelo à sua superfície.

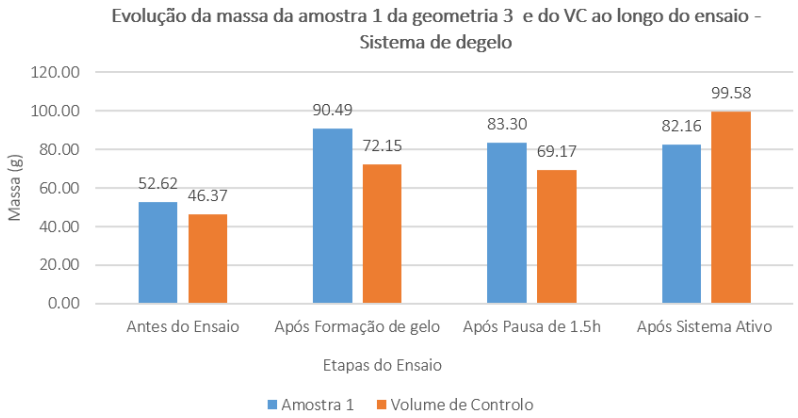


Figura 113: Evolução da massa total ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 1 da geometria 3 e do volume de controlo.

Fazendo uma análise visual da formação de gelo à superfície da amostra 1 e do volume de controlo, com recurso à figura 114 é possível ver a clara formação e agregação de gelo à superfície de ambas as amostras.

Já na figura 115 é possível ver a agregação de gelo à superfície das amostras em análise após o repouso das mesmas na câmara climática durante 1.5h. Aparentemente parece que se verifica uma aumento da quantidade de gelo, no entanto o mesmo não se verificou.

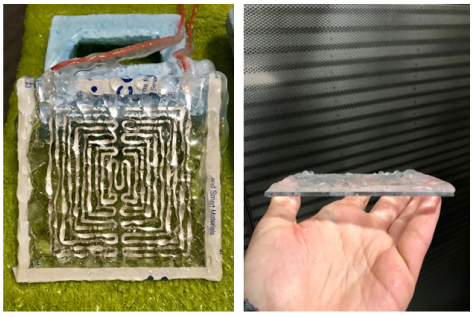


Figura 114: Amostra 1 da geometria 3 (esquerda) e volume de controlo (direita) após a etapa de formação de gelo.

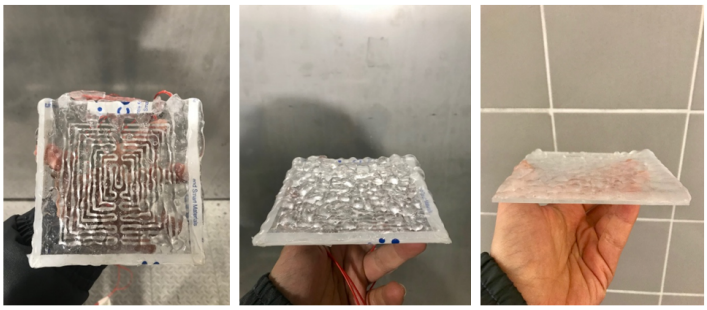


Figura 115: Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após 1.5h de repouso na câmara climática.

Na figura 116 é possível ver a quantidade de gelo à superfície das amostras, após o sistema de degelo ter sido ligado.

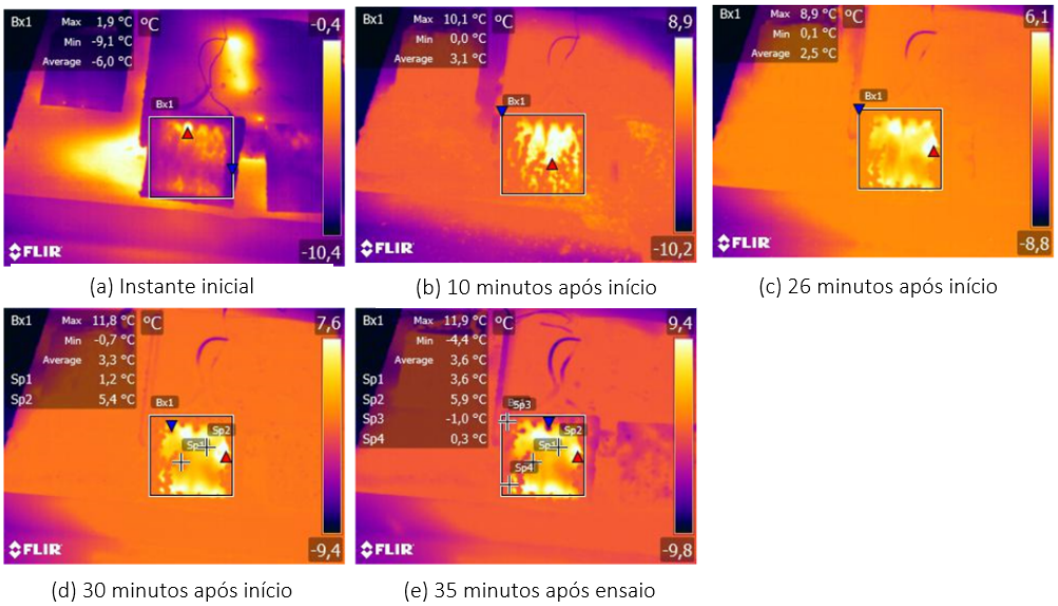


Figura 116: Amostra 2 da geometria 1 (esquerda e centro) e volume de controlo (direita) após ensaio.

Tal como foi verificado nos resultados apresentados no gráfico da figura 113, visualmente verificou-se uma redução da quantidade de gelo à superfície da amostra 1, o

que permite concluir que o sistema teve a capacidade derreter a camada de gelo à superfície da amostra. No entanto, à luz do que já tido sido verificado, o sistema só teve capacidade de derreter o gelo na zona onde sistema foi colocado, ainda que de forma parcial, demonstrando a dificuldade na condução calor em toda a superfície.

Na figura 117 é possível ver a evolução da temperatura da amostra ao longo do ensaio do sistema de degelo.



(a) Instante inicial (b) 10 minutos após início (c) 26 minutos após início

(d) 30 minutos após início (e) 35 minutos após ensaio

Figura 117: Distribuição de temperatura ao longo do ensaio do sistema de degelo da amostra 1 da geometria 3.

Analisando a infromação recolhida com recurso à câmara termográfica, como é apresentado na figura 117, a temperatura mínima da amostra variou cerca de 9.2 ^oC (-9.2 ^oC - 0 ^oC) em 10 minutos. Verificou-se que a primeira camada de gelo a derreter foi aos 10 minutos de ensaio. A temperatura média da amostra variou cerca de 9.6 ^oC (-6 ^oC - 3.6 ^oC) em 35 minutos.

No global, considerando todos os ensaios referentes aos sistemas de degelo, de todas as geometrias é possível que concluir que quando a camada de gelo à superfície apresenta uma maior espessura, os sistemas revelam-se bastante ineficazes no porcesso de degelo para o intervalo de tempo considerado, aproximadamente 35 minutos.

No entanto, considerando uma camada de gelo à superfície mais fina, verifica-se que todos os sistemas revelam resultados positivos, do ponto de vista do degelo. Apesar disto se verificar, este degelo não é homogêneo ao longo de toda a superfície, verificando-se

um maior eficácia na zona onde o circuito impresso é posicionado, tal como foi verificado na análise dos sistemas como sistema de anti-gelo. Contudo, apenas a geometria 3 apresenta uma comportamento distinto, nesta situação, dado que é a única geometria que não consegue derreter o gelo na sua totalidade, na zona onde o mesmo é possicionado. Deste modo, comparando esta geometria à geometria 1 e 2, claramente esta apresenta uma desvantagem perante as restantes.

É importante destacar que, na zona inferior do circuito também é comum em todas as geometrias o degelo, no entanto o mesmo é auxiliado pela água que resulta do degelo na zona central, zona onde o circuito está posicionado, que acaba por atingir uma temperatura tal que, ao escorrer sobre a superfície permite derreter o gelo, nessa região.

De qualquer dos modos, nesta análise torna-se difícil concluir qual das geometrias apresenta um melhor comportamento como sistema de degelo.

5.3 Comparação dos resultados numéricos e resultados experimentais

De modo a garantir uma correta comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através das simulações numéricas foi fulcral refazer as simulações numéricas considerando os fluxos de calor reais.

Após a análise experimental dos sistemas de aquecimento projetados, conclui-se que algumas alterações às condições definidas nas simulações numéricas de cada geometria teriam que ser alteradas para que a comparação de ambos os resultados, apresentada neste subcapítulo fosse possível de ser realizada.

Deste modo, e considerando os fluxos de calor associados a cada um dos sistemas impressos e apresentados na tabela 17 do subcapítulo 4.9 foram refeitas as simulações numéricas. Foi também, considerada a mudança de material do corpo Lente, que anteriormente era ABS e experimentalmente foi utilizado PMMA.

Na tabela 18 são apresentadas as propriedades definidas relativamente ao material alterado.

Tabela 18: Propriedades dos materiais atribuídos ao corpo Lente.

Material	**Massa volumíca** $(kg \cdot m^{-3})$	**Condutividade** $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	**Calor específico** $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
PMMA	1180	0.1955	1500

Foi feita uma análise para cada amostra analisada experimentalmente, referente a cada geometria. Na tabela 19 são apresentados os resultados das simulações numéricas, referentes à quantidade de gelo formada à superfície de cada amostra de cada geometria analisada, bem como o fluxo de calor determinado experimentalmente e utilizado na respetiva análise numérica.

Tabela 19: Quantidade de gelo formada à superfície de cada amostra analisada experimentalmente de cada geometria e fluxo de calor associado.

Geometria	**Amostra**	**Fluxo de calor** $(W \cdot m^{-2})$	**Quantidade de gelo formada** (g)
1	1	868	27.16
	2	1005	22.06
2	2	1324	16.16
	3	1324	16.16
3	1	1482	144.9

De uma maneira geral, analisando o comportamento face à quantidade de gelo formada à superfície das amostras analisadas, conclui-se que num ambiente controlado e perfeito, a geometria que segundo os dados da tabela 19 apresenta o melhor comportamento é a geometria 2, dado que é a que está associada à menor formação de gelo.

No apêndice E é possível ver as tabelas referentes aos dados recolhidos das simulações numéricas realizadas nesta etapa do processo.

Contudo, os valores apresentados na tabela 19 referentes à quantidade de gelo formada a nível numérico, não podem ser diretamente comparados com os resultados relativos à quantidade de gelo formada nos ensaios experimentais, relativos ao sistemas de anti-gelo, uma vez que as etapas e os procedimentos considerados até ao momento de análise das amostras na câmara climática são influenciados diretamente e significativamente por vários fatores que têm influência na formação de gelo final. Ou seja, caso essa comparação fosse feita de forma direta estar-se-ia a comparar um procedimento onde cada etapa está associada a erros humanos, onde os equipamentos utilizados tem erros associados e onde se foram registadas dificuldades no controlo rigoroso das condições fronteira, com um procedimento com um controlo das condições fronteira muito rigoroso ou perfeito e consequentemente, de uma forma geral com erros associados muito reduzidos ou nulos.

No entanto, ainda que não seja possível a comparação quantitativa destes sistemas de anti-gelo, o mesmo já não se pode dizer acerca da comparação qualitativa.

De modo a garantir que esta comparação qualitativa fosse válida foi analisada temperatura que o sistema de aquecimento atinge durante o seu funcionamento, tanto a nível das simulações numéricas, como a nível experimental (ensaios de caracterização térmica). Para tal, foi necessário repetir as simulações numéricas referentes a cada amostra de cada geometria, para condições de temperatura próximas daquelas em que foram realizados os ensaios de caracterização térmica dos mesmos e com o fluxo de calor determinado nessa mesma etapa.

Quanto à geometria 1, numericamente verificou-se que a temperatura máxima do circuito atinge aproximadamente 35 ^oC, no caso da amostra 1 e na amostra 2 atinge cerca de 38 ^oC, tal como é possível ver na figura 118 esquerda e direita, respetivamente.

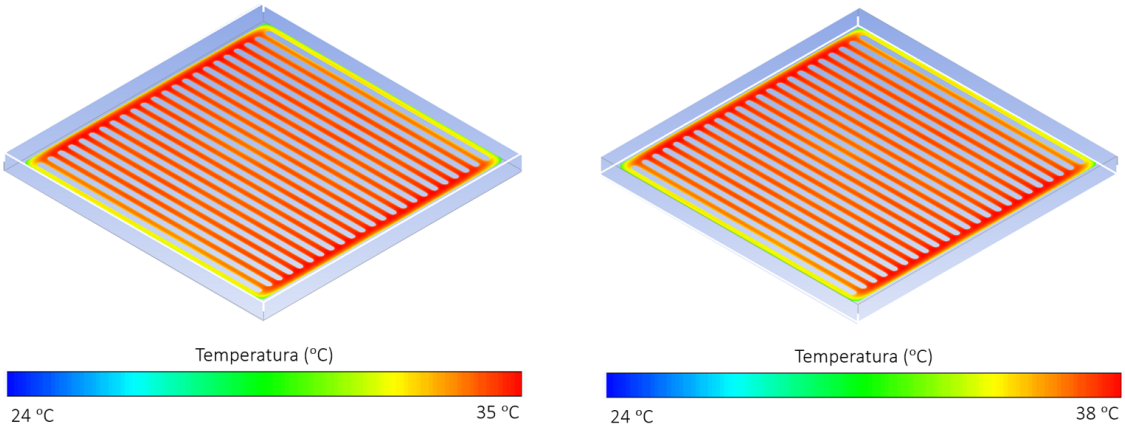


Figura 118: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1 (esquerda) e da amostra 2 (direita), da geometria 1, obtida por análise numérica.

A tensão a fornecer às amostras 1 e 2 da geometria 1, para que a amostra em análise atingisse uma temperatura máxima de 60 ^oC, era aproximadamente 19 V e 22 V, respetivamente. Nestes instantes foi feita uma análise ponto a ponto (Sp1 a Sp9) dos registos da câmara termográfica, dos ensaios de caracterização térmica respetivos, como é apresentado na figura 119 (esquerda e direita) e verificou-se que em média, a temperatura máxima do sistema de aquecimento ronda os 35 ^oC, na amostra 1 e cerca de 38 ^oC, na amostra 2, como acontece nas simulações numéricas (figura 118).

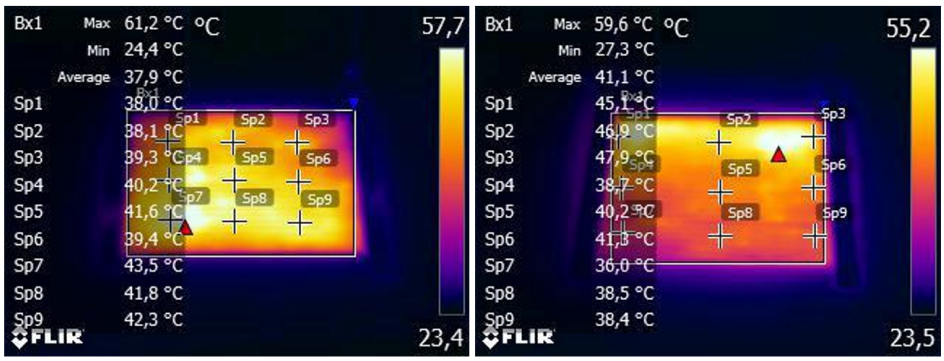


Figura 119: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da geometria 1 no ensaio de caracterização térmica da amostra 1 (esquerda) e amostra 2 (direita), para uma tensão de 19 V e 22 V, respetivamente.

No caso desta geometria torna-se difícil a análise ponto a ponto precisa, uma vez que segundo a informação recolhida pela câmara termográfica é difícil distinguir as pistas horizontais do substrato, dada a proximidade entre elas.

Deste modo, é natural que a temperatura de alguns pontos seja bastante superior a 35 ^oC e 38 ^oC, dado que o ponto pode estar a indicar a temperatura registada pelo substrato e não a definir a temperatura da pista do circuito. De qualquer das formas, a maioria dos pontos assinalados apresentam uma temperatura próxima da esperada numericamente, ainda que haja uma diferença de 5 ^oC a 9 ^oC, em ambas as amostras, o que é normal dado que vários fatores influenciam os ensaios de caracterização térmica, ao contrário do que acontece nas simulações numéricas.

Considerando a geometria 2, numericamente verificou-se que a temperatura máxima do circuito é aproximadamente 40 ^oC, tal como é possível ver na figura 120. Uma vez que o que é definido a nível numérico é idêntico para ambas as amostras da geometria 2, os resultados referentes a cada uma delas são os mesmos.

A tensão a fornecer às amostras 2 e 3 da geometria 2, para que a amostra em análise atingisse uma temperatura máxima de 60 ^oC, era aproximadamente 15 V. Neste instante, foi feita uma análise ponto a ponto (Sp1 a Sp9) dos registos da câmara termográfica, dos ensaios de caracterização térmica respetivos, como é apresentado na figura 121 (esquerda e direita) e verificou-se que em média, a temperatura máxima do sistema de aquecimento ronda os 40 ^oC, tal como acontece nas simulações numéricas (figura 120).

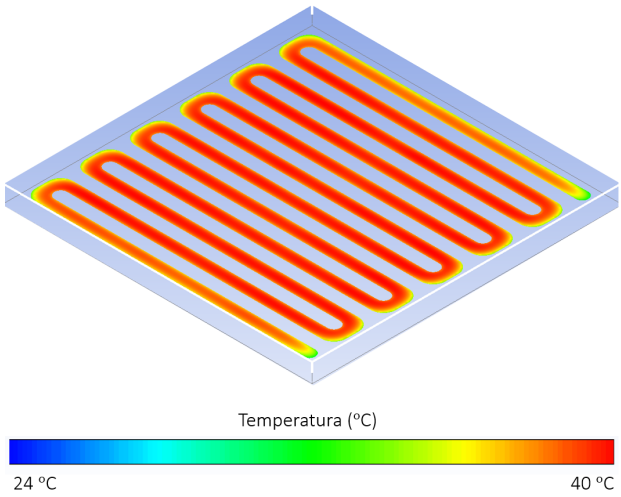


Figura 120: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 2 e 3, da geometria 2, obtido por análise numérica.

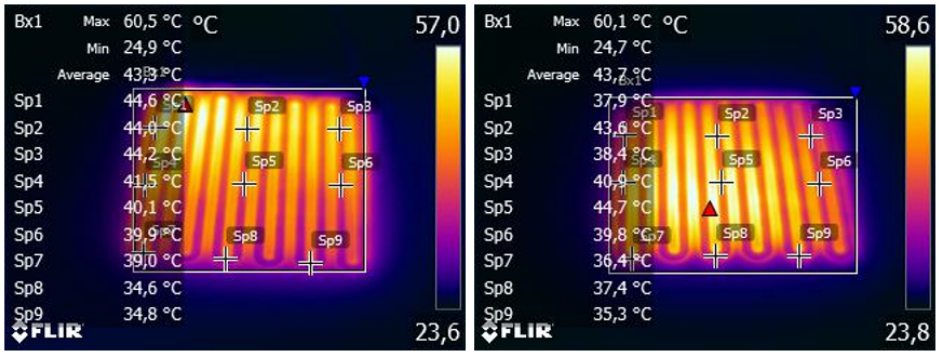


Figura 121: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da geometria 2, no ensaio de caracterização térmica da amostra 2 (esquerda) e amostra 3 (direita), para uma tensão de 15 V.

No caso desta geometria, o problema de definição da localização dos pontos Sp1 a Sp9 sobre o circuito já não se verifica.

Mais uma vez, nem todos os pontos indicados na figura 121, cuja temperatura é máxima, apresentam extamente a temperatura de 40 ^oC, mas sim valores próximos com uma variação entre 4 ^oC a 6 ^oC, devido ao mesmo motivo explicado anteriormente.

Por último e considerando a amostra 1 da geometria 3, numericamente verificou-se que a temperatura máxima do circuito atinge aproximadamente 42 ^oC, tal como é possível ver na figura 122.

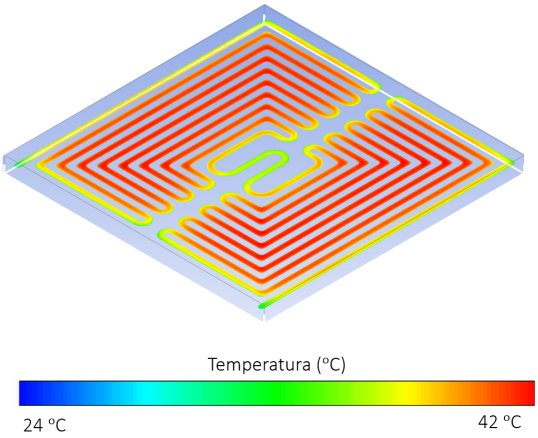


Figura 122: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1, da geometria 3, obtido por análise numérica.

A tensão a fornecer à amostra 1 da geometria 3 para que a amostra em análise atingisse uma temperatura máxima de 60 ^oC, era aproximadamente 22 V. Neste instante, foi feita uma análise ponto a ponto (Sp1 a Sp9) dos registos da câmara termográfica, dos ensaios de caracterização térmica, como é apresentado na figura 123 e verificou-se que em média, a temperatura máxima do sistema de aquecimento ronda os 44.9 ^oC, próximo do que acontece na simulação numérica correspondente (figura 122).

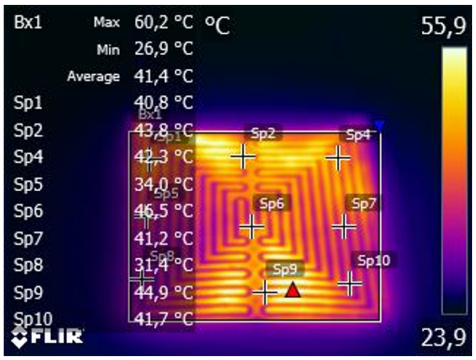


Figura 123: Distribuição de temperatura ao longo do sistema de aquecimento da amostra 1, da geometria 3, no ensaio de caracterização térmica para uma tensão de 22 V.

Assim como as restantes geometrias, nem todos os pontos definidos (Sp1 a Sp9) apresentam extamente a temperatura apresentada na simulação numérica. Contudo, é possível afirmar que essa diferença é residual.

Deste modo, é garantida a validação necessária para que seja estabelecida a comparação qualitativa dos resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos

experimentalmente, relativos aos ensaios dos sistemas de anti-gelo.

Deste modo, recordando a conclusão retirada acerca dos sistemas de anti-gelo analisados no subcapítulo 5.2.3.1, que a geometria 2 era que apresentava o melhor comportamento como sistema de anti-gelo, quando comparada com as restantes geometrias, verifica-se uma concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Isto é, tanto a nível numérico como a nível experimental a geometria 2 é a que apresenta o maior eficácia como sistema de anti-gelo.

6 Conclusão e trabalhos futuros

O foco do presente projeto foi o desenvolvimento de sistemas de anti-gelo, desde a simulação numérica, à análise experimental dos mesmos. Contudo, com o objetivo de alargar o estudo realizado, foi feita uma análise, apenas a nível experimental, do comportamento dos sistemas como sistemas de degelo.

A nível da análise numérica foi feito um estudo de malha e posteriormente a otimização do mesmo. Já a análise experimental envolveu o desenvolvimento e estruturação de vários procedimentos para cada etapa dos diferentes processos desta fase. Esta análise envolveu 4 etapas principais, impressão dos circuitos (geometria 1, 2 e 3), preparação dos mesmos para os ensaios seguintes, caracterização térmica dos sistemas e por fim análise do seu comportamento tanto como sistema de degelo e anti-gelo, na câmara climática.

Focando no estudo experimental e nos resultados obtidos, verificou-se que todos os sistemas analisados, considerando as geometrias propostas, obtiveram resultados positivos tanto do ponto de vista do degelo como anti-gelo.

Para as diferentes geometrias foi necessário, de acordo com os resultados dos ensaios de caracterização térmica, fornecer tensões de alimentação distintas. Às amostras analisadas da geometia 1 foram fornecidas tensões próximas de 19 V e 22 V, de acordo com a resistência de cada uma delas, às amostras da geometria 2 foram fornecidas tensões próximas de 15 V e à amostra da geometria 3 foi fornecida uma tensão de 22 V, tanto nos ensaios dos sistemas de degelo como anti-gelo.

Considerando apenas os resultados experimentais associados aos ensaios dos sistemas de anti-gelo, verificou-se que a geometria 2 é a que apresenta os melhor resultados, tanto do ponto de vista de área à sua superfície livre de gelo, como a nível de quantidade de gelo formada sobre a mesma. Contudo, de uma maneira geral todas as geometrias, nestes ensaios, apresentam um comportamento idêntico no que diz respeito às zonas onde se verifica uma maior acumulação de gelo à superfície. Verifica-se um padrão nas regiões onde é acumulado o gelo, isto é, nas zonas laterais e superiores das amostras, ficando as regiões onde o circuito é posicionado livres de gelo, bem como as regiões inferiores. Apenas a geometria 3 apresenta uma ligeira dificuldade em derreter o gelo na região onde o circuito é posicionado, tornando-se na única excepção a este padrão.

Esta conclusão permite ter a certeza a cerca da dificuldade demonstrada pelos circuitos na condução de calor de forma idêntica por toda a amostra, independentemente da geometria analisada.

Considerando os ensaios de sistema de degelo, os resultados obtidos foram menos conclusivos que os resultados obtidos para os sistemas de anti-gelo, ainda que positivos. Esta dificuldade reside no facto do procedimento considerado, nomeadamente na etapa de formação de gelo, vários fatores externos ao funcionamento do circuito, influenciarem o mesmo, como por exemplo a dificuldade no controlo rigosoro de parâmetros como o MVD e LWC. Deste modo, de uma maneira geral todos os sistemas estiveram em funcionamento durante 35 minutos. Neste período de tempo, quando a camada de gelo formada à superfície das amostras era relativamente fina, todos os sistemas em análise conseguiram derreter o gelo, sendo que a geometria 1 demorou aproximadamente 9 minutos, a geometria 2 cerca de 6 minutos e a geometria 3 aproximadamente 10 minutos, verificando-se no final o mesmo padrão verificado nos ensaios de sistema de anti-gelo, no que diz respeitos às regiões onde existia e não existia gelo. Quando a camada de gelo à superfície tinha uma maior espessura verificou-se uma maior dificuldade, neste periodo de tempo, em derreter o gelo à superfície. No entanto, os resultados obtidos apontam para que, considernado um periodo de funcionamento superior a 35 minutos, o sistema tem a capacidade de derreter o gelo à superfície da amostra.

Considerando agora a análise final de comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais, dos ensaios de sistema de anti-gelo, tornou-se difícil a comparação direta dos mesmos, do ponto de vista quantitativo, uma vez que os procedimentos considerandos a nível experimental e a nível numérico tinham um controlo dos parâmetros influenciadores distinto. No entanto, e com o objetivo de estabelecer uma comparação que validasse todas as conclusões retiradas foi feita uma comparação qualitativa dos resultados numéricos e experimentais. Para que tal fosse possível foi feita inicialmente a validação a nível das temperaturas máximas registadas pelos circuitos, onde se verificou que a temperatura máxima registada pelo mesmos, tanto a nível numérico e experimental era próxima, o que acaba por permitir estabelecer uma relação de comparação entre ambos os resultados, do ponto de vista da formação de gelo. Através desta comparação qualitativa, conluiu-se que a geometria 2 é a que apresenta maior eficácia no que diz respeito ao seu funcionamento como sistema de anti-gelo, em temperaturas próximas de -10 ^oC.

Considerando os pontos que devem ser melhorados, não deve ser esquecida a necessidade e a importância de otimizar e afinar o controlo de pârametros fundamentais e extremamente influenciadores de cada etapa do processo experimental realizado. Ao longo do tempo de realização deste projeto, tornou-se difícil em tempo útil, otimizar cada uma das etapas necessárias a nível experimental, o que acabou por ter consequên-

cias sobre os resultados experimentais obtidos. Nomeadamente, na etapa do processo de impressão dos circuitos por Serigrafia, em concreto no processo de transferência da geometria para o quadro e posteriormente a pintura com Tinta Azul do mesmo, para fazer a máscara, estes processos sendo feitos de forma manual e considerando a resolução da geometria a imprimir podem gerar vários defeitos a nível de impressão do filme no subtrato. É importante referir que o facto do processo ser manual torna-se dependente do desempenho e perícia do operador. Quanto ao processo de impressão, a colocação dos equipamentos lâmina e racla é feita de forma manual, bem como o seu ajuste, deste modo, a espessura do circuito de geometria para geometria pode variar e influenciar o seu funcionamento. Uma forma de evitar estes problemas seria o recurso ao processo automatizado, mas cosniderando o número de amostras a imprimir, não se tornava viável do ponto de vista económico.

Tal como foi referido, quanto aos ensaios na câmara climática vários fatores tornaram-se influenciadores nos resultados finais e limitantes na comparação dos mesmos entre eles e com os resultados obtidos numericamente. Vários foram referidos ao longo do presente estudo, mas é relevante destacar aqueles que tiveram uma grande influência, como é o caso da dificuldade no controlo do tamanho de gota da água (MVD) depositada sobre amostras, o LWC, bem como a taxa de deposição de água. O tamanho de gota é um dos fatores mais importantes na formação de gelo, bem como o LWC e consequentemente neste tipo de ensaios tornou-se difícil, do ponto de vista experimental, tentar representar algo próximo daquilo que acontece em condições reais e representar de forma idêntica o que foi definido a nível numérico. O mesmo resolver-se-ia com equipamentos próprios, onde seria possível definir o tamanho de gota ou uma distribuição, tal como foi feito nas simulações numéricas realizadas, no entanto isso iria acarretar custos elevados. No entanto, mais fatores tiveram influência sobre os resultados, o facto de terem sido realizados em diferentes dias, por diferentes pessoas e por um número diferente e com diferentes borrifadores. Estes pontos devem ser o mais normalizados possível de modo a reduzirem a sua influência sobre os resultados finais.

De uma maneira geral, considerando os procedimentos experimentais deifinidos e realizados é fulcral a diminuição da influência da falha humana, ao longo de todo o processo e aumentar o controlo rigoroso de todos os parâmetros influenciadores dos resultados, desde temperaturas, humidade relativa, LWC, MVD, taxa de depoisção de água, entre outros.

Considerando agora, a possibilidade de implementação destes sistemas em veículos automóveis é necessário considerar a tensão fornecida aos mesmos. Isto poderá ser uma

barreira à implementação destes sistemas em veículos automóveis modernos, cujos dispositivos de luzes, escovas e sistema de ventilação funcionam por fornecimento de uma tensão de 12 V. Apesar desta limitação é também importante e necessário trabalhar inicialmente o estudo e os resultados obtidos com o objetivo de diminuir a tensão fornecida aos sistemas, otimizando o sistema e ao mesmo tempo permitir a sua incorporação em qualquer veículo já fabricado.

Posteriormente e considerando as tensões efetivamente fornecidas aos sistemas estudados, hoje em dia, já são comerecializados veículos cuja tecnologia associado é alimentada por um gerador de 48 V, como é o caso em específico de alguns veículos híbridos leves, como por exemplo o denominado *Mild Hybrid Electric Vehicle* (MHEV), que funciona de forma idêntica aos híbridos convencionais [28]. Neste caso, os veículos ainda vem com um sistema tradicional de 12 V para alimentação dos recursos elétricos, deste modo é necessário que exista um conversor de tensão, para transformar a energia vinda da bateria (48 V) em energia para esses sistemas, sem qualquer sobrecarga [28]. Deste modo, pensa-se que o mesmo possa ser utilizado relativamente aos sistemas de anti-gelo estudados, com recurso à utilização de conversores de tensão de 48 V para a tensão de funcionamento destes sistemas.

Pensando em alargar o estudo realizado, no futuro, a nível dos processos de impressão, como foi apresentado no capítulo 2.3.3 seria interessante o estudo da viabilidade de recorrer à impressão 3D, para impressão deste tipo de circuitos e assim verificar a influência do processo de impressão no funcionamento destes sistemas.

Seria também interessante, considerando a dificuldade registada de uma maneira geral, o estudo da aplicação de um sistema passivo de anti-gelo em simultâneo com o sistema desenvolvido, como por exemplo o revestimento por materias hidrofóbicos nas zonas onde foi registada uma maior acumulação de gelo, isto é, nas zonas lateriais das amostras.

Referências

[1] A. J. M. Lousa, *Veículos Autónomos e Conectados - Tecnologia e identificação de possíveis alterações na infraestrutura de transporte*. Universidade de Coimbra, 2018.

[2] R. de Jesus Gamito Afonso da Palma, *Sistemas de Radar Automóvel Integrados*. Instituto Superior Técnico, 2018.

[3] I. C. A. Organization, «Manual of Aircraft Ground De-icing/Anti-icing Operation Manual,» 2018.

[4] D. A. dos Santos Fernandes, *Influência das condições de operação na formação de gelo em permutadores compactos de refrigeração*. Universidade da beira Interior, 2019.

[5] M. S. Park, «Aircraft De-Icing System Using Thermal Conductive Fibers,» 2015.

[6] A. P. da Fonseca Firme, *Estudo Experimental da formação de gelo em evaporadores*. Universidade da beira Interior, 2015.

[7] «Fases de formação de gelo nas pás da turbina eólica caracterizadas pelo acúmulo de gelo,» vol. 35, Elsevier, ed.,

[8] N. M. Nagappan, «Numerical modeling of anti-icing using an array of heated synthetic jets,» 2013.

[9] O. Parent e A. Ilinca, «Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review,» *Cold regions science and technology*, vol. 65, n.º 1, pp. 88–96, 2011.

[10] N. Dalili, A. Edrisy e R. Carriveau, «A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance,» *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 13, n.º 2, pp. 428–438, 2009.

[11] K. D. Esmeryan, *From Extremely Water-Repellent Coatings to Passive Icing Protection—Principles, Limitations and Innovative Application Aspects*. Acoustoelectronics Laboratory, Georgi Nadjakov Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, 2020.

[12] S. W. Shames, C. M. Zhang, N. Ferralis e J. C. Grossman, «Rapid windshield de-icing using solar thermal fuels,» *Int J Energy Effic Veh Des*, vol. 15, pp. 1114–1119, 2013.

[13] T.-H. G. J. Kanfoud S. Soua, *De-icing of propeller blades: electro-thermal vs elctro-mechanical techniques effieciency comparison*. TWI Ltd, Integrity Management Group Cambridge, Cambridgeshire, CB21 6AL, United Kingdom, 2012.

[14] X. Yao, S. C. Hawkins e B. G. Falzon, «An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs,» *Carbon*, vol. 136, pp. 130–138, 2018.

[15] Nasa Technology Transfer Program. (2001). «A Cool Tool for De-icing Planes,» URL: `https://spinoff.nasa.gov/spinoff2001/ps5.html` (acedido em 01/03/2021).

[16] O. Redondo, S. Prolongo, M. Campo, C. Sbarufatti e M. Giglio, «Anti-icing and de-icing coatings based Joule's heating of graphene nanoplatelets,» *Composites Science and Technology*, vol. 164, pp. 65–73, 2018.

[17] A. Cortés, A. Jiménez-Suárez, M. Campo, A. Ureña e S. Prolongo, «3D printed epoxy-CNTs/GNPs conductive inks with application in anti-icing and de-icing systems,» *European Polymer Journal*, vol. 141, p. 110 090, 2020.

[18] K. Suganuma, *Introduction to Printed Electronics*. London, 2014.

[19] Volvo. «Símbolos e mensagens da unidade de câmara e de radar,» URL: `https://www.volvocars.com/pt/support/manuals/s60/2019w46/apoio-ao-condutor/unidade-de-camara-e-de-radar/simbolos-e-mensagens-da-unidade-de-camara-e-de-radar`.

[20] E. O. F. M. D. de Castro, *Transferência de Calor - Texto de Apoio às Aulas Práticas*. Faculdade de Engenharia da Univerisdade do Porto - Porto, 2008.

[21] (1840). «Joule's abstract on converting mechanical power into heat.,» URL: `https://ww%20w.aps.org/publications/apsnews/200912/physicshistory.cfm.`.

[22] J. D. Teixeira, «Desenvolvimento e caracterização de filmes de materiais fracamente condutores depositados por Magnetron Sputtering para uso em isoladores elétricos de porcelana,» 2007.

[23] Ansys, *ANSYS FENSAP-ICE User Manual*. USA, 2021.

[24] H. Z. Wang, «3D Conjugate Heat Transfer Simulation of Aircraft Hot-Air Anti-Icing Systems,» 2005.

[25] Ansys, *ANSYS Fluent User's Guide*. USA, 2021.

[26] (2021). «ANSYS FLUENT FLOW MODELING SOFTWARE.,» URL: https://www.ozeninc.com/products/fluid-dynamics/ansys-fluent/.

[27] (2014). «Space Claim Online Help,» URL: http://help.spaceclaim.com/2015.0.0/en/Content/ANSYS_SharedTopology.htm.

[28] C. Evans. (2021). «What is a mild hybrid and should you buy one?» URL: https://www.whatcar.com/advice/buying/what-is-a-mild-hybrid-and-should-you-buy-one/n22776.

Apêndice A

Figura 124: Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.01
Geometria	1

Nº de iterações	60
Nº de Nós (Fluído)	27532
Nº de Elementos	156566

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	6.68E-11	0.0002903	2.77E-13	0.02358
4041	8.62E-11	0.0002617	2.71E-13	0.02358
4041	1.51E-10	0.0002493	2.77E-13	0.02358
4042	2.35E-10	0.0002396	3.07E-13	0.02358
4042	3.05E-10	0.0002316	3.61E-13	0.02359
4042	3.62E-10	0.0002249	4.31E-13	0.02359
4043	4.08E-10	0.0002191	5.08E-13	0.02359
4043	4.44E-10	0.000214	5.87E-13	0.02359
4044	4.73E-10	0.0002093	6.64E-13	0.02360
4044	4.95E-10	0.0002051	7.37E-13	0.02360
4080	2.93E-10	0.0001156	7.70E-13	0.02381
Média				**0.02361**

Figura 125: Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.01
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos	156566

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	6.68E-11	0.0002903	2.77E-13	0.02358
4041	8.62E-11	0.0002617	2.71E-13	0.02358
4041	1.51E-10	0.0002493	2.77E-13	0.02358
4042	2.35E-10	0.0002396	3.07E-13	0.02358
4042	3.05E-10	0.0002316	3.61E-13	0.02359
4042	3.62E-10	0.0002249	4.31E-13	0.02359
4043	4.08E-10	0.0002191	5.08E-13	0.02359
4043	4.44E-10	0.000214	5.87E-13	0.02359
4044	4.73E-10	0.0002093	6.64E-13	0.0236
4044	4.95E-10	0.0002051	7.37E-13	0.0236
4080	2.93E-10	0.0001156	7.70E-13	0.02381
Média				**0.023608182**

Figura 126: Resuldados numéricos para 0.002 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.002
Geometria	1

Nº de iterações	60
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos (Sólido)	161169

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
2440	2.65E-11	0.0001394	3.91E-13	0.01460
2441	6.01E-10	6.76E-05	4.65E-13	0.01460
2441	1.16E-09	6.53E-05	6.99E-13	0.01460
2442	1.44E-09	6.36E-05	1.03E-12	0.01460
2442	1.47E-09	6.21E-05	1.30E-12	0.01460
2442	1.41E-09	6.07E-05	1.48E-12	0.01461
2443	1.32E-09	5.95E-05	1.61E-12	0.01461
2443	1.24E-09	5.84E-05	1.70E-12	0.01461
2444	1.17E-09	5.73E-05	1.77E-12	0.01461
2444	1.11E-09	5.62E-05	1.84E-12	0.01462
2480	2.38E-10	3.19E-05	9.94E-13	0.01483
Média				**0.01463**

Figura 127: Resuldados numéricos para 0.002 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.002
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos (Sólido)	161169

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.71E-11	0.0002913	2.49E-13	0.0236
4041	7.43E-11	0.0002617	2.43E-13	0.0236
4041	1.39E-10	0.0002496	2.49E-13	0.0236
4042	2.20E-10	0.00024	2.78E-13	0.0236
4042	2.87E-10	0.0002322	3.31E-13	0.0236
4042	3.41E-10	0.0002255	3.99E-13	0.0236
4043	3.84E-10	0.0002197	4.74E-13	0.0236
4043	4.18E-10	0.0002146	5.51E-13	0.0236
4044	4.45E-10	0.0002099	6.25E-13	0.0236
4044	4.66E-10	0.0002056	6.95E-13	0.0236
4080	2.71E-10	0.0001158	7.18E-13	0.0238
Média				**0.02361**

Figura 128: Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 60 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.001
Geometria	1

Nº de iterações	60
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos	604448

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
2440	6.57E-11	0.0002881	4.32E-13	0.0143
2441	4.71E-10	0.0002479	4.80E-13	0.0143
2441	7.03E-10	0.0002391	5.99E-13	0.01431
2442	9.18E-10	0.0002317	7.80E-13	0.01431
2442	1.06E-09	0.0002254	9.76E-13	0.01431
2442	1.17E-09	0.0002198	1.17E-12	0.01431
2443	1.26E-09	0.0002148	1.34E-12	0.01432
2443	1.32E-09	0.0002101	1.50E-12	0.01432
2444	1.37E-09	0.0002057	1.65E-12	0.01432
2444	1.39E-09	0.0002017	1.78E-12	0.01432
2480	4.74E-10	0.0001125	1.17E-12	0.01453
Média				**0.014331818**

Figura 129: Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.001
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos	604448

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.28E-11	0.0002919	2.11E-13	0.02357
4041	6.84E-11	0.0002672	2.07E-13	0.02357
4041	1.37E-10	0.0002556	2.18E-13	0.02358
4042	2.20E-10	0.0002463	2.53E-13	0.02358
4042	2.88E-10	0.0002386	3.12E-13	0.02358
4042	3.42E-10	0.000232	3.84E-13	0.02358
4043	3.84E-10	0.0002262	4.62E-13	0.02358
4043	4.17E-10	0.0002211	5.39E-13	0.02359
4044	4.42E-10	0.0002164	6.13E-13	0.02359
4044	4.60E-10	0.000212	6.81E-13	0.02359
4080	2.53E-10	0.0001202	6.43E-13	0.02380
Média				**0.02360**

Figura 130: Resuldados numéricos para 0.0009 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.0009
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos	768074

Teste 4				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.35E-11	0.000292	2.13E-13	0.02357
4041	6.92E-11	0.0002674	2.09E-13	0.02357
4041	1.37E-10	0.0002558	2.19E-13	0.02358
4042	2.20E-10	0.0002465	2.54E-13	0.02358
4042	2.88E-10	0.0002388	3.13E-13	0.02358
4042	3.42E-10	0.0002322	3.85E-13	0.02358
4043	3.85E-10	0.0002264	4.63E-13	0.02358
4043	4.17E-10	0.0002213	5.40E-13	0.02359
4044	4.42E-10	0.0002166	6.13E-13	0.02359
4044	4.60E-10	0.0002122	6.82E-13	0.02359
4080	2.53E-10	0.0001203	6.43E-13	0.02380
Média				**0.02360**

Figura 131: Resuldados numéricos para 0.0008 m de tamanho de elemento da malha do corpo e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [°C]	-10
Temperatura sup [°C]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.0008
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	27532
Nº de Elementos	1093278

Teste 4				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.41E-11	0.000292	2.15E-13	0.02357
4041	6.99E-11	0.0002676	2.10E-13	0.02357
4041	1.37E-10	0.0002561	2.20E-13	0.02358
4042	2.20E-10	0.0002468	2.56E-13	0.02358
4042	2.88E-10	0.0002391	3.14E-13	0.02358
4042	3.43E-10	0.0002325	3.86E-13	0.02358
4043	3.85E-10	0.0002267	4.64E-13	0.02358
4043	4.18E-10	0.0002215	5.41E-13	0.02359
4044	4.42E-10	0.0002168	6.14E-13	0.02359
4044	4.61E-10	0.0002124	6.83E-13	0.02359
4080	2.53E-10	0.0001204	6.43E-13	0.02380
Média				**0.02360**

Apêndice B

Figura 132: Resuldados numéricos para 0.01 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.01
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	9032
Nº de Elementos (sóldio)	156566

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4042	1.00E-15	0.01024	4.12E-10	0.00289
4043	1.00E-15	0.0006485	3.62E-10	0.00289
4045	1.00E-15	0.0006467	3.22E-10	0.00289
4047	1.00E-15	0.0006294	2.90E-10	0.00289
4048	1.00E-15	0.0006066	2.66E-10	0.00289
4050	1.00E-15	0.0005825	2.46E-10	0.00289
4052	1.00E-15	0.0005584	2.30E-10	0.00289
4054	1.00E-15	0.0005346	2.17E-10	0.00289
4055	1.00E-15	0.0005113	2.06E-10	0.00289
4057	1.00E-15	0.0004884	1.95E-10	0.00289
4080	1.00E-15	0.0003558	1.26E-10	0.00289
Média				**0.00289**

Figura 133: Resuldados numéricos para 0.001 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.001
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	188101
Nº de Elementos (sóldio)	604448

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	1.00E-15	0.0004931	9.88E-13	0.00569
4040	1.00E-15	0.0001833	1.53E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.0001679	2.05E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.0001555	2.53E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.000145	2.97E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.0001357	3.38E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.0001273	3.76E-12	0.00569
4041	1.00E-15	0.0001196	4.12E-12	0.00569
4042	1.00E-15	0.0001126	4.45E-12	0.00569
4042	1.00E-15	0.0001061	4.76E-12	0.00569
4057	1.00E-15	2.09E-05	3.38E-12	0.00569
4074	1.00E-15	9.39E-07	6.59E-13	0.00569
4080	1.00E-15	4.97E-07	4.29E-13	0.00569
Média				**0.00569**

Figura 134: Resuldados numéricos para 0.0008 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.0008
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	302477
Nº de Elementos (sóldio)	1093278

Teste 3				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	1.00E-15	0.0006708	5.58E-13	0.00621
4040	1.00E-15	0.0001543	9.02E-13	0.00621
4040	1.00E-15	0.0001444	1.23E-12	0.00621
4040	1.00E-15	0.0001361	1.54E-12	0.00621
4041	1.00E-15	0.0001286	1.83E-12	0.00621
4041	1.00E-15	0.0001219	2.10E-12	0.00621
4041	1.00E-15	0.0001158	2.35E-12	0.00621
4041	1.00E-15	0.0001101	2.58E-12	0.00621
4041	1.00E-15	0.0001047	2.80E-12	0.00621
4041	1.00E-15	9.98E-05	3.01E-12	0.00621
4051	1.00E-15	2.41E-05	3.29E-12	0.00621
4062	1.00E-15	1.87E-06	6.56E-13	0.00621
4072	1.00E-15	6.35E-07	3.38E-13	0.00621
4080	1.00E-15	2.44E-07	2.28E-13	0.00621
Média				**0.00621**

Figura 135: Resuldados numéricos para 0.0007 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.0007
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	395699
Nº de Elementos (sóldio)	1579126

Teste 4				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	1.00E-15	0.0005965	3.39E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001532	6.06E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001453	8.68E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001382	1.11E-12	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001319	1.34E-12	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001262	1.56E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001209	1.76E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.000116	1.96E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001114	2.14E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001071	2.31E-12	0.00659
4048	1.00E-15	3.19E-05	3.51E-12	0.00659
4055	1.00E-15	2.53E-06	9.56E-13	0.00659
4063	1.00E-15	4.52E-07	1.95E-13	0.00659
4071	1.00E-15	1.36E-07	7.64E-14	0.00659
4079	1.00E-15	4.57E-08	3.49E-14	0.00659
4080	1.00E-15	2.41E-08	2.20E-14	0.00659
Média				**0.00659**

Figura 136: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D*.

Temperatura ar [ºC]	-10
Temperatura sup [ºC]	0
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	526279
Nº de Elementos (sóldio)	4215794

Teste 4				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	1.00E-15	0.0005965	3.39E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001532	6.06E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001453	8.68E-13	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001382	1.11E-12	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001319	1.34E-12	0.00659
4040	1.00E-15	0.0001262	1.56E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001209	1.76E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.000116	1.96E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001114	2.14E-12	0.00659
4041	1.00E-15	0.0001071	2.31E-12	0.00659
4048	1.00E-15	3.19E-05	3.51E-12	0.00659
4055	1.00E-15	2.53E-06	9.56E-13	0.00659
4063	1.00E-15	4.52E-07	1.95E-13	0.00659
4071	1.00E-15	1.36E-07	7.64E-14	0.00659
4079	1.00E-15	4.57E-08	3.49E-14	0.00659
4080	1.00E-15	2.41E-08	2.20E-14	0.00659
Média				**0.00659**

Apêndice C

Figura 137: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	1

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	526279
Nº de Elementos (sóldio)	2433884

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	1.00E-15	0.0008525	1.18E-12	0.004875
4040	1.00E-15	0.0001984	2.06E-12	0.004875
4040	1.00E-15	0.0001797	2.84E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001647	3.53E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001518	4.16E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001403	4.73E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001299	5.25E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001203	5.73E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001115	6.16E-12	0.004875
4041	1.00E-15	0.0001035	6.56E-12	0.004875
4053	1.00E-15	1.66E-05	7.39E-12	0.004875
4066	1.00E-15	1.64E-06	1.67E-12	0.004875
4079	1.00E-15	5.38E-07	2.87E-13	0.004875
4080	1.00E-15	3.42E-07	1.51E-13	0.004875
Média				**0.00488**

Figura 138: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 1.

Condições	Tipo II
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	1

Teste 2				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
42420	1.00E-15	0.0005389	8.09E-13	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001891	1.51E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001736	2.13E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001608	2.69E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001497	3.20E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001398	3.67E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001307	4.10E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001224	4.50E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001147	4.87E-12	0.2323
42420	1.00E-15	0.0001075	5.21E-12	0.2323
42430	1.00E-15	1.91E-05	6.35E-12	0.2323
42450	1.00E-15	8.96E-07	1.45E-12	0.2323
42460	1.00E-15	9.78E-08	2.25E-13	0.2323
42460	1.00E-15	7.98E-08	1.24E-13	0.2323
Média				**0.23230**

Figura 139: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 2.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	2

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	513421
Nº de Elementos (sóldio)	2455994

Teste 1				
Time (s)	Change in Instant. Ice Growth	Change in ice surface temperature	Change in water film thickness	Total mass of ice (Kg)
4040	1.00E-15	0.0009423	1.46E-12	0.005119
4040	1.00E-15	0.000203	2.51E-12	0.005119
4040	1.00E-15	0.0001822	3.41E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.0001654	4.20E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.000151	4.91E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.0001382	5.54E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.0001266	6.11E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.0001162	6.62E-12	0.005119
4041	1.00E-15	0.0001067	7.08E-12	0.005119
4042	1.00E-15	9.80E-05	7.50E-12	0.005119
4055	1.00E-15	1.44E-05	6.98E-12	0.005119
4071	1.00E-15	1.54E-06	1.09E-12	0.005119
4080	1.00E-15	4.65E-07	2.23E-13	0.005119
Média				0.00512

Figura 140: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 2.

Condições	Tipo II
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	2

Teste 2				
Time (s)	Change in Instant. Ice Growth	Change in ice surface temperature	Change in water film thickness	Total mass of ice (Kg)
4040	1.00E-15	0.001057	1.13E-12	0.02366
4040	1.00E-15	0.0001951	1.95E-12	0.02366
4040	1.00E-15	0.0001768	2.67E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001622	3.31E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001497	3.89E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001386	4.41E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001286	4.88E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001194	5.31E-12	0.02366
4041	1.00E-15	0.0001109	5.70E-12	0.02366
4042	1.00E-15	0.0001031	6.06E-12	0.02366
4056	1.00E-15	1.67E-05	5.99E-12	0.02366
4071	1.00E-15	1.62E-06	9.59E-13	0.02366
4080	1.00E-15	6.02E-07	2.77E-13	0.02366
Média				0.02366

Figura 141: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 3.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	3

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	524550
Nº de Elementos (sóldio)	2433828

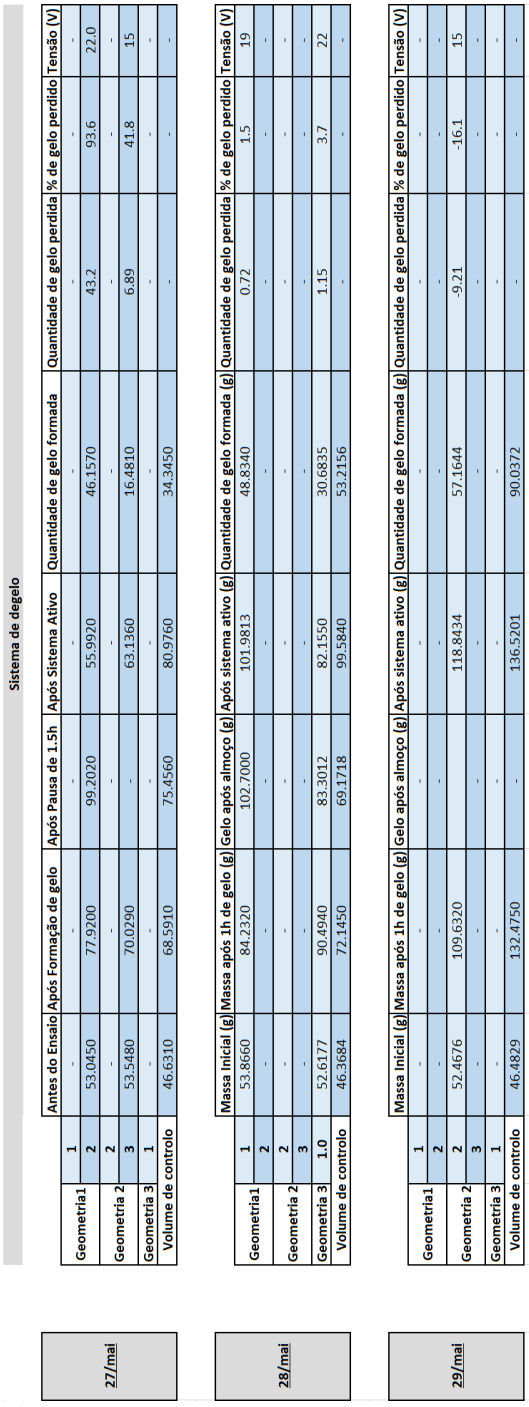
Teste 1				
Time (s)	Change in Instant. Ice Growth	Change in ice surface temperature	Change in water film thickness	Total mass of ice (Kg)
42420	1.00E-15	0.00191	2.19E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001894	3.43E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001683	4.24E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001535	4.84E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001413	5.32E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001306	5.72E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001209	6.08E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001121	6.40E-12	0.05266
42420	1.00E-15	0.0001041	6.70E-12	0.05266
42420	1.00E-15	9.67E-05	6.97E-12	0.05266
42440	1.00E-15	1.73E-05	5.99E-12	0.05266
42450	1.00E-15	1.17E-06	8.27E-13	0.05266
42470	1.00E-15	4.28E-07	2.54E-13	0.05266
42480	1.00E-15	2.47E-07	1.49E-13	0.05266
42500	1.00E-15	1.54E-07	9.42E-14	0.05266
42510	1.00E-15	1.01E-07	6.12E-14	0.05266
42530	1.00E-15	6.67E-08	4.02E-14	0.05266
42540	1.00E-15	4.47E-08	2.67E-14	0.05266
42560	1.00E-15	3.01E-08	1.77E-14	0.05266
42570	1.00E-15	2.03E-08	1.18E-14	0.05266
42590	1.00E-15	1.37E-08	7.91E-15	0.05266
42610	1.00E-15	9.28E-09	5.30E-15	0.05266
42620	1.00E-15	6.28E-09	3.56E-15	0.05266
42640	1.00E-15	4.25E-09	2.39E-15	0.05266
42650	1.00E-15	2.88E-09	1.61E-15	0.05266
42670	1.00E-15	1.95E-09	1.08E-15	0.05266
42680	1.00E-15	1.32E-09	7.28E-16	0.05266
42700	1.00E-15	8.95E-10	4.90E-16	0.05266
42710	1.00E-15	6.06E-10	3.30E-16	0.05266
42730	1.00E-15	4.11E-10	2.23E-16	0.05266
42750	1.00E-15	2.78E-10	1.50E-16	0.05266
42760	1.00E-15	1.89E-10	1.01E-16	0.05266
42780	1.00E-15	1.28E-10	6.85E-17	0.05266
42790	1.00E-15	8.66E-11	4.62E-17	0.05266
42810	1.00E-15	5.86E-11	3.12E-17	0.05266
42820	1.00E-15	3.97E-11	2.11E-17	0.05266
42840	1.00E-15	2.69E-11	1.43E-17	0.05266
42840	1.00E-15	2.18E-11	1.13E-17	0.05266
Média				0.05266

Figura 142: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo II e Geometria 3.

Condições	Tipo II
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	3

Teste 2				
Time (s)	Change in Instant. Ice Growth	Change in ice surface temperature	Change in water film thickness	Total mass of ice (Kg)
42420	1.00E-15	0.00116	1.74E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001799	2.79E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001601	3.49E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001465	3.99E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001355	4.39E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001259	4.71E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001172	5.00E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.0001093	5.26E-12	0.241
42420	1.00E-15	0.000102	5.50E-12	0.241
42420	1.00E-15	9.52E-05	5.71E-12	0.241
42440	1.00E-15	1.62E-05	5.00E-12	0.241
42450	1.00E-15	6.50E-07	6.87E-13	0.241
42470	1.00E-15	6.66E-08	3.09E-13	0.241
42480	1.00E-15	1.02E-08	2.27E-13	0.241
42500	1.00E-15	1.63E-09	1.72E-13	0.241
42520	1.00E-15	3.10E-10	1.33E-13	0.241
42530	1.00E-15	1.32E-10	1.04E-13	0.241
42550	1.00E-15	9.47E-11	8.19E-14	0.241
42560	1.00E-15	7.24E-11	6.50E-14	0.241
42580	1.00E-15	5.63E-11	5.19E-14	0.241
42600	1.00E-15	4.41E-11	4.17E-14	0.241
42610	1.00E-15	3.49E-11	3.36E-14	0.241
42630	1.00E-15	2.78E-11	2.72E-14	0.241
42640	1.00E-15	2.23E-11	2.21E-14	0.241
42660	1.00E-15	1.79E-11	1.79E-14	0.241
42680	1.00E-15	1.45E-11	1.46E-14	0.241
42690	1.00E-15	1.17E-11	1.19E-14	0.241
42710	1.00E-15	9.50E-12	9.71E-15	0.241
42720	1.00E-15	7.72E-12	7.94E-15	0.241
42740	1.00E-15	6.29E-12	6.49E-15	0.241
42760	1.00E-15	5.13E-12	5.31E-15	0.241
42770	1.00E-15	4.19E-12	4.35E-15	0.241
42790	1.00E-15	3.43E-12	3.56E-15	0.241
42800	1.00E-15	2.80E-12	2.92E-15	0.241
42820	1.00E-15	2.29E-12	2.39E-15	0.241
42840	1.00E-15	1.88E-12	1.96E-15	0.241
42840	1.00E-15	1.66E-12	1.73E-15	0.241
Média				0.24100

Apêndice D



Sistema de degelo

27/mai

		Antes do Ensaio	Após Formação de gelo	Após Pausa de 1.5h	Após Sistema Ativo	Quantidade de gelo formada	Quantidade de gelo perdida	% de gelo perdido	Tensão (V)
Geometria1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	53.0450	77.9200	99.2020	55.9920	46.1570	43.2	93.6	22.0
Geometria 2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	53.5480	70.0290	-	63.1360	16.4810	6.89	41.8	15
Geometria 3	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Volume de controlo		46.6310	68.5910	75.4560	80.9760	34.3450	-	-	-

28/mai

		Massa Inicial (g)	Massa após 1h de gelo (g)	Gelo após almoço (g)	Após sistema ativo (g)	Quantidade de gelo formada (g)	Quantidade de gelo perdida	% de gelo perdido	Tensão (V)
Geometria1	1	53.8660	84.2320	102.7000	101.9813	48.8340	0.72	1.5	19
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Geometria 2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Geometria 3	1.0	52.6177	90.4940	83.3012	82.1550	30.6835	1.15	3.7	22
Volume de controlo		46.3684	72.1450	69.1718	99.5840	53.2156	-	-	-

29/mai

		Massa Inicial (g)	Massa após 1h de gelo (g)	Gelo após almoço (g)	Após sistema ativo (g)	Quantidade de gelo formada (g)	Quantidade de gelo perdida	% de gelo perdido	Tensão (V)
Geometria1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Geometria 2	2	52.4676	109.6320	-	118.8434	57.1644	-9.21	-16.1	15
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Geometria 3	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Volume de controlo		46.4829	132.4750	-	136.5201	90.0372	-	-	-

Figura 143: Dados dos ensaios de sistema de degelo, na câmara climática.

Sistema de Anti - gelo						
		Antes do Ensaio	Após Sistema Ativo	Quantidade de gelo formada	% de gelo ganho	Tensão (V)
Geometria1	1	50.3060	52.7940	2.4880	4.9	19
	2	-	-	-	-	-
Geometria 2	2	53.1860	54.9530	1.7670	3.3	15
	3	-	-	-	-	-
Geometria 3	1	-	-	-	-	-

		Massa Inicial (g)	Após sistema ativo (g)	Quantidade de gelo formada (g)	% de gelo ganho	Tensão (V)
Geometria1	1	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
Geometria 2	2	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-
Geometria 3	1	52.6177	66.0480	13.4303	25.5	22

		Massa Inicial (g)	Após sistema ativo (g)	Quantidade de gelo formada (g)	% de gelo ganho	Tensão (V)
Geometria1	1	-	-	-	-	-
	2	56.5760	71.5050	14.9290	26.4	22
Geometria 2	2					
	3	52.4676	65.8673	13.3997	25.5	15
Geometria 3	1	-	-	-	-	-

Figura 144: Dados dos ensaios de sistema de anti-gelo, na câmara climática.

Apêndice E

Figura 145: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1 - Amostra 1.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	1 (Amostra 1)

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	526279
Nº de Elementos (sóldio)	2433884

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.01E-08	4.58E-06	6.84E-12	0.02713
4040	8.56E-10	1.67E-06	6.53E-12	0.02713
4040	6.82E-10	1.43E-06	6.42E-12	0.02714
4041	5.69E-10	1.25E-06	6.35E-12	0.02714
4041	4.88E-10	1.11E-06	6.31E-12	0.02714
4041	4.27E-10	9.92E-07	6.26E-12	0.02714
4041	3.80E-10	8.99E-07	6.22E-12	0.02714
4041	3.45E-10	8.20E-07	6.18E-12	0.02714
4041	3.17E-10	7.52E-07	6.14E-12	0.02714
4041	2.94E-10	6.93E-07	6.09E-12	0.02714
4054	7.43E-11	1.42E-07	3.56E-12	0.02718
4067	3.24E-12	7.79E-09	5.43E-13	0.02723
4080	1.28E-13	2.36E-09	5.72E-14	0.02727
Média				**0.02716**

Figura 146: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 1 - Amostra 2.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	1 (Amostra 2)

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	526279
Nº de Elementos (sóldio)	2433884

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	5.29E-08	6.81E-06	7.06E-12	0.02204
4040	2.67E-09	6.21E-06	6.18E-12	0.02204
4040	1.94E-09	4.06E-06	5.86E-12	0.02205
4041	1.49E-09	3.62E-06	5.76E-12	0.02205
4041	1.20E-09	3.29E-06	5.69E-12	0.02205
4041	9.87E-10	3.04E-06	5.55E-12	0.02205
4041	8.41E-10	2.83E-06	5.39E-12	0.02205
4041	7.40E-10	2.66E-06	5.26E-12	0.02205
4041	6.74E-10	2.52E-06	5.15E-12	0.02205
4041	6.32E-10	2.38E-06	5.05E-12	0.02205
4053	1.85E-10	4.99E-07	2.74E-12	0.02207
4067	4.29E-12	1.16E-08	5.33E-13	0.02209
4080	1.84E-13	2.89E-09	5.98E-14	0.02212
Média				**0.02206**

Figura 147: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 2 - Amostra 2 e 3.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	2 (Amostra 2 e 3)

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	513421
Nº de Elementos (sóldio)	2455994

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
4040	4.03E-08	1.37E-05	6.23E-12	0.01615
4040	8.52E-09	9.68E-06	6.21E-12	0.01615
4040	4.95E-09	6.75E-06	6.49E-12	0.01615
4041	3.96E-09	6.12E-06	6.11E-12	0.01615
4041	3.24E-09	5.67E-06	5.25E-12	0.01615
4041	2.58E-09	5.31E-06	4.42E-12	0.01615
4041	2.01E-09	5.02E-06	3.89E-12	0.01615
4041	1.54E-09	4.78E-06	3.50E-12	0.01615
4041	1.17E-09	4.57E-06	3.16E-12	0.01615
4042	8.82E-10	4.39E-06	2.83E-12	0.01615
4055	1.98E-10	1.23E-06	3.46E-13	0.01617
4071	9.52E-12	3.45E-08	1.21E-14	0.01618
4080	2.39E-13	4.60E-09	2.49E-15	0.01619
Média				**0.01616**

Figura 148: Resuldados numéricos para 0.0006 m de tamanho de elemento da malha e 100 iterações no módulo *CHT3D* para condições tipo I e Geometria 3 - Amostra 1.

Condições	Tipo I
Tamanho do Elemento [m]	0.0006
Geometria	3 (Amostra 1)

Nº de iterações	100
Nº de Elementos (Fluído)	513421
Nº de Elementos (sóldio)	2455994

Teste 1				
Time (s)	**Change in Instant. Ice Growth**	**Change in ice surface temperature**	**Change in water film thickness**	**Total mass of ice (Kg)**
42420	3.98E-08	2.26E-05	6.16E-12	0.1449
42420	5.80E-09	9.73E-06	5.51E-12	0.1449
42420	4.16E-09	8.36E-06	5.65E-12	0.1449
42420	3.21E-09	7.58E-06	5.62E-12	0.1449
42420	2.49E-09	7.00E-06	5.22E-12	0.1449
42420	1.92E-09	6.53E-06	4.62E-12	0.1449
42420	1.48E-09	6.14E-06	4.26E-12	0.1449
42420	1.18E-09	5.81E-06	3.93E-12	0.1449
42420	8.81E-10	5.53E-06	3.69E-12	0.1449
42420	6.80E-10	5.28E-06	3.49E-12	0.1449
42440	1.45E-10	1.43E-06	1.47E-12	0.1449
42450	1.01E-11	5.44E-08	3.09E-13	0.1449
42460	6.54E-13	6.11E-09	4.71E-14	0.1449
Média				**0.14490**