



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Miguel Dias Pereira

**MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE
ARREFECIMENTO DE SUPERFÍCIES**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do João Miguel Dias Pereira, Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão e pelo Professor Doutor José Joaquim da Costa e apresentada Dissertação de mestrado ao Departamento de Engenharia Mecânica.

fevereiro de 2020



Métodos de caracterização de arrefecimento de superfícies

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Surface cooling characterization methods

Autor

João Miguel Dias Pereira

Orientadores

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial



Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

Coimbra, fevereiro, 2020

*"Never give up on what you really want to do.
The person with big dreams is more powerful than the one with all the
facts."*

Albert Einstein

À minha família.

Agradecimentos

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio e ajuda incondicional de algumas pessoas a quem não poderia deixar de prestar o meu sincero agradecimento.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã, por todo o esforço que fizeram ao longo destes anos. Nada seria possível sem a sua ajuda e paciência ao longo desta longa caminhada.

Ao Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão, ao Professor Doutor José Joaquim da Costa, por toda a ajuda e conhecimento essenciais para a resolução desta dissertação.

Aos meus amigos e colegas de curso por todos os momentos inesquecíveis partilhados, e por todo o apoio e força ao longo desta caminhada.

Aos colegas de laboratório, nomeadamente ao Mestre Pedro Franco e ao Doutor Nuno Rosa por toda a disponibilidade, ajuda e motivação nos momentos necessários.

Resumo

O arrefecimento gerado pelo impacto de um spray de neve carbónica, permite extrair elevadas quantidades de energia calorífica de um material, através da mudança de fase por sublimação do dióxido de carbono. Então, o principal objectivo desta dissertação prende-se com a necessidade de aprofundar os métodos experimentais de quantificação dos fluxos de calor numa superfície, de forma a perceber e analisar as disparidades observadas em trabalhos anteriores, assim como, quantificar e propor o método mais adequado para realizar essa quantificação. Em trabalhos anteriores a medição dos fluxos de calor no arrefecimento numa superfície previamente aquecida por intermédio de um spray de gelo seco, foi efectuada por duas metodologias distintas. Numa primeira fase a quantificação foi realizada com recurso a quatro termopares de superfície posicionados na face superior de uma placa quadrada, enquanto que numa segunda fase, a medição dos fluxos de calor passou pela implementação de sete sondas termopares posicionadas no interior da placa a cerca de $300 \mu\text{m}$ da superfície da mesma. As disparidades observadas nos cálculos dos coeficientes de convecção devem-se ao facto das sondas termopares introduzidas na placa, não conseguirem vencer a resistência térmica da placa, devido à distância a que estas se encontram na superfície não ser a ideal, o que impossibilita a sua utilização nestas condições.

Por forma a propor o método mais adequado na quantificação de fluxos de calor numa superfície, foi construído e implementado um termopar de filme-fino. Estes termopares têm como particularidade utilizar como junção de referência, o mesmo material do substrato, mergulhado num banho de gelo a 0°C . A outra junção é definida por um fio eléctrico inserido num furo vertical na placa de alumínio e isolado por uma pasta cerâmica, e um fino filme de tinta de prata depositado na superfície do furo por forma a criar uma ligação eléctrica entre o fio de constantan e a placa. A diferença de potencial entre as duas junções permite calibrar este termopar com base na temperatura de superfície.

Estes termopares possibilitam medir rápidas variações de temperatura com um tempo de resposta bastante baixo, que pode ser implementado tanto em superfícies planas como em superfícies rugosas, relativamente fáceis de construir e reparar. Estes termopares têm várias limitações na sua construção, uma vez que todos os seus componentes são relativamente sensíveis e ficam expostos ao ambiente com pouca protecção, tornam-se bastante susceptíveis a avariar ou partir. Outra limitação prende-se com o facto de cada vez que este avaria ou deixa de funcionar, é necessário calibrar novamente por forma a garantir que este funciona da forma correcta.

Palavras Chave: Temperatura superficial, Calibração, Termopar filme-fino, Fluxo

de calor

Abstract

One way to extract high amounts of heat energy from a material is to use a spray of carbonic snow, through the sublimation of carbon dioxide. So, the main objective of this thesis comes with the need to explore the experimental methods we have to determine the heat flux on a surface, since in past theses some disparities were observed in the values obtained in the convection coefficients, and explore and propose the most appropriate method to perform this quantification of heat flux.

In previous works, the measurement of heat flows in cooling on a previously heated surface using a spray of dry ice, was done by two different methodologies. In the first one, the quantification was carried out using four surface thermocouples positioned on the surface of a plate, while in a second phase, the measurement of heat flows was achieved with the implementation of seven thermocouple probes positioned inside the plate about $300\ \mu\text{m}$ of its surface. The disparities observed in the convection coefficients values are due to the fact that the thermocouple probes inserted in the plate, fail to overcome the thermal resistance between the plate and the electric wire, due to a not ideal distance at which they are on the surface.

To measure rapid surface temperature change a thin film thermocouple was constructed, since this type of thermocouple is relatively simple to construct and easy to repair. These thermocouples have the particularity of using the same substrate material as a reference junction, immersed in an ice bath at 0°C . The second junction is an electric wire added into a hole in the aluminium plate, isolated by a ceramic cement, where the electric connection between the constantan wire and the plate is accomplished with a thin film of silver. The temperature difference between the two junctions, produces a voltage difference which can be related to the surface temperature.

The thin-film thermocouples have been developed to measure rapid temperature variations with very low response time, which can be implemented on both flat and rough surfaces, relatively easy to build and repair. These thermocouples have several limitations in their construction, since all their components are relatively sensitive and are exposed to the environment with little protection, they become quite susceptible to damage or break. Other limitation is connected to the fact that every time this sensor stops working correctly or breaks, it is necessary to calibrate it again.

Keywords: Surface Temperature, Calibration, Thin film Thermocouple, Heat flux

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	ix
1 Introdução	1
1.1 Revisão bibliográfica	3
1.1.1 Caracterização térmica de superfícies interfaciais sujeitas a escoamentos bifásicos	3
1.1.2 Comparação das metodologias de caracterização da temperatura da superfície	4
1.1.3 Termopares de filme-fino	7
1.2 Objetivos	9
2 Metodologia Experimental	11
2.1 Placa de ensaio	11
2.2 Instrumentação e medida	13
2.2.1 Medição de temperatura	13
2.3 Calibração	21
2.3.1 Banho termostatizado de água agitada	21
2.3.2 Estufa para calibração	22
3 Resultados e Discussão	25
3.1 Temperaturas obtidas no equipamentos de medição	25
3.1.1 Ensaios com termopar de superfície e sonda termopar	26
3.1.2 Ensaios com termopar de filme-fino	28
3.2 Discussão das limitações do termopar de filme-fino	31

4	Notas conclusivas e trabalho futuro	35
	Bibliografia	37
	Inclusão de Imagens	39

Lista de Figuras

Figura 1.1	Evolução da temperatura obtida nos trabalhos de Bernardo (2016) com termopares de superfície (esquerda) e em Marques (2018) com sondas termopar embutidas na placa com a junção à distância de 0.3 mm da superfície de impacto (direita).	6
Figura 1.2	Esquema de um termopar de filme-fino [Adaptado de Heichal <i>et al.</i> (2005)]	8
Figura 2.1	Placa de Alumínio com 300x300 mm ²	12
Figura 2.2	Termopar de superfície e termopar de filme-fino na placa de Alumínio.	14
Figura 2.3	Termopar de superfície.	14
Figura 2.4	<i>Data Logger</i> Dt9828.	15
Figura 2.5	Sonda termopar introduzida na placa	16
Figura 2.6	Vista superior da placa com o fio de constantan fixo pelo cimento.	17
Figura 2.7	Estufa utilizada na cura.	18
Figura 2.8	Filme de tinta de prata no termopar de filme-fino de 3mm de diâmetro.	18
Figura 2.9	Filme de tinta de prata no termopar de filme-fino de 0,7mm de diâmetro.	19
Figura 2.10	Fio de Alumínio ligado à placa.	20
Figura 2.11	Fio de Alumínio e constantan que ficam mergulhados no banho a 0°C.	20
Figura 2.12	<i>Data logger</i> USB-6211	21
Figura 2.13	Reta de calibração do termopar de superfície.	22
Figura 2.14	Reta de calibração da sonda termopar.	22

Figura 2.15	Reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.	23
Figura 2.16	Reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino com 0,7mm de diâmetro.	24
Figura 3.1	Perfil de temperaturas para termopar de superfície.	26
Figura 3.2	Perfil de temperaturas para a sonda termopar.	27
Figura 3.3	Perfil de temperaturas para duas a sondas termopar e termopar de superfície.	28
Figura 3.4	Teste com termopar de filme-fino com 3mm.	28
Figura 3.5	Teste 1 com termopar de filme-fino com 0.7mm.	30
Figura 3.6	Teste 2 com termopar de filme-fino com 0.7mm.	31
Figura 3.7	Teste 3 com termopar de filme-fino com 0.7mm.	31
Figura 3.8	Exemplo de avaria durante a calibração do termopar de filme-fino a 63°C.	32
Figura 1	Exemplo 1 de calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.	39
Figura 2	Exemplo 2 de calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.	39

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Propriedades termofísicas do Alumínio 5083 e 5356.	8
Tabela 2.1	Propriedades termofísicas do alumínio EN AW 5083 a 293.15 <i>K</i>	13
Tabela 2.2	Propriedades termofísicas do Cromel e Alumel que constituem os termopares	15
Tabela 2.3	Resultados obtidos na calibração dos termopares.	21
Tabela 2.4	Resultados obtidos na calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.	23
Tabela 2.5	Resultados obtidos na calibração do termopar de filme-fino com 0.7mm de diâmetro.	24

Nomenclatura

A	Área	$[m^2]$
c_p	Calor específico	$[J kg^{-1}K^{-1}]$
D	Diâmetro	m
e_T	Erro associado	
g	Aceleração gravítica	$m s^{-2}$
H	Largura	m
h	Coefficiente de convecção	$W m^{-2}K^{-1}$
k	Condutibilidade térmica	$W m^{-1}K^{-1}$
L	Comprimento	m
m	metro	$[m]$
\dot{m}	Caudal mássico	$kg s^{-1}$
Q	Ganho de energia	W
r	Raio do tubo	m
S_t	Desvio padrão	
T	Temperatura	$^{\circ}C$
U	Coefficiente de perdas de calor	$W m^{-2}K^{-1}$

V	Volume	m^3
v	Velocidade	$m s^{-1}$

Números Adimensionais

Nu	Número de Nusselt
Re	Número de Reynolds

Símbolos Gregos

α_T	Difusividade	$m^2 s^{-1}$
ΔT	Diferença de temperatura	$^{\circ}C$
ν	Viscosidade cinemática	$m^2 s^{-1}$
ρ	Massa específica ou Densidade	$kg m^{-3}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.670 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

Subscritos

Siglas

CO_2 Dióxido de Carbono

1 Introdução

A globalização é um fenómeno de extrema importância pois permitiu a aproximação de várias nações e povos, proporcionando assim um crescimento exponencial tanto a nível económico, como a nível social e cultural. Com este efeito, o nível de competitividade nas indústrias aumentou, o que levou a que as empresas procurassem potenciar os seus processos tecnológicos, reduzindo os custos e com ciclos de produção mais rápidos e eficientes.

No caso das indústrias de moldes a redução do tempo de arrefecimento dos moldes é de elevada importância na medida em que este permite às empresas tornar o processo mais eficiente e reduzir o tempo de produção, o que se pode traduzir em benefícios financeiros.

Em dissertações anteriores, Bernardo (2016), Brandão (2017), Barbosa (2017) e Marques (2018), foi proposto que no tempo de abertura e fecho do molde aquando da extracção da peça, existe uma oportunidade para um arrefecimento adicional utilizando a sublimação de partículas sólidas de neve carbónica (dióxido de carbono, CO_2), recorrendo, assim, à mudança de fase. A produção dessas partículas ocorre através de uma expansão isentálpica de CO_2 em estado líquido por efeito de Joule-Thompson. Uma vez que estas interagem com superfícies aquecidas, a sua sublimação à pressão atmosférica permite retirar quantidades relevantes de calor às superfícies em contacto, contribuindo para o seu arrefecimento.

De forma a avaliar e quantificar a quantidade de energia removida mediante a optimização dos parâmetros de injeção, é necessário medir variações de temperatura na superfície e calcular o respectivo coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada com mudança de fase. Em Marques (2018) e Bernardo (2016) foram usadas instalações laboratoriais e métodos diferentes na caracterização da evolução da temperatura da superfície, tendo-se observado uma disparidade nos valores obtidos no cálculo do coeficiente de convecção para a mesma experiência. Em Bernardo (2016), a medição

da evolução da temperatura causada pelo impacto do spray de neve carbónica foi obtida com recurso a termopares de superfície, enquanto que em Marques (2018) essa evolução foi obtida com recurso a termopares posicionados no interior a 300 μm da superfície. A ideia no segundo caso é a de minimizar a resistência térmica associada à condução de calor entre a junção do termopar e a superfície que interage com o spray, em relação à resistência térmica associada à convecção forçada, de modo a que o gradiente térmico nessa espessura fosse, praticamente, nulo e somente função do tempo. Dada a disparidade observada, colocou-se a hipótese de que pudesse estar relacionada com as metodologias de caracterização da temperatura da superfícies. Assim, esta dissertação pretende examinar ambos os métodos experimentais usados nas teses anteriores.

Por outro lado, o que os métodos usados têm de comum é o recurso a termopares padronizados em termos dos materiais usados na sua produção que, nos casos referidos anteriormente, correspondem a termopares do tipo K constituídos por duas ligas metálicas, uma de Níquel-Crómio e outra de Níquel-Alumel. Porém, uma das limitações no uso de termopares padronizados para medir a temperatura numa interface é a resistência térmica associada ao facto de não serem feitos do mesmo material, suscitado a dúvida de qual a temperatura que, realmente, estão a medir. Isto é, se a temperatura da superfície - como se pretende - ou uma média ponderada com a temperatura da neve carbónica. Daí a necessidade de desenvolver sensores que tenham em conta este aspecto como é o caso dos termopares de filme-fino introduzidos por Heichal *et al.* (2005) cujo detalhe será explorado na revisão bibliográfica que se segue.

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma contextualização do trabalho, assim como os objectivos subjacentes ao mesmo. O segundo capítulo refere-se à instalação experimental, explicitando todos os constituintes da mesma. Este contempla também a explicação da construção dos termopares de filme-fino, e a consequente implementação e calibração destes termopares e dos termopares de superfície e sondas termopares. O terceiro capítulo é referente a análise e discussão dos resultados obtidos nos três termopares, bem como, as limitações implícitas na construção dos termopares de filme-fino. Para finalizar, no quarto capítulo descrevem-se as principais conclusões retiradas ao longo do presente trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Desta forma iremos construir e implantar um termopar de filme-fino, dado que se-

gundo Heichal *et al.* (2005) estes permitem medir rápidas variações de temperatura nas superfícies, podem ser construídos em um qualquer substrato metálico e permitem que outros termopares sejam posicionados próximo destes. A maioria dos termopares são constituídos por dois fios de metais diferentes unidos em apenas uma das extremidades, onde cada vez que se verifica uma variação da temperatura entre as duas extremidades, esta produz uma diferença de potencial que pode ser medida de forma a obter a temperatura. Uma vez que os termopares de filme-fino utilizam como um dos metais das extremidades o mesmo metal do substrato, mergulhado num banho de gelo a 0°C de forma a que este funcione como a junção de referência, estes termopares permitem na teoria obter resultados mais fiáveis.

1.1. Revisão bibliográfica

1.1.1. Caracterização térmica de superfícies interfaciais sujeitas a escoamentos bifásicos

Como aludido anteriormente, medir a temperatura da superfície não é uma tarefa trivial quando o comportamento térmico dessa está associado a um escoamento bifásico de convecção forçada, como é o caso do impacto do spray de partículas de neve carbónica. Pois, existem duas abordagens ao problema: *i)* a temperatura de superfície proveniente do contacto entre dois sólidos (placa e partículas de neve carbónica); *ii)* a temperatura de superfície proveniente de uma interacção entre a placa, o spray de partículas de neve carbónica e uma película de vapor gerada pela sublimação dessas partículas.

Em Seki *et al.* (1978) encontramos a referência à temperatura de contacto (T_c) entre dois materiais como uma média ponderada pela efusividade térmica - $\epsilon = \sqrt{k\rho c_p}$ - de cada desses,

$$T_c = \frac{\epsilon_1 T_1 + \epsilon_2 T_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (1.1)$$

Considerando que um dos materiais é a superfície da placa (s) cujas propriedades termofísicas no caso do alumínio EN AW 5083, ou no caso do aço CK45, usados em experiências anteriores, resultam nas efusividades térmicas de $\epsilon_s = 16736.1 J \cdot m^{-2} K^{-1} s^{-1/2}$ e $13436.9 J \cdot m^{-2} K^{-1} s^{-1/2}$, respectivamente.

Se o segundo materiais for a neve carbónica à pressão atmosférica, que se encontra à temperatura de $T_{CO_2} = -78.5^\circ\text{C} = 194.65\text{ K}$, considerando a massa volúmica de $\rho_{CO_2} = 1118\text{ kg/m}^3$ obtida por Wells *et al.* (2015), condutibilidade térmica de $k_{CO_2} = 0.108\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ extrapolada dos resultados de Sumarokov *et al.* (2003), e o calor específico médio a T_{CO_2} de $c_{p,CO_2} = 1456\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ reportado por Maass & Barnes (1926), a efusividade resulta em $\epsilon_{CO_2} = 419.3\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$. Assim, se o termopar medisse a temperatura de contacto resultante da interacção directa entre a neve carbónica e qualquer uma das superfícies usadas em trabalhos anteriores, e não a temperatura da superfície, o valor real estaria sujeito a um incremento da ordem de 1%, o que é desprezável.

Na situação em que o segundo material for uma película de vapor de CO_2 gerada por sublimação, a efusividade teria um valor inferior ao caso do estado sólido, pelo que o incremento a que o valor real estaria sujeito seria ainda mais pequeno. Conclui-se, deste modo, que no caso das experiências realizadas para quantificar a transferência de calor por convecção forçada com mudança de fase da neve carbónica (ou gelo seco), a temperatura medida pelo termopar de superfície seria, na prática, o valor real, não sendo afectada pela temperatura de contacto derivada de fenómenos térmicos interfaciais.

1.1.2. Comparação das metodologias de caracterização da temperatura da superfície

Em Bernardo (2016) a medição dos fluxos de calor foram conseguidas com recurso a termopares SA1XL do tipo K da Omega, que permitem obter tempos de resposta na ordem dos 150 *ms*, numa gama de temperaturas que varia de -270°C até 1372°C . Este tipo de termopares é constituído por um fio de Cromel e um de Alumel unidos em uma das extremidades. Quando se verifica uma diferença de temperatura entre as duas junções, forma-se uma força electromotriz cuja tensão varia com a temperatura.

A estratégia passava por colocar quatro termopares na superfície da placa, distanciados entre si 33.3 *mm* segundo a diagonal da placa. O pressuposto era o de que a área de contacto do jacto com a placa englobaria todos os termopares e que a condição inicial para a temperatura de toda a placa era a de uniformidade na sua distribuição. Com base na evolução da temperatura da superfície ($T_s(t)$) seria possível medir os flu-

xos de calor de acordo com a metodologia de Panão *et al.* (2018) e, assim, estimar o valor médio do coeficiente de convecção pela Lei de Newton.

Em Brandão (2017) e Marques (2018), a metodologia de medição das temperaturas recorreu a sete sondas termopares KMTXL-IM075U-150 do tipo K da Omega, que permitem obter tempos de resposta na ordem dos 100 *ms*. Nestas sondas, os dois fios de Cromel e Alumel encontram-se no interior de um tubo metálico, isolados entre si e entre o tubo metálico, por forma a que a medição seja apenas realizada na extremidade da sonda.

A estratégia passou por introduzir sete termopares na superfície a partir da fronteira oposta à superfície de impacto através de um furo de 3 *mm* que se reduzia para 1 *mm* com a ponta à distância de $l_s = 0.3$ *mm* da superfície de impacto e alinhados com o centro geométrico da placa.

O objectivo desta abordagem era o de obter valores para a temperatura da superfície a partir da evolução da temperatura a uma pequena profundidade. Deste modo, não haveria risco do sensor afectar o escoamento, como aconteceu em casos pontuais reportados em Bernardo (2016). A metodologia envolvia uma análise prévia ao número de Biot - $Bi = \frac{hl_s}{k_s}$ - que relaciona a resistência térmica à condução na placa com a resistência térmica à convecção na superfície. Se $Bi < 0.1$, considera-se que a temperatura em l_s será apenas uma função do tempo, distribuindo-se uniformemente pela espessura. Nesse caso, poder-se-ia tomar a temperatura medida como a que ocorre à superfície - $T(l_s, t) \approx T(0, t)$.

Para além da análise de Biot, importa, também, verificar se a escala de tempo decorrente entre o momento em que uma perturbação ocorre à superfície até que a temperatura em $T(l_s, t)$ comece a ser afectada por essa perturbação - $\tau_s = \frac{l_s^2}{\alpha_s}$. Ora, a escala τ_s deveria ser inferior à escala de tempo associada ao sistema de aquisição de temperatura obtida como o inverso da frequência definida na placa de aquisição - $\tau_{aq} = 1/f_{aq}$. No caso das placas usadas em trabalhos anteriores, $\tau_s(ENAW5083) = 1.8$ *ms*, $\tau_s(CK45) = 6.5$ *ms*. A escala de tempo do sistema de aquisição, considerando que a taxa máxima de aquisição (600 Hz) é igualmente distribuída pelo 7 termopares usados, resulta em $\tau_{aq} = 11.7$ *ms*. Logo, como τ_s para ambas as placas são inferiores à escala τ_{aq} do sistema de aquisição, quando for adquirido um dado de temperatura, qualquer perturbação ocorrida à superfície já atingiu ao ponto de medida do termopar embutido

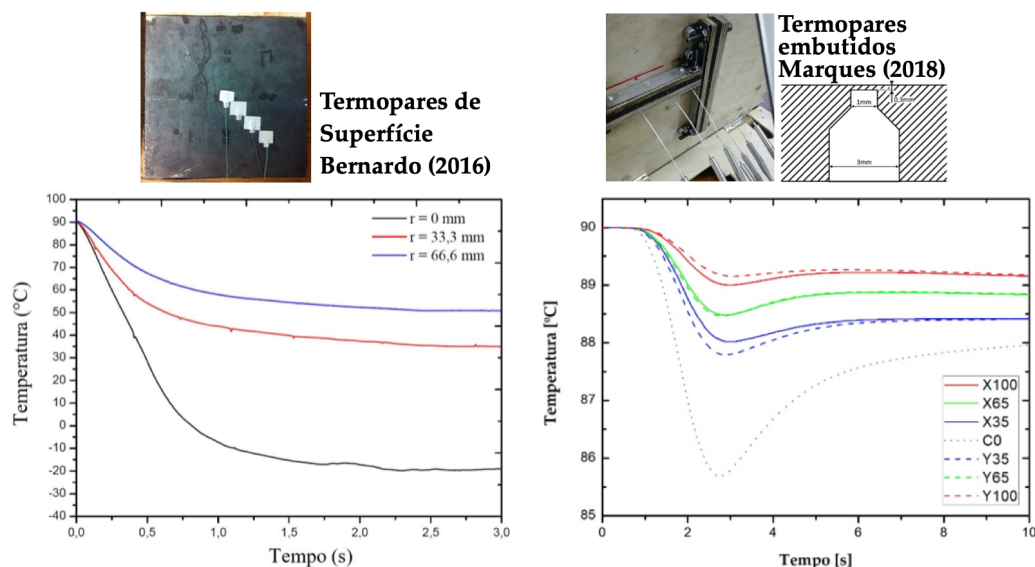


Figura 1.1: Evolução da temperatura obtida nos trabalhos de Bernardo (2016) com termopares de superfície (esquerda) e em Marques (2018) com sondas termopar embutidas na placa com a junção à distância de 0.3 mm da superfície de impacto (direita).

na placa.

As duas metodologias utilizadas para o cálculo dos coeficientes de convecção instantâneo produziram resultados bastantes distintos quando comparados entre si. A Figura 1.1 reporta aos resultados obtidos com as diferentes metodologias em termos da evolução da temperatura. A distância de impacto é a mesma e, muito embora o caudal em Bernardo (2016) seja 37% superior ao usado por Marques (2018), a diferença na ordem de grandeza dos valores obtidos para o arrefecimento é significativa.

Devido a esta diferença de valores medidos para as temperaturas de superfície, o estudo realizado por Bernardo (2016) onde se utilizaram quatro termopares de superfície, resultou num coeficiente de convecção médio máximo de $2700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$. Já em Brandão (2017) e Marques (2018) onde se utilizaram as 7 sondas termopares introduzidas na placa, os coeficientes de convecção médios máximos obtidos situam-se na gama $40 - 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$, ou seja, uma ordem de grandeza inferiores. Estas diferenças significativas abrem a questão de investigação sobre a adequação das metodologias utilizadas na caracterização do comportamento térmico da superfície aquando do impacto do spray de partículas de CO_2 . Daí que nesta dissertação seja explorada uma terceira metodologia com termopares de filme-fino.

1.1.3. Termopares de filme-fino

Os termopares de filme-fino são sensores recentemente introduzidos Heichal *et al.* (2005). Em aplicações de engenharia é frequentemente necessário determinar a variação de temperatura em superfícies expostas a um fluxo de calor cuja evolução ocorre em pequenas escalas de tempo. Posto isto, é essencial que o sensor de temperatura tenha um tempo de resposta de poucos micro-segundos. Uma vez que as várias alternativas disponíveis no mercado, como os pirómetros e outros termopares, têm várias limitações ao nível do tempo de resposta e da alteração das propriedades térmicas do material em estudo, em Heichal *et al.* (2005), foi proposto o desenvolvimento de um termopar de filme-fino que permitisse medir rápidas variações de temperatura após o impacto de gotas de alumínio líquido, com um tempo de resposta inferior a $1\mu s$, que pudesse ser implementado tanto em superfícies planas como em superfícies rugosas e que fosse fácil de construir e reparar.

Os termopares de filme-fino têm a particularidade de utilizar como um dos materiais, o mesmo do substrato, e como segundo material diversos tipos de ligas actualmente usadas nos termopares padronizados como, por exemplo, fios de liga cobre-níquel, material comumente designado por Constantan. Porém, o facto de não serem par de ligas metálicas padronizados, a junção de referência é mergulhada num banho de gelo a $0^{\circ}C$. Exemplos de utilização deste tipo de termopares de filme-fino encontramos em Díaz & Ortega (2013) para estudar o impacto de gotas de água transportadas por um fluxo de gás sobre uma superfície aquecida, ou em Mitsutake *et al.* (2015) para estudar o fenómeno de ebulição transiente após o impacto de uma gota de etanol numa superfície de níquel previamente aquecida, com a quantificação dos fluxos de calor a ser conseguida recorrendo a termopares de filme-fino construídos e calibrados pelos respectivos autores.

Com base na Figura 1.2, podemos verificar que o termopar de filme-fino proposto Heichal *et al.* (2005) é constituído por um fio de Constantan inserido num furo passante feito no substrato, e fixo com auxílio a uma pasta de cimento cerâmico. Um pequeno filme de tinta de prata é colocado na superfície do substrato permitindo a ligação eléctrica e térmica entre o fio de Constantan e o substrato, perfazendo, assim, a junção que realizará a medição da temperatura da superfície. A partir do substrato, um fio do mesmo material é unido na extremidade oposta à junção ao fio de Constan-

tan, servindo esta de referência quando mergulhada num banho de gelo a 0°C. No caso do fio de Constantan, uma parte vai da junção à superfície até à placa de aquisição da voltagem proveniente da força electromotriz gerada pelo efeito de Seebeck, princípio físico subjacente ao funcionamento de um termopar, enquanto uma segunda parte vai da placa de aquisição de dados até à junção de referência mergulhada no banho de gelo.

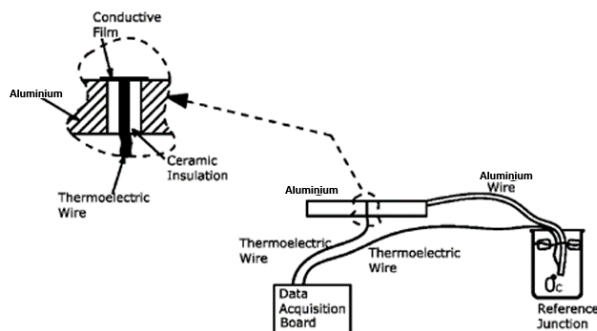


Figura 1.2: Esquema de um termopar de filme-fino [Adaptado de Heichal *et al.* (2005)]

Um dos desafios deste tipo de termopares prende-se com a obtenção de um fio do mesmo material da placa que é mergulhado no banho de gelo. Uma das formas de obter um fio uniforme que saia directamente da placa de alumínio, seria recorrer a uma aplaina e ou com uma fresa, devido à inexistência de fios para cada tipo de material. Porém, quando essa extracção se inviabiliza, a alternativa passa por encontrar um fio de um material com semelhantes propriedades termo-eléctricas. Por exemplo, no presente trabalho, usou-se um fio de alumínio 5356 ligado directamente à placa, dado que, as propriedades físicas do alumínio 5356 e do alumínio 5083 são bastante semelhantes, nomeadamente as suas resistências eléctricas e térmicas. A tabela 1.1 representa a comparação das propriedades físicas entre o alumínio 5356 e do alumínio 5083.

Tabela 1.1: Propriedades termofísicas do Alumínio 5083 e 5356.

	Alumínio 5083	Alumínio 5356
Condutibilidade Térmica	$121W \cdot m^{-1}K^{-1}$	$116W \cdot m^{-1}K^{-1}$
Condutibilidade Eléctrica	$5.950 \cdot 10^{-8}\Omega.m$	$5.940 \cdot 10^{-8}\Omega.m$

1.2. Objetivos

Devidos às diferenças significativas observadas na caracterização da temperatura da superfície, sob condições experimentais semelhantes, a presente dissertação propõe-se a:

- avaliar as metodologias usadas anteriormente, e avaliar a possível origem das diferenças;
- explorar a implementação de termopares de filme-fino, incluindo:
 - a construção dos termopares de filme-fino;
 - a calibração dos novos termopares;
 - aferição das limitações na sua construção;
- e, por fim, realização de testes preliminares para comparar diferentes metodologias de caracterização da temperatura de superfície.

2 Metodologia Experimental

O trabalho experimental elaborado em laboratório teve como objectivo avaliar as metodologias anteriores utilizadas na obtenção dos fluxos de calor, analisar e perceber as diferenças observadas na caracterização da temperatura de uma superfície, assim como propor o melhor método a utilizar quando se pretende fazer uma análise à temperatura de uma superfície.

O presente capítulo conta com uma descrição dos principais constituintes da instalação experimental, com destaque para os instrumentos de medição de temperatura, e numa fase final são apresentadas as rectas de calibração obtidas para todos os sensores utilizados.

A placa onde os testes se realizam é em Alumínio EN AW 5083, com $300 \times 300 \text{ mm}^2$ como resultado do estudo feito por Marques (2018) que concluiu que esta seria a melhor opção.

Por forma a ser possível medir e analisar diferentes métodos de medição de temperatura, foi implementado um termopar de superfície, uma sonda termopar num furo no interior da placa, ficando a 300μ da superfície da placa, por forma a garantir um número de *Biot* inferior a 0.1. Um termopar de filme-fino foi construído na placa, que tem como característica uma elevada velocidade de resposta e precisão, dado que a junção de referência é constituída por um fio do mesmo material do substrato, mergulhado num banho de gelo a 0°C .

A instalação experimental pode ser vista na figura 2.1.

2.1. Placa de ensaio

A escolha da melhor placa para realizar os testes foi feita com base no estudo realizado por Marques (2018), que teve como base a análise da variação de temperatura e o conseqüente cálculo dos fluxos de calor de três placas de alumínio com espessuras



Figura 2.1: Placa de Alumínio com $300 \times 300 \text{ mm}^2$.

de 10, 15 e 20 mm, e uma placa de aço CK45 com espessura de 20 mm, todas com uma superfície com $300 \times 300 \text{ mm}^2$.

Conclui-se que a melhor opção passa por uma placa de alumínio, pois como a difusibilidade térmica do aço é menor quando comparada com a difusibilidade térmica do alumínio, o que se traduz numa menor capacidade do aço em não acumular calor. Em termos de efeito da espessura da placa, Marques (2018) concluiu que quanto maior for a espessura da placa, maior será a tendência para a placa recuperar calor. Os pontos distanciados a uma distância superior a 35mm do centro da placa, apresentam uma variação de temperatura menor que quando comparados com os pontos mais próximos do centro da placa.

Então a placa seleccionada é uma placa de alumínio EN AW 5083 de superfície quadrada com $300 \times 300 \text{ mm}^2$ e 15 mm de espessura, representada na figura 2.1. As características termofísicas desta placa foram retiradas da dissertação de Bernardo (2016) e encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades termofísicas do alumínio EN AW 5083 a 293.15 K

Propriedade física	Valor
Condutibilidade térmica, k	$117W \cdot m^{-1}K^{-1}$
Calor específico, C_p a 35°C	$900J \cdot kg^{-1}K^{-1}$
Massa volúmica, ρ	$2660kg/m^3$
Difusibilidade térmica, α	$48,87 \cdot 10^{-6}m^2/s$

2.2. Instrumentação e medida

Este capítulo contempla uma descrição dos três métodos de medição da variação de temperatura, com um termopar de superfície e um termopar de filme fino.

2.2.1. Medição de temperatura

O posicionamento dos termopares passa por colocar um termopar de filme-fino no centro da placa, imediatamente próximo deste um termopar de superfície, e uma sonda termopar no interior da placa como se pode observar pela figura 2.2. O tempo de resposta dos termopares foi calculado com base no tempo que estes demoram a atingir 63.2% do valor final, após uma mudança súbita de temperatura.

Termopar de superfície

Um dos métodos de medição da temperatura superficial da placa, recorre à colocação de um termopar de superfície SA1XL da *Omega* (figura 2.3), do tipo K (cromel/Alumel), junto do termopar de filme-fino. Segundo o fabricante estes termopares podem ser utilizados numa gama de temperatura que varia de -270°C até 1372°C, com tempos de resposta inferiores a 150 ms.

A tabela 2.2 descreve as propriedades termofísicas dos dois materiais de que o termopar é constituído, Alumel e Cromel.

A aquisição e tratamento dos valores de temperatura são conseguidos com a ligação deste termopar a um *data logger* Dt9828 (figura 2.4), da Data Translation, através do *software* QuickDaq, fornecido pelo fabricante. Este equipamento tem 8 entradas analógicas para termopares (tipo B,E,J,K,N,R,S,T) com uma precisão de $\pm 0.05^\circ C$ a 25 °C e de $0.1K$ e para medição de tensão. Possibilita uma taxa de leitura de 600



Figura 2.2: Termopar de superfície e termopar de filme-fino na placa de Alumínio.



Figura 2.3: Termopar de superfície.

Tabela 2.2: Propriedades termofísicas do Cromel e Alumel que constituem os termopares

	Alumel	Cromel
Condutibilidade térmica, k	$29.7W \cdot m^{-1}K^{-1}$	$19.2W \cdot m^{-1}K^{-1}$
Calor específico, $\{C_p\}$	$523.25J \cdot kg^{-1}K^{-1}$	$447.9J \cdot kg^{-1}K^{-1}$
Massa volúmica, ρ	$8600kg/m^3$	$8730kg/m^3$

amostras por segundo com tempos de resposta inferiores a 100 ms. Possui também um isolamento galvânico de 500 V do computador.

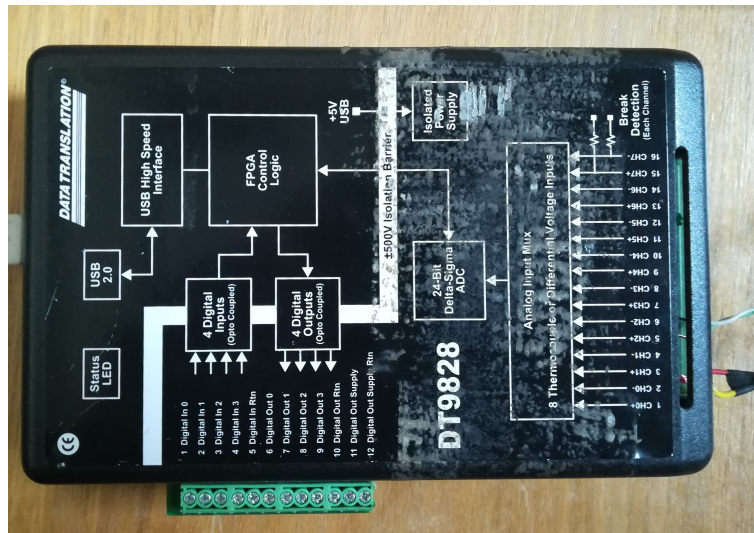


Figura 2.4: Data Logger Dt9828.

Termopar de introduzido na placa

Outro dos métodos de medição de temperatura passa pela implementação de uma sonda termopar KMTXL-IM075U-150 do tipo K (2.2), da Omega. Estes termopares têm como particularidade de os dois fios de Cromel e de Alumel, estarem inseridos num tubo metálico de 0.75 mm, isolados por forma a que apenas sejam medidos os valores na extremidade da sonda. Estas sondas são introduzidas num furo na placa até cerca de 300 μm da superfície. Podem ser utilizados numa gama de temperaturas que variam de -200°C a 1250°C , com tempos de resposta inferiores a 100 ms e precisão de 0.09°C a 25°C .

Para estes termopares a aquisição e tratamento de dados também será através do

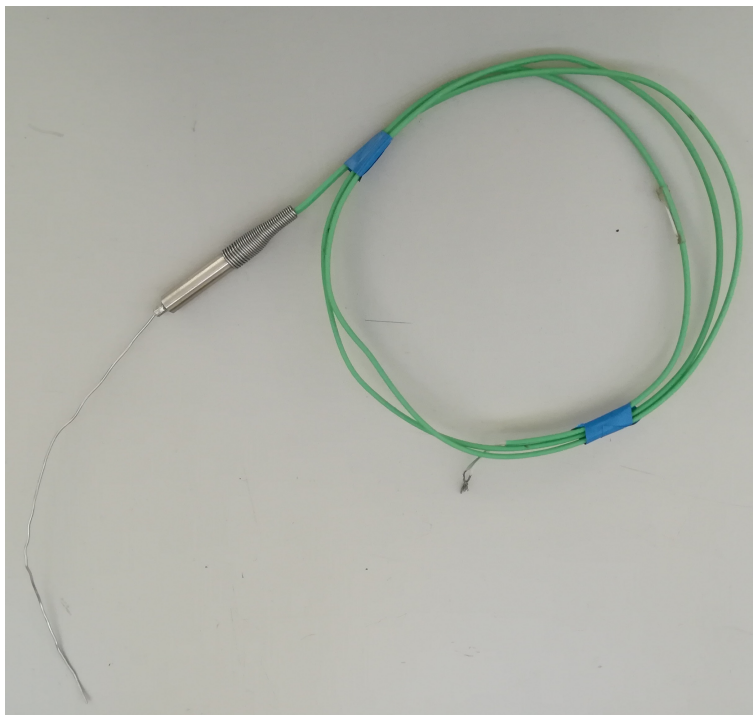


Figura 2.5: Sonda termopar introduzida na placa

data logger Dt9828, da Data Translation.

Termopar de Filme-Fino

O termopar de filme-fino possibilita a sua implementação tanto em superfícies planas como em superfícies rugosas, relativamente fácil de construir e reparar. Estes termopares tem como principal característica medir rápidas variações de temperatura com um tempo de resposta inferior a 1μ .

Numa primeira fase, uma das extremidades deste termopar é constituído por um fio de Constantan com 0.25 mm de diâmetro, inserido no interior de um furo passante com 3 mm na placa (figura 2.6). Numa segunda fase, por forma a obter um filme de prata mais pequeno para uma melhor ligação eléctrica entre o fio de constantan e a placa, o fio eléctrico é inserido num furo passante, com um primeiro orifício de 3 mm de diâmetro, um segundo orifício com 1 mm e um de 0.7 mm nos $300\ \mu\text{m}$ até à superfície da placa. Por forma a garantir que o fio fica isolado da placa, utilizou-se um cimento de alta temperatura OMEGABOND 700, da *Omega*, no interior do furo com o auxílio de uma seringa, forçando o fio eléctrico a passar no furo, deixando cerca de 2 mm de fio acima da superfície. O enchimento do furo com a pasta cerâmica fez-se pela superfície inferior da placa por forma a garantir que o cimento envolve todo o fio de constantan,

uma vez que o diâmetro do furo diminui até à superfície da placa. Após o cimento secar por pelo menos 20h, a superfície da placa foi polida com recurso a uma lixa (80 grit), por forma a remover o excesso de cimento e conseguir uma superfície uniforme.

Um dos desafios da construção deste tipo de termopares prende-se com o facto de ser necessário garantir que o fio eléctrico que atravessa o furo na placa, esteja completamente isolado da mesma com nenhum ponto de contacto. Naturalmente, esta dificuldade aumenta com o diminuir do furo, como é o caso do termopar com um furo superficial de 0,7 mm.

Na figura 2.6 pode-se verificar o fio de constantan inserido no furo e fixo com o cimento já endurecido.



Figura 2.6: Vista superior da placa com o fio de constantan fixo pelo cimento.

Após 24h a secar à temperatura ambiente, procedeu-se à cura do cimento numa estufa da *Viara-Comercial* (figura 2.7), a 82 °C durante 4 horas e a 104 °C durante 4 horas, segundo as recomendações do fabricante uma vez que o cimento irá ser posto a uma temperatura alta, na ordem dos 90°C.

Na superfície superior um muito fino filme de prata, da XeredEx, é colocado por forma a criar uma ligação eléctrica entre o fio de Constantan e a placa. A figura



Figura 2.7: Estufa utilizada na cura.

2.8 mostra o filme de prata no termopar com o furo superficial de $3mm$, enquanto que a figura 2.9 representa o filme de prata posicionado na superfície do termopar de filme-fino com $0,7mm$.



Figura 2.8: Filme de tinta de prata no termopar de filme-fino de $3mm$ de diâmetro.

Devido à impossibilidade na obtenção de um fio de alumínio 5083, utilizou-se um fio



Figura 2.9: Filme de tinta de prata no termopar de filme-fino de 0,7mm de diâmetro.

de 5356 com 1mm de diâmetro, uma vez que as propriedades eléctricas e térmicas são bastante semelhantes, como se pode observar na tabela 1.1. Com este efeito, realizou-se um furo com 1.3mm de diâmetro directamente na placa, introduzindo o fio de alumínio no mesmo, e com o auxílio de um punção deforma-se o furo por forma a criar uma ligação entre este e a placa.

Então, outra extremidade do termopar é composta por um fio de Alumínio 5356 (tabela 2.1), que sai directamente da placa (figura 2.10), e ligado a um banho de gelo a 0 °C.

Dentro do banho de gelo é enrolado um segundo fio de constantan na ponta do fio de alumínio (figura 2.11).

Os dois fios de constantan são então ligados a um *data logger* USB-6211 (figura 2.12, da National Instruments, com a recolha e análise dos valores em Matlab.



Figura 2.10: Fio de Alumínio ligado à placa.



Figura 2.11: Fio de Alumínio e constantan que ficam mergulhados no banho a 0°C.



Figura 2.12: *Data logger* USB-6211

Tabela 2.3: Resultados obtidos na calibração dos termopares.

Média das temperaturas obtidas pelos termopares [°C]	Temperatura do banho termostaticado [°C]						
	30	40	50	60	70	80	90
Termopar de Superfície	31,64	41,71	51,64	61,17	71,36	80,33	91,74
Sonda termopar	31,69	41,51	51,46	61,38	71,25	81,32	91,83

2.3. Calibração

2.3.1. Banho termostaticado de água agitada

Foi realizada a calibração do termopar de superfície e da sonda termopar que se introduz na placa até cerca de $300 \mu\text{m}$ da superfície, mergulhando-os num banho termostaticado de água agitada, adquirindo e registrando as temperaturas. Os termopares estão ligados a um *data logger* Dt9828, com a aquisição de temperatura a ser produzida em intervalos de 10 segundos durante 5 minutos, para vários níveis de temperatura (30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 °C).

A tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios da calibração dos termopares tipo-K utilizados.

A figura 2.13 e a figura 2.14 mostra respectivamente as rectas de calibração obtidas para o termopar de superfície e para a sonda termopar introduzida na placa.

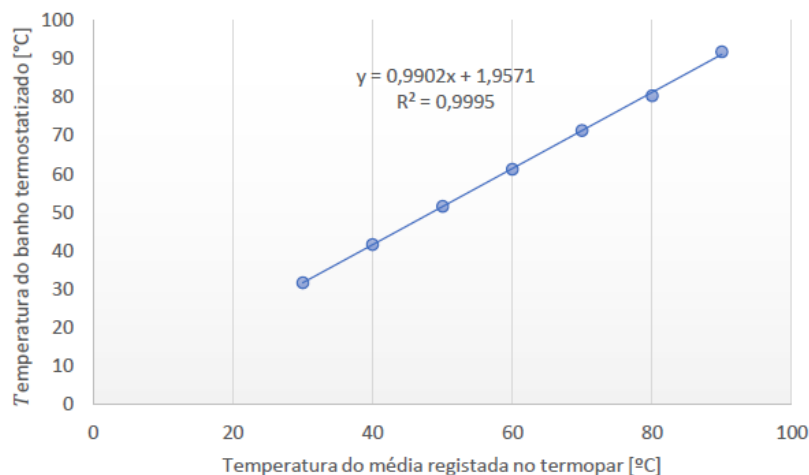


Figura 2.13: Reta de calibração do termopar de superfície.

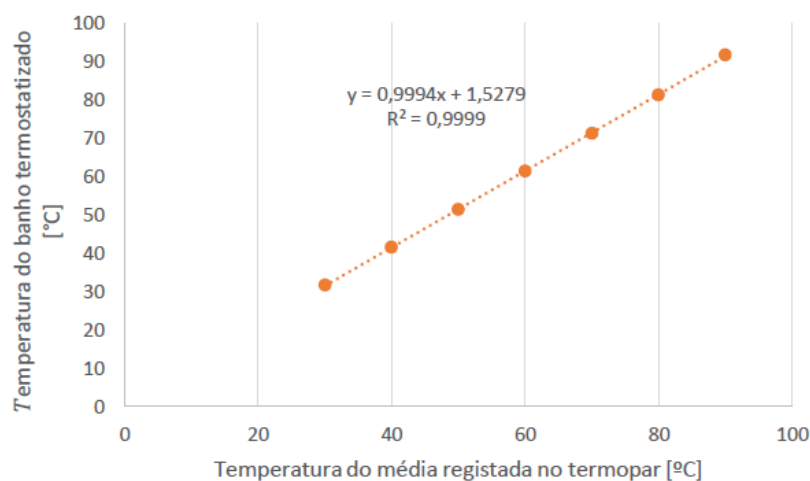


Figura 2.14: Reta de calibração da sonda termopar.

2.3.2. Estufa para calibração

A calibração do termopar de filme-fino foi realizada numa estufa da Viara-Comercial, introduzindo a placa no interior da estufa, com o fio de constantan que sai directamente da placa e o que sai do banho de gelo, conectados ao *data logger* USB-6211, e isolados a todo o comprimento com mangas isoladoras de borracha. A aquisição de temperatura foi produzida com uma amostra constante durante 2 minutos, para 7 níveis de temperatura, com a temperatura de referência retirada com um termopar de superfície. Isto é, para cada nível de temperatura obtida com o termopar de superfície, este corresponde a um valor de diferença de potencial medido no termopar de filme-fino.

A tabela 2.4 apresenta os valores de temperatura obtidos para a calibração do termopar de filme-fino introduzido no furo de 3mm de diâmetro.

Tabela 2.4: Resultados obtidos na calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.

Média das diferenças de potencial obtidas pelo termopar de filme-fino [V]	Temperatura da estufa para calibração [°C]						
	19,4	33	42.6	53.1	64.5	79.4	85
Termopar de Filme-Fino	0.154	0.242	0.380	0.509	0.632	0.784	0.85

A respectiva reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino está representada na figura 2.15.

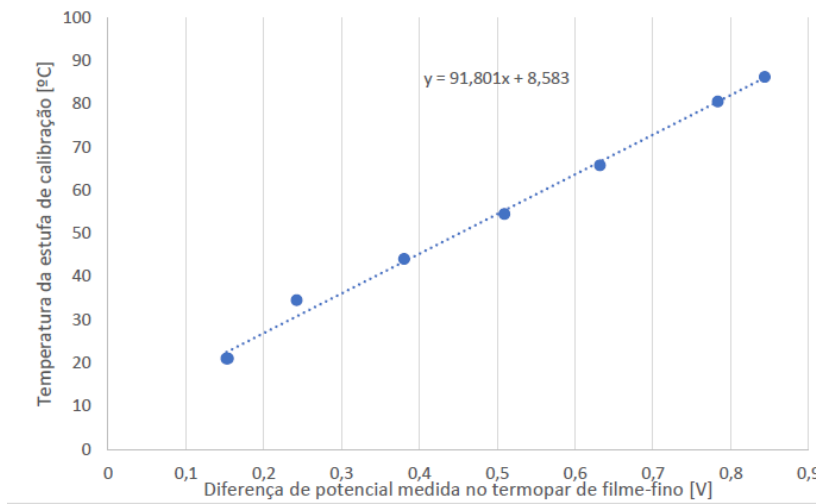


Figura 2.15: Reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.

Numa segunda fase, foi realizada a calibração do termopar de filme-fino com o fio de constantan introduzido num furo com um primeiro orifício de 3 mm de diâmetro, um segundo orifício com 1 mm e um de 0.7 mm nos 300 μm até à superfície da placa. As duas extremidades deste foram conectados à USB-6211, e isolados a todo o comprimento com mangas isoladoras de borracha. A aquisição de temperatura foi produzida com uma amostra constante durante 2 minutos, para 7 níveis de temperatura, com o mesmo método utilizado no termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.

A tabela 2.5 apresenta os valores de temperatura obtidos para a calibração do termopar de filme-fino.

A respectiva reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino está representada na figura 2.16.

Tabela 2.5: Resultados obtidos na calibração do termopar de filme-fino com 0.7mm de diâmetro.

Média das diferenças de potencial obtidas pelo termopar de filme-fino [V]	Temperatura da estufa para calibração [°C]			
	23,6	35,9	57	60,1
Termopar de Filme-Fino	0.023	0.064	0.315	0.368

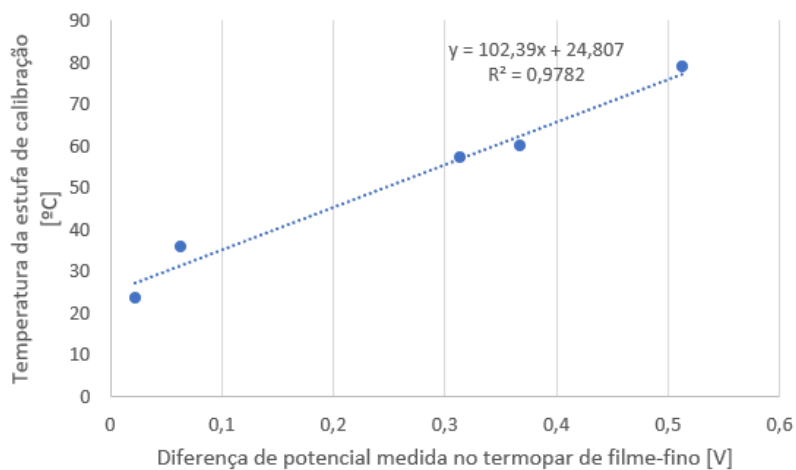


Figura 2.16: Reta de calibração obtida para o termopar de filme-fino com 0,7mm de diâmetro.

3 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados para as três metodologias experimentais utilizadas para melhor caracterizar a temperatura da superfície.

Inicialmente compararam-se as metodologias utilizadas em trabalhos anteriores, que recorriam a termopares de superfície e sonda termopares introduzidas no interior da placa, por forma a perceber se as discrepâncias observadas nos cálculos dos coeficientes de convecção nos trabalhos anteriores, era devido à forma de como os fluxos de calor eram medidos. Numa segunda fase compararam-se o termopar de filme-fino e o termopar de superfície, uma vez que as sondas termopares se revelaram não ser fiáveis quando se pretende fazer uma análise à temperatura superficial pelo mesmo método utilizados nos trabalhos anteriores. O tempo de resposta dos termopares foi calculado com base no tempo que estes demoram a atingir 63.2% do valor final, após uma mudança súbita de temperatura.

Numa última fase procura-se discutir e enumerar as várias limitações na construção e implementação dos termopares de filme-fino.

3.1. Temperaturas obtidas no equipamentos de medição

Um dos objectivos principais desta dissertação prende-se com a necessidade de entender a razão pela qual se verificou uma grande disparidade nos resultados obtidos no cálculo dos coeficientes de convecção na dissertação de Marques (2018) e Barbosa (2017), em que a medição das temperaturas foi obtida com recurso a sondas termopares introduzidas na placa, e a dissertação de Bernardo (2016), que realizou os ensaios com termopares de superfície colocados parte superior da placa. Uma vez que nas duas dissertações, os métodos de recolha das temperaturas foram distintos, pode-se

concluir que as disparidades observadas podem estar relacionadas com os instrumentos de medição utilizados. Por essa razão introduziu-se um terceiro método de obtenção dos fluxos de calor, que consiste na construção de um termopar de filme-fino, uma vez que este teoricamente oferece uma melhor fiabilidade e qualidade nos resultados.

3.1.1. Ensaio com termopar de superfície e sonda termopar

Numa fase inicial realizaram-se ensaios apenas com o termopar de superfície e com a sonda termopar por forma a perceber por que razão se verificou uma disparidade nos resultados obtidos.

Durante a calibração dos dois equipamentos foi possível observar que o termopar de superfície tinha um tempo de resposta inferior à sonda termopar, embora os resultados das temperaturas medidas nos dois equipamentos sejam semelhantes quando sujeitos a uma temperatura constante, isso já não se verifica quando se pretende medir súbitas variações de temperatura num espaço de tempo muito curto.

Então no centro da placa foi colocado um termopar de superfície e uma sonda termopar num furo também no centro geométrico da placa, aquece-se a placa até cerca de 90 °C, e após a temperatura estabilizar, faz-se uma descarga de 1 segundo com o spray de neve carbónica.

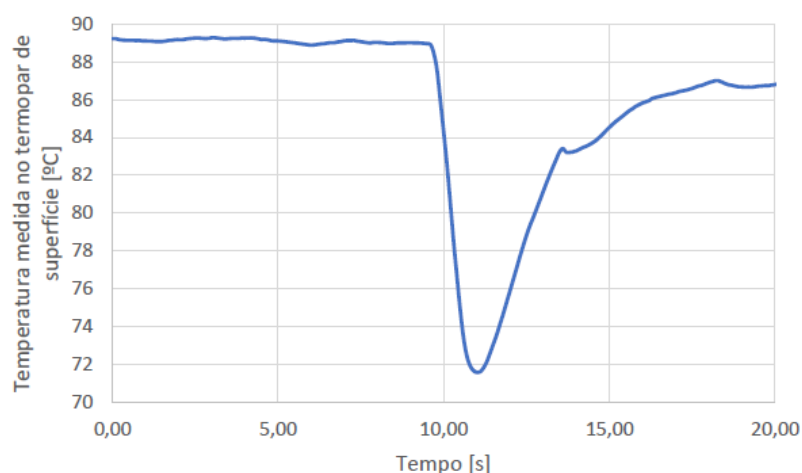


Figura 3.1: Perfil de temperaturas para termopar de superfície.

Com a análise da figura 3.1 e da figura 3.2 é possível observar que a temperatura se encontra estável durante 10s, sofrendo uma diminuição no instante seguinte devido ao embate do jato de partículas de neve carbónica. Essa diminuição é substancialmente

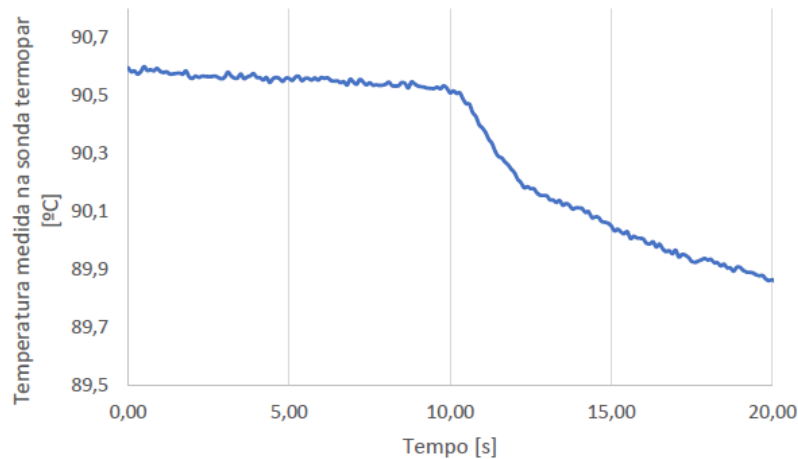


Figura 3.2: Perfil de temperaturas para a sonda termopar.

maior no termopar de superfície, atingindo uma temperatura mínima de 71.58°C , enquanto que a sonda termopar introduzida na placa atinge uma temperatura mínima de 89.74°C .

Numa segunda fase a experiência consistiu por colocar um termopar de superfície junto de uma sonda termopar na superfície da placa, e uma sonda introduzida na placa no furo imediatamente subjacente aos dois termopares. O objectivo desta experiência passa por comparar a evolução da temperatura para o caso de utilizar uma sonda termopar e um termopar de superfície numa situação em que estes entram em contacto directo com uma fonte de calor que, que ronda os 35°C , e uma sonda termopar, segundo a metodologia utilizada por Marques (2018) e Barbosa (2017), introduzida num furo da placa até cerca de $300\mu\text{m}$ da superfície.

A evolução dos fluxos de calor com o decorrer da experiência estão representados na figura 3.3.

Como se pode observar a evolução dos dois termopares posicionados na superfície são relativamente semelhantes, ao contrário da sonda termopar introduzida na placa que apresenta uma variação praticamente nula quando sujeita à mesma condição.

É então possível concluir que esta diferença poderá estar relacionada com o facto que a distância a que a sonda termopar é posicionada no interior de um furo da placa a $300\mu\text{m}$ da superfície, não ser suficiente para vencer a resistência térmica entre o termopar e a superfície da placa.

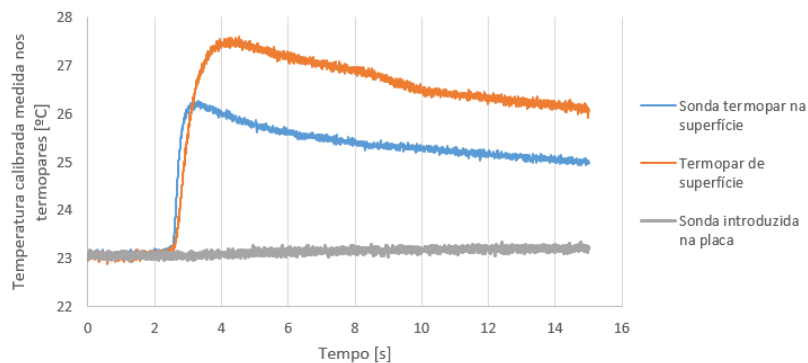


Figura 3.3: Perfil de temperaturas para duas a sondas termopar e termopar de superfície.

3.1.2. Ensaio com termopar de filme-fino

Uma vez que se concluiu que a metodologia utilizada para a sonda termopar poderá não ser a mais indicada para medir a temperatura de uma superfície, os testes que se seguem foram realizados com apenas com um termopar de filme-fino e um termopar de superfície quando sujeitos a uma variação de temperatura causada por uma fonte de calor a 35°C.

Ensaio com termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro

Numa primeira fase foram realizados testes com o termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro e um termopar de superfície colocado imediatamente próximo deste. A figura 3.4 representa a comparação da evolução da temperatura dos dois termopares quando sujeitos a uma perturbação de cerca de 29 °C.

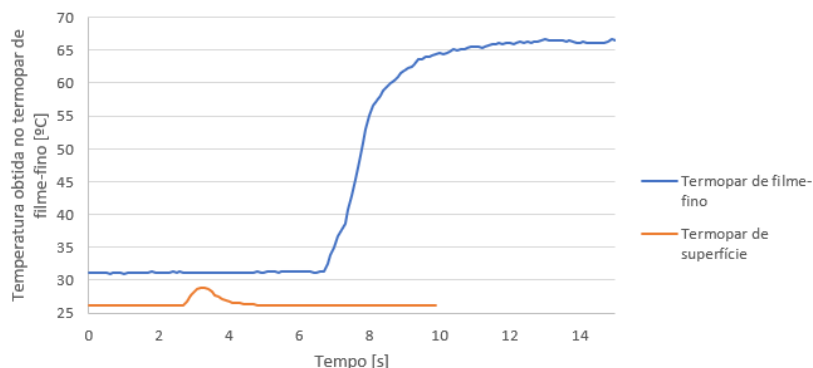


Figura 3.4: Teste com termopar de filme-fino com 3mm.

Como se pode observar pela figura, os valores calibrados de temperatura no termo-

par de filme-fino estão muito longe dos valores que seriam de esperar, uma vez que, a temperatura máxima obtida no termopar de superfície ronda os 29°C, valor próximo do esperado, enquanto que no termopar de filme-fino o valor máximo obtido foi de 65°C. O tempo de resposta deste termopar também está bastante longe do esperado, uma vez que teoricamente este tipo de termopares têm tempos de resposta na ordem dos $1\mu m$, este apresenta um tempo de resposta superior a 2 segundos.

Dado que estes termopares são bastante sensíveis, uma vez que só algum do material que o constitui está completamente isolado do exterior, é necessário reparar estes equipamentos bastantes vezes. Após cada reparação, procedeu-se à calibração do mesmo, onde se observou que os valores obtidos para a calibração do mesmo equipamento, diferiam sempre entre si, como se pode verificar no apêndice 4.

Ensaio com termopar de filme-fino com 0.7mm de diâmetro

Após várias construções experiências, e dado que os resultados produzidos tanto em termos valores da calibração, como de variação de temperatura e em termos de tempo de resposta foram extremamente diferentes dos resultados que seriam esperados, a estratégia passou por diminuir o tamanho do orifício superficial do furo, por forma a facilitar a ligação eléctrica entre o fio de constantan e a placa.

A construção destes termopares é bastante mais complexa, uma vez que o furo nos últimos $300\mu m$ antes da superfície da placa apresenta um diâmetro de 0,7 mm, torna-se uma tarefa relativamente árdua garantir que o fio de constantan atravessa todo o furo sem tocar em nenhum ponto da placa, principalmente no último orifício imediatamente anterior à superfície.

A metodologia experimental teve como base sujeitar um termopar de filme-fino com 0,7 mm de diâmetro e um termopar de superfície a uma igual variação de temperatura, analisando e comparando os resultados obtidos. Os ensaios dizem respeito a três diferentes construções de um termopar de filme-fino, uma vez que após a calibração e os ensaios o termopares deixaram de funcionar tendo de se proceder à reparação dos mesmos, dos quais se conseguiu obter os mesmos valores para a recta de calibração (2.16, mas diferentes comportamentos.

Num primeiro ensaio (figura 3.5 os dois termopares foram sujeitos a uma igual variação de temperatura 4s após o início do teste, obtendo-se um valor máximo de tem-

peratura de 28.89 °C e um tempo de resposta de 0.316s para o termopar de superfície. No caso do termopar de filme-fino a temperatura máxima obtida ronda aproximadamente 36.23°C, com um tempo de resposta de 0.81s. É possível também observar que o termopar de superfície retorna rapidamente aos valores iniciais após a variação de temperatura, enquanto que no caso do termopar de filme-fino este nunca recupera os valores iniciais de temperatura, embora o seu tempo de resposta após se retirar a fonte de calor seja semelhante ao do anterior.

É possível também observar que após 5,4s do início do ensaio, ainda durante o contacto com a fonte de calor, o termopar sofre uma diminuição súbita de temperatura, que poderá ter sido como consequência de uma vez que os fios que o constituem são relativamente longos, estes podem actuar como antenas e como consequência reagirem a interferências electromagnéticas e a radiofrequências.

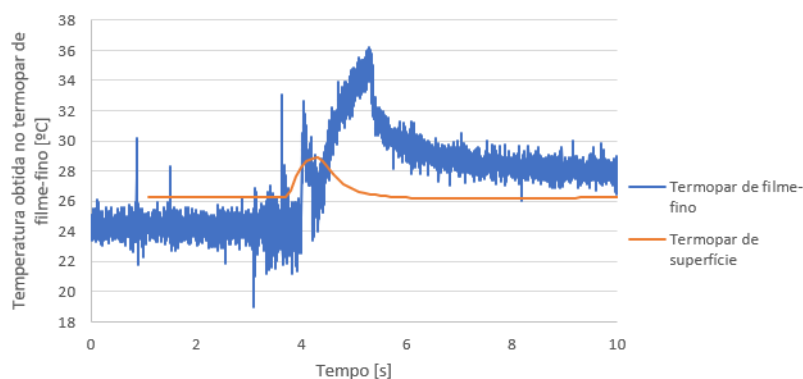


Figura 3.5: Teste 1 com termopar de filme-fino com 0.7mm.

Numa segunda fase (figura 3.6 chegou-se a um valor máximo de temperatura de 29,1 °C e um tempo de resposta de 0.35s para o termopar de superfície enquanto que com o termopar de filme-fino a temperatura máxima obtida ronda aproximadamente 36.67°C, com um tempo de resposta de 1.02s. Embora no presente teste o termopar apresente um aumento de temperatura linear, o seu tempo de resposta é substancialmente mais elevado que o anterior, o que poderá ter sido influenciado por um filme de tinta de prata mais deficiente. Uma vez que a fonte de calor ronda os 35°C o termopar de filme-fino foi o que melhor se aproximou do valor esperado. Neste caso o sensor também não recupera os valores de temperatura que se obtinham na fase anterior ao ensaio.

De todos os termopares construídos, calibrados e testados a figura 3.7 representa o melhor teste obtido em laboratório sendo que este foi o que mais se aproximou em

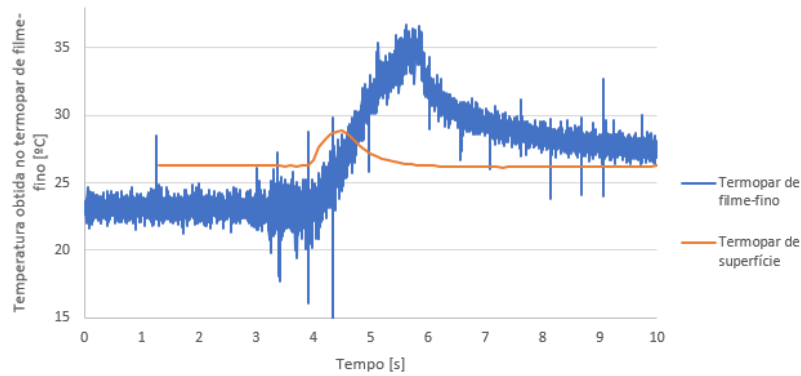


Figura 3.6: Teste 2 com termopar de filme-fino com 0.7mm.

termos de funcionamento daquilo que seria esperado com base nos artigos existentes. Desta forma o termopar de superfície apresentou um valor máximo de temperatura de 28.62 °C e um tempo de resposta de 0.373s para o termopar de superfície. No caso do termopar de filme-fino a temperatura máxima obtida foi de 36.37°C, com um tempo de resposta de 0.24s. É possível observar que no caso do termopar de filme-fino este recupera os valores de temperatura após o ensaio, semelhantes aos valores antes da interação com a fonte de calor. Foi possível verificar que neste caso o tempo de resposta obtido no termopar de filme-fino foi inferior ao do termopar de superfície, assim como o valor máximo de temperatura obtido com este sensor aproxima-se mais daquilo que era esperado.

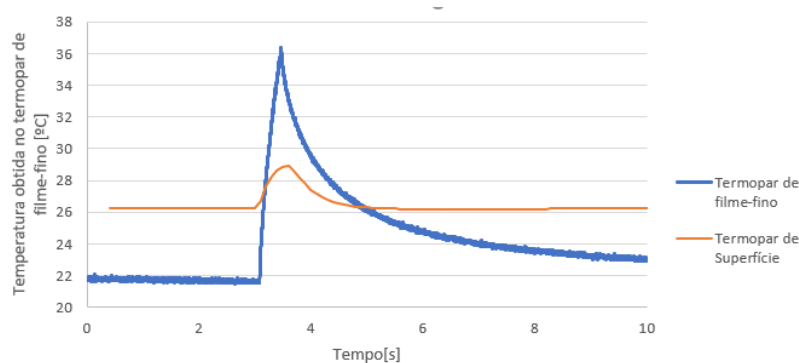


Figura 3.7: Teste 3 com termopar de filme-fino com 0.7mm.

3.2. Discussão das limitações do termopar de filme-fino

Uma das limitações identificadas na construção e implementação do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro no furo onde se introduz o fio de constantan, foi o facto

de que sempre que era necessário reparar o mesmo, os valores da calibração variavam, como se pode verificar pelos exemplos presentes no apêndice 4.

Outra das limitações observadas relaciona-se com a sensibilidade de quase todos os componentes que constituem estes termopares, uma vez que muitas vezes estes avariavam ainda durante a calibração. Estes como são bastante susceptíveis a avariar, leva a que sempre que é necessário proceder à reparação, também seja necessário voltar a calibrar o termopar para garantir que os valores são semelhantes.

Na figura 3.8 podemos verificar um exemplo do termopar de filme-fino a avariar durante o penúltimo ponto de calibração a 63°C. Durante 26s o termopar comportou-se como o esperado, com uma a diferença de potencial constante de cerca de 2,4 mV. Após 27s de teste, a voltagem começa subitamente a subir, chegando a um máximo de 69 mV, o que leva a querer que este partiu.

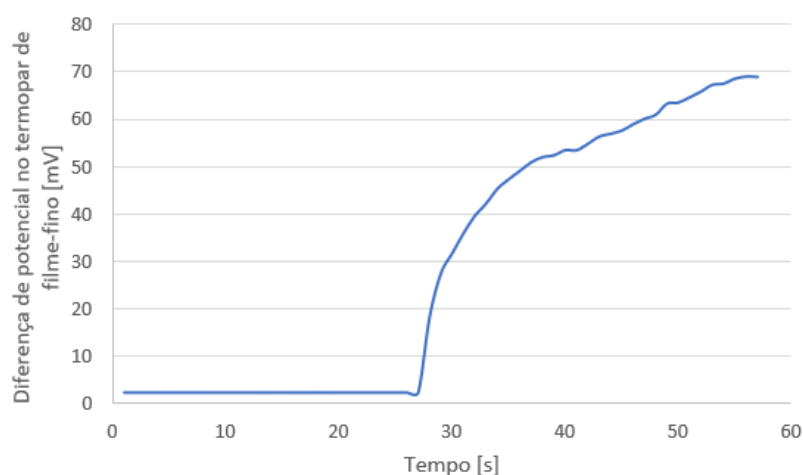


Figura 3.8: Exemplo de avaria durante a calibração do termopar de filme-fino a 63°C.

Esta situação em que o termopar avaria durante a calibração, é bastante comum, o que leva ao utilizador repetir todo o processo de construção e implementação um grande número de vezes, o que não favorece a sua utilização.

Outra limitação destes termopares está relacionada com o filme de tinta de prata que cria uma ligação eléctrica entre o fio de constantan e a placa de alumínio, isto pois, a espessura do filme de prata que ronda tipicamente entre 0.1 e 2 μm afecta o tempo de resposta do sensor, ou seja, se se colocar um filme com uma espessura muito elevada isto poderá levar a um incorrecto funcionamento do sensor.

Uma vez que o fio de alumínio que se introduz no banho de gelo foi ligado à placa por

contacto e não directamente maquinado da placa e ligado intrinsecamente à mesma, a recuperação dos valores das temperaturas para valores semelhantes aos que se obtinham antes do contacto com a fonte de calor, não teve a variação esperada, uma vez que estes dois valores se deviam igualar.

4 Notas conclusivas e trabalho futuro

O principal objectivo da presente dissertação consiste em avaliar e comparar diferentes métodos experimentais de quantificação dos fluxos de calor numa superfície. Nomeadamente, analisar e perceber as discrepâncias na aquisição das variações de temperatura, presentes em trabalhos anteriores, para o cálculo do coeficiente de transmissão de calor por convecção forçada com mudança de fase. As metodologias utilizadas previamente incluíam a implementação de termopares de superfície e sondas-termopar posicionadas no interior de uma placa, à distância de $300 \mu\text{m}$ da superfície. As experiências realizadas com as metodologias anteriores a funcionar em simultâneo evidenciaram a existência de uma resistência térmica nas sondas introduzidas no interior da placa, aumentando o tempo de resposta e diminuindo os valores extrapolados para a temperatura à superfície. Por outro lado, o facto dos termopares padronizados não serem constituídos pelo mesmo material do substrato, a medição da temperatura estará, sistematicamente, sujeita a uma resistência térmica que pode influenciar os resultados finais. Nesse sentido, implementou-se um termopar do tipo de filme-fino, que tem como um dos materiais constituintes uma liga metálica do mesmo material que o substrato. Segundo o que é reportado na literatura, este tipo de termopares permite tempos de resposta bastante mais baixos do que os termopares anteriormente referidos. Assim, um dos objectivos a que esta dissertação se propôs foi o de implementar e calibrar os termopares de filme fino, e realizar testes preliminares que permitam comparar com os termopares de superfície.

Em primeiro lugar, o facto dos termopares serem fabricados em laboratório, a calibração torna-se parte integrante de qualquer instalação laboratorial que os implemente. Porém, verificou-se que a junção obtida pelo filme fino de tinta de prata possui alguma fragilidade, pelo que será necessário aprofundar em estudos posteriores esse elemento.

Com os ensaios preliminares realizados, em que tanto os termopares de filme-fino, como os termopares de superfície foram sujeitos à mesma perturbação térmica induzida,

foi possível obter um termopar com um tempo de resposta de cerca de 0,24s, inferior aos termopares de superfície em que o menor tempo de resposta obtido foi de 0.316s. Em termos de precisão ao nível da obtenção das temperaturas foi possível chegar a uma temperatura mais próxima do que seria esperado (35°C) com o termopar de filme-fino, sendo que o valor obtido mais próximo do esperado foi de 36.23°C, ao contrário do termopar de superfície que o valor mais próximo rondou os 29,1 °C. No entanto estes termopares desenvolvidos em laboratório contam com algumas limitações ao nível da sua construção e do seu funcionamento. Foi então possível concluir que apesar dos termopares de filme-fino revelarem algumas limitações, a sua precisão no que diz respeito à medição de rápidas variações de temperatura, e o tempo de resposta obtidos, tornam a sua utilização bastante recomendada.

Sugestões de investigação

O presente estudo possibilitou a compreensão da implementação e análise de várias formas de medição dos fluxos de calor de uma superfície, nomeadamente dos termopares de filme-fino, dado que, uma vez que este é um conceito relativamente recente e permite obter valores de temperatura de superfície com tempos de resposta inferiores, quando comparados com termopares padronizados. Neste seguimento, são propostas algumas sugestões para futuras investigações:

- Construção, implementação e análise de um termopar de filme fino construído em aço;
- Estudo da influência de um do arrefecimento de um spray de dióxido de carbono, com recurso a termopares de filme-fino;
- Estudo da medição dos fluxos de calor numa superfície não metálica.

Bibliografia

- Barbosa, Mário. 2017. *Design de um difusor para spray de partículas de neve carbónica*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Bernardo, Mário. 2016. *Estudo experimental do arrefecimento com um jato de dióxido de carbono*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Brandão, Cláudio. 2017. *Arrefecimento de superfícies com jato de partículas de neve carbónica*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Díaz, AJ, & Ortega, A. 2013. Investigation of a gas-propelled liquid droplet impinging onto a heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **67**, 1181–1190.
- Heichal, Y, Chandra, S, & Bordatchev, E. 2005. A fast-response thin film thermocouple to measure rapid surface temperature changes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, 153–159.
- Maass, Otto, & Barnes, WH. 1926. Some thermal constants of solid and liquid carbon dioxide. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **111**(757), 224–244.
- Marques, Pedro. 2018. *Arrefecimento com sprays de neve carbónica: o efeito da inércia térmica*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Mitsutake, Y, Illias, S, Tsubaki, K, Hasan, MN, & Monde, M. 2015. Measurement and observation of elementary transition boiling process after sudden contact of liquid with hot surface. *Procedia Engineering*, **105**, 5–21.

- Panão, M. R. O., Costa, J. J., & Bernardo, M. 2018. Thermal assessment of sublimation cooling with dry-ice sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 518–526.
- Seki, M, Kawamura, H, & Sanokawa, K. 1978. Transient temperature profile of a hot wall due to an impinging liquid droplet.
- Sumarokov, VV, Stachowiak, P, & Jeżowski, A. 2003. Low-temperature thermal conductivity of solid carbon dioxide. *Low Temperature Physics*, **29**(5), 449–450.
- Wells, Gary, Ledesma-Aguilar, Rodrigo, McHale, Glen, & Sefiane, Khellil. 2015. A sublimation heat engine. *Nature Communications*, **6**(6290).

Apêndice A: Inclusão de Imagens

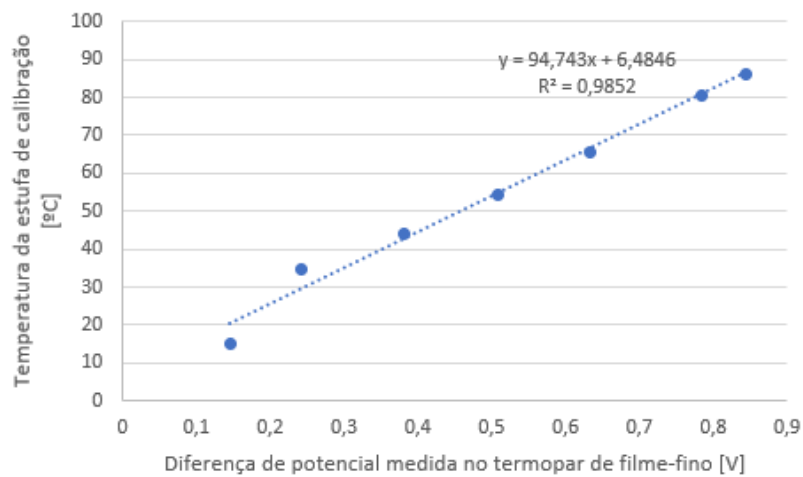


Figura 1: Exemplo 1 de calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.

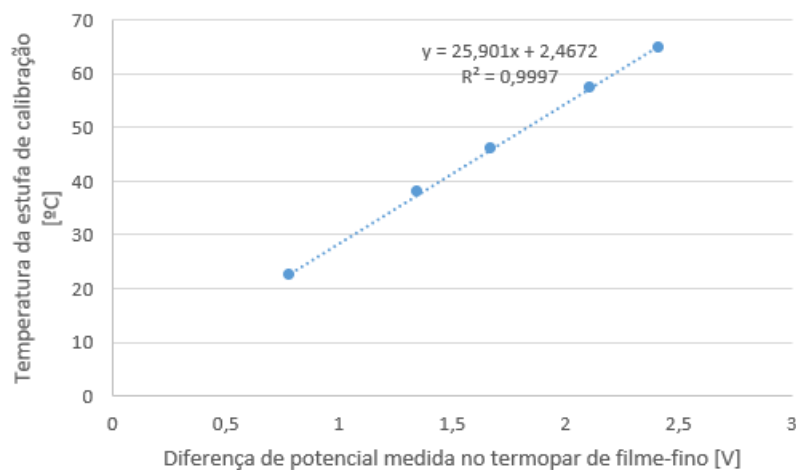


Figura 2: Exemplo 2 de calibração do termopar de filme-fino com 3mm de diâmetro.