



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Francisco Filipe de Queiroz Figueira e Mendonça Gomes

**APRENDIZAGEM EXPERIMENTAL EM  
TRANSMISSÃO DE CALOR**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica,  
orientada pelo Professor Doutor Miguel Oliveira Panão e pelo Professor Doutor  
José Joaquim Costa, e apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

Fevereiro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Aprendizagem Experimental em Transmissão de Calor**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Experiential learning in Heat Transfer**

**Autor**

**Francisco Filipe de Queiroz Figueira e Mendonça Gomes**

**Orientadores**

**Miguel Rosa Oliveira Panão**

**José Joaquim da Costa**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Associado da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos Fernandes  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

**Colaboração Institucional**

---



**ADAI - Associação para o Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial**

**Coimbra, Fevereiro 2022**



“If you can't explain it to a six-year-old, you don't understand it yourself.”

Albert Einstein



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professores Doutores Miguel Panão e José Costa, por toda a paciência e conhecimento transmitido. Um obrigado muito especial a todos os docentes e funcionários do DEM por me terem proporcionado 7 anos incríveis de muito crescimento e aprendizagem.

Gostaria de agradecer também à Sociedade da Tia Padeira, por ter sido tudo aquilo que uma pessoa pode desejar como grupo de amigos; vocês são incansáveis, infinitamente incríveis e para sempre inesquecíveis.

Aos meus Pai e Mãe, por me terem proporcionado todo o apoio necessário nesta jornada. Vocês são um exemplo de tudo aquilo que ambiciono ser: trabalhador, correto e feliz.

À minha Irmã, por seres a pessoa que mais me inspira, por seres tudo aquilo que eu sempre quis ser, tenho imenso orgulho em ti.

Aos meus amigos Nuno, Inês, Gabriel e David, por terem sido os meus pilares de apoio ao longo de todos estes anos.

Por último, gostaria de agradecer a mim mesmo por nunca ter desistido ao longo desta caminhada.





## Resumo

O aumento da complexidade da informação a transmitir a alunos de gerações vindouras leva à exploração de novas e melhores formas de ensinar. De entre várias teorias desenvolvidas encontra-se o ciclo de aprendizagem de David Allen Kolb.

Apoiado no modelo de Kolb, o primeiro objetivo deste trabalho é a modernização de uma instalação experimental de condução de calor projetada com o objetivo de ensinar este fenómeno físico de uma forma didática.

Posteriormente, são desenvolvidas experiências didáticas que procuram explicar de uma forma visual e acessível os fenómenos envolvidos na condução de calor. De entre estas experiências encontram-se a condução de calor linear e radial, bem como o efeito de materiais isolantes e o contacto térmico entre superfícies.

Estas experiências constituem um elemento fundamental no ciclo da aprendizagem experimental, estratégia que pode ser usada no ensino desta ciência.

**Palavras-chave:** Ciclo de aprendizagem, Condução de calor, Condutibilidade térmica, resistência térmica de contacto, material isolante.



## **Abstract**

The first objective was the modernization of a thermal conduction experimental installation which was designed to teach this physical phenomenon in a visual and didactic way.

Afterwards, experiments were designed and conducted in order to explain the theory in a more accessible way. Active experimentation constitutes a pivotal role in the cycle of experiential learning.

**Keywords** Cycle of Experiential Learning, Heat Conduction, Thermal conductivity, contact heat resistance, isolating material



---

## Índice

Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	x
Simbologia e Siglas .....	xi
Simbologia.....	xi
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Fundamentos de Condução de Calor .....	4
1.1.1. Perspectiva vectorial do fluxo de calor.....	7
1.1.2. Coeficiente global de transferência de calor.....	8
1.1.3. Contacto térmico entre superfícies .....	9
1.1.4. Condutibilidade térmica .....	11
1.2. Instalação Original e Processamento de Dados .....	14
1.3. Objetivos Global e Específicos.....	19
2. Modernização da instalação didática.....	21
2.1. Problemas Encontrados e Soluções .....	21
2.1.1. Sensores de temperatura .....	21
2.1.2. Fixação dos termopares .....	22
2.1.3. Leitura e Processamento de dados.....	24
2.1.4. Interferência eletromagnética .....	25
2.1.5. Sistema de Arrefecimento .....	25
2.2. Nova Bancada Experimental .....	25
2.2.1. Experiência 1 .....	26
2.2.2. Experiência 2 .....	28
2.2.3. Experiência 3 .....	31
2.2.4. Experiência 4 .....	32
3. Resultados e discussão .....	34
3.1. Condução de calor linear .....	34
3.2. Condução radial de calor .....	37
3.3. Efeito da resistência térmica de contacto.....	38
3.4. Efeito de materiais isolantes .....	42
3.5. Relação com o ciclo de aprendizagem.....	43
4. Conclusão e Trabalho Futuro .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclo de Aprendizagem Experimental (adaptado de (Kolb, n.d.)) .....	2
Figura 1.2. Difusão de calor devido à vibração de partículas. ....	5
Figura 1.3. Fluxo de calor normal à linha isotérmica (adaptado de (Incropera et al., 1996))	8
Figura 1.4. Resistência térmica de contacto. (Adaptado de .....	10
Figura 1.5. Variações da condutibilidade térmica em função da temperatura. (Adaptado de (Incropera et al., 1996)).....	12
Figura 1.6. Unidade de controlo.....	15
Figura 1.7. Bancada experimental original .....	15
Figura 1.8. Módulo linear original de condução de calor com a secção de testagem.....	16
Figura 1.9. Módulo linear original de condução de calor sem a secção de testagem.....	17
Figura 1.10. Módulo radial de condução de calor.....	18
Figura 1.11. Sistema de arrefecimento da bancada experimental .....	18
Figura 2.1. Equipamento de soldadura (esquerda) da junção de um termopar tipo-K (direita).....	22
Figura 2.2. Peças de fixação desenhada em <i>Solidworks</i> .....	22
Figura 2.3. Peças de fixação impressas em 3D .....	23
Figura 2.4. Peças de fixação com os termopares fixos com <i>bostik</i> .....	23
Figura 2.5. Peças de fixação instaladas na bancada experimental .....	23
Figura 2.6. Sistema de aquisição de dados .....	24
Figura 2.7. Bancada experimental renovada .....	26
Figura 2.8. Perfil linear de variação de temperatura .....	27
Figura 2.9. Unidirecionalidade do fluxo de calor.....	29
Figura 2.10. Gradiente de temperatura radial.....	29
Figura 2.11. Influência da resistência térmica de contacto .....	31
Figura 2.12. Influência da presença de um material isolante .....	33
Figura 3.1. Aquecimento módulo linear 20W .....	35
Figura 3.2. Gradiente de temperaturas linear a 20W.....	36
Figura 3.3. Resistências térmicas estimadas entre os módulos com uma potência dissipada de 20W .....	36
Figura 3.4. Aquecimento do módulo radial às diferentes potências .....	37

---

Figura 3.5. Temperatura do módulo radial em ordem á distância.....	38
Figura 3.6. Aquecimento do módulo linear com mau contacto entre as superfícies.....	39
Figura 3.7. Aquecimento do módulo linear com pasta térmica de contacto .....	39
Figura 3.8. Valores médios de temperatura nas várias localizações normalizados pelo valor máximo em $T(0)$ com os módulos encostados. ....	40
Figura 3.9. Valores médios de temperatura nas várias localizações normalizados pelo valor máximo em $T(0)$ . com pasta térmica de contacto.....	40
Figura 3.10. Aquecimento do módulo linear com o pedaço de papel .....	42

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Comparação dos valores para a condutibilidade térmica obtidos pelas experiências 1 e 3.....	41
---	----



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$Q_{in}$  – Quantidade de calor que entra num sistema [J]

$Q_{out}$  – Quantidade de calor que sai de um sistema [J]

$\nabla Q_s$  – Variação de calor dentro de um sistema [J]

$Q_g$  – Geração interna de calor [J]

$k$  – Condutibilidade térmica [W / (m · K)]

$V$  – Volume [m<sup>3</sup>]

$U$  – Energia interna de um sistema [J]

$\rho$  – Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]

$c_v$  - Calor específico a volume constante [J/ (kg. K)]

$\nabla$  - Gradiente

$R''_{t,Eq}$  - Resistência térmica equivalente [m<sup>2</sup>.K / W]

$R''_{t,ct}$  - Resistência térmica de contacto [m<sup>2</sup>.K / W]

$q$  - Potência [W]

$q''$  - Potência transferida por unidade de Área [W/m<sup>2</sup>]

$U$  – Coeficiente Global de Transferência de Calor [W/(m<sup>2</sup>K)]

### Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IC – Intervalo de Confiança

MC – Mau contacto

PT – Pasta térmica







## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas teorias e conceitos representa um fator determinante para o progresso da tecnologia e do conhecimento. Com o aumento da complexidade da informação a transmitir a gerações vindouras, surgem, por vezes, situações nas quais esse conhecimento é disponibilizado de forma pouco eficaz, sem que se complete de facto a integração de novos conceitos. Em 1984, apoiado nos famosos modelos de aprendizagem de Dewey (1938), Lewin (1942) e Piaget (1952), David Allen Kolb propõe a teoria do ciclo de aprendizagem como resposta a este crescente problema no processo educativo.

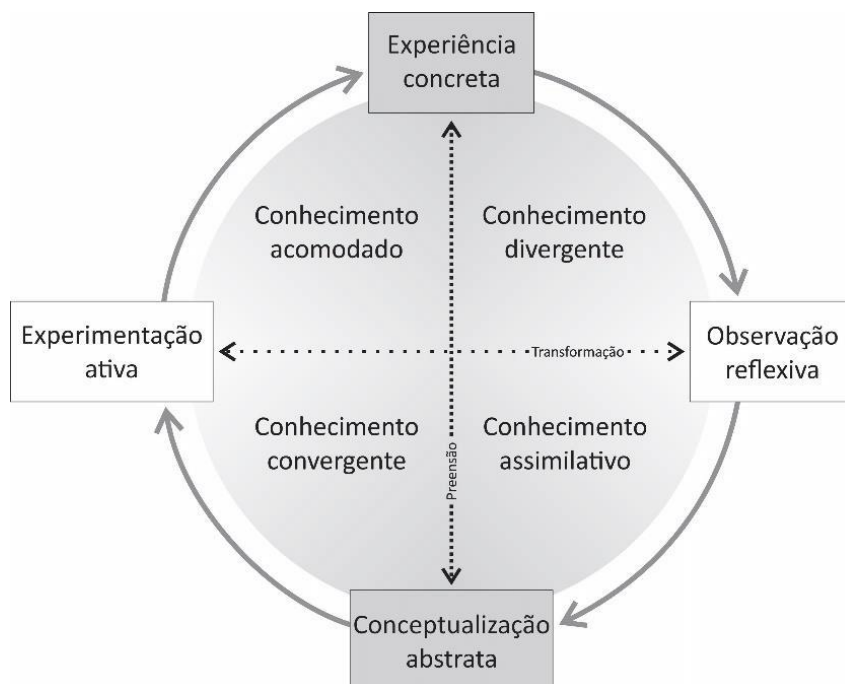
(D. Kolb, 2003) hipotetiza que as ideias são formadas e reformuladas através da experimentação prática e que é de extrema relevância entender que nenhum aluno começa como uma tela em branco. Todos aqueles que se predispõem a aprender algo, possuem já ideias mais ou menos articuladas sobre o assunto em questão e, por isso, uma das missões principais de um pedagogo é a de testar e dissecar os conceitos e as teorias pré-existentes, por forma a “abrir caminho” para conhecimento novo.

Kolb e Fry, 1975, baseiam a sua teoria no facto de a aprendizagem dever ser vista como um processo, e não apenas um resultado. Este conceito dissemina-se na década de 80 em oposição aos modelos clássicos de aprendizagem, que encaram o conhecimento como a acumulação de ideias simples e as ligações entre elas.

Surge então o chamado de ciclo de aprendizagem experiencial. Com este ciclo ilustrado na Figura 1.1 (D. A. Kolb, n.d.) enfatiza o facto de a aprendizagem ser um processo que explora todas as dimensões do ser humano e cuja aplicação concretiza a consolidação de novas ideias. O processo consiste em quatro passos fundamentais, sendo que, devido à sua natureza cíclica, pode começar por qualquer um dos passos:

- 1 - Experimentação concreta
- 2 - Observação Reflexiva
- 3 - Conceptualização Abstrata
- 4 - Experimentação Ativa

O aluno deve ter a possibilidade de experienciar o fenómeno (sentir), observar e refletir sobre o assunto (observar), tentar categorizar e classificar o sucedido (conceptualizar) e, finalmente, tentar aplicar ativamente o conhecimento (aplicar).



**Figura 1.1.** Ciclo de Aprendizagem Experimental (adaptado de (D. A. Kolb, n.d.))

Neste sentido, a aprendizagem envolve uma relação entre o indivíduo e o ambiente, sendo que o conhecimento é criado e alterado através da transformação da experiência, e não propriamente adquirido e transmitido.

Segundo Kolb, a experimentação prática é um dos passos fundamentais para a geração e consolidação do conhecimento teórico, conhecimento este que apenas é integrado após a aplicação da teoria em novas situações experimentais concretas.

A presente dissertação, apoiada no Modelo de Aprendizagem Experiencial de David Kolb, incide sobre a modernização de uma instalação laboratorial didáctica desenvolvida pela empresa P.A. Hilton, que explora o fenómeno de condução de calor numa vertente linear e numa vertente radial, enquadrando a experiência num ciclo de aprendizagem experiencial.

A primeira fase do trabalho consistiu numa avaliação preliminar do estado do equipamento e, após se reconhecerem algumas falhas, foram feitas melhorias no sistema de aquisição de dados, no sistema de medição de temperaturas e, por último, foi feita uma

tentativa de melhoria do sistema de arrefecimento. Numa segunda fase, foram elaboradas quatro experiências com o objectivo de explorar alguns dos conceitos por detrás da lei de Fourier, por forma a melhor entender quais os factores gerais que influenciam a transferência de calor por condução.

Tanto a experiência de condução de calor na direcção linear como radial consistem num módulo com a geometria pretendida, devidamente equipado com os respectivos sistemas de aquecimento e arrefecimento.

Após a elaboração das experiências foi desenvolvido uma ficha técnica das experiências a ser seguido pelos alunos e professores, com o objetivo de melhorar a apreensão dos conceitos associados aos processos de condução de calor, seguindo o modelo de aprendizagem experiencial proposto por Kolb.

Após esta introdução ao ciclo de aprendizagem que serve de motivação base para os trabalhos sintetizados nesta dissertação, a próxima secção explora os fundamentos de condução de calor como mecanismo na base do trabalho realizado. Depois, a secção 1.2 introduz a instalação pedagógica pré-existente e explica o funcionamento das experiências que permite realizar e, por fim, a secção 1.3 traça os objectivos geral e específicos, descrevendo as experiências pedagógicas a realizar na instalação actualizada descrita no capítulo 2. O capítulo 3 contém os resultados obtidos nas experiências a realizar pelos alunos e discussão do respectivo valor pedagógico na apreensão dos conceitos físicos. A dissertação termina com um sucinto sumário do trabalho e propõe algumas sugestões para trabalho futuro.

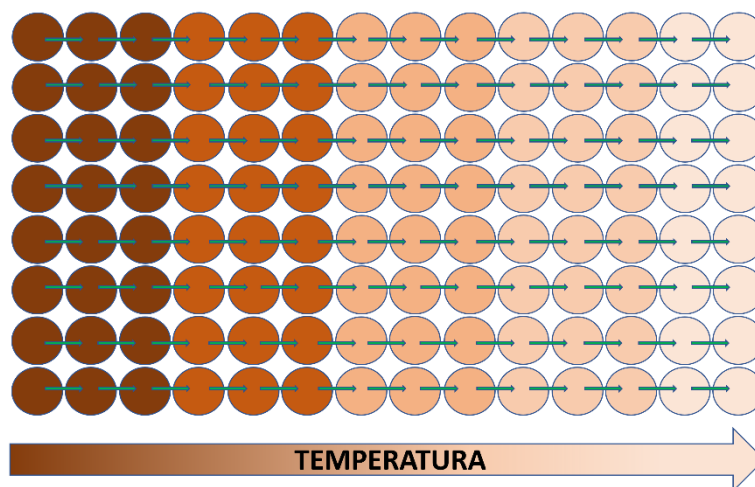
## 1.1. Fundamentos de Condução de Calor

Existem dois princípios básicos de termodinâmica fundamentais para o estudo da transmissão de calor. O primeiro princípio é o da conservação de energia, que reconhece o facto de num sistema a energia ser transferida ou transformada, mas não criada ou esgotada (Sarton et al., 1929). Logo, esse princípio relaciona a variação de energia no interior de um sistema ( $\nabla Q_s$ ) com as trocas de calor na fronteira ( $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ) e quaisquer fontes de geração internas ( $Q_g$ ) como:

$$\nabla Q_s = Q_{in} - Q_{out} + Q_g \quad (1)$$

A energia no interior de um sistema possui três componentes – a energia interna ( $U$ ), a energia cinética e a potencial – das quais a relevante para a condução de calor é a energia interna, pelo que  $\nabla Q_s = \nabla U$ . E são três os modos ou processos distintos como se transmite o calor no interior de um sistema – condução, convecção e radiação. A presente dissertação focar-se-á na condução de calor, também conhecida como difusão térmica, visto ser este o modo de transmissão de calor preponderante envolvido nas experiências realizadas. Na convecção de calor, a energia trocada numa interface com um escoamento é por esse transportada e, no caso da radiação, o mecanismo de transmissão de calor corresponde à propagação de ondas electromagnéticas. O mecanismo de transmissão de calor por condução ocorre por difusão molecular da energia, sendo a temperatura uma medida indirecta da mesma. Assim, sempre que houver uma diferença de energia entre dois pontos num determinado sistema físico, sem escoamento no seu interior ou propagação de ondas electromagnéticas, essa flui dos pontos com mais energia para os que têm menos, ou seja, na direcção e sentido do decréscimo de temperatura. Do ponto de vista microscópico, a presença de calor manifesta-se através do nível de vibração das moléculas, vibração essa que, dentro de um meio cujas partículas constituintes não apresentem movimento relativo entre si, pode ser transmitido de molécula em molécula como ilustrado na Figura 1.2.





**Figura 1.2.** Difusão de calor devido à vibração de partículas.

Joseph Fourier, no seu livro sobre a teoria analítica de calor em 1822, expressa pela primeira vez que  $F$ , uma quantidade de calor (Joule) durante uma unidade de tempo (segundo) que atravessa uma unidade de área ( $m^2$ ), relativo a  $K$  que representa o constante fluir de calor (Joule) durante uma unidade de tempo (segundo) por um material sólido, de tal modo que  $F/K$  iguala-se à variação linear da temperatura ( $a - b$ ) numa determinada distância ( $e$ ) como  $\frac{F}{K} = \frac{a-b}{e}$ . Daqui formula a conhecida Lei de Fourier (p. 52, edição de 1878 da tradução em inglês) como

$$q'' = -k \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

com  $q$  [ $J/s \equiv W$ ] como a quantidade de calor ( $Q$ ) transferida por unidade de tempo designando-se por potência térmica, que atravessa uma área ( $q''$  [ $W/m^2$ ]) com cada plica representando “por unidade de comprimento”. Ao longo do tempo  $K$  passou a  $k$  e corresponde à propriedade da condutibilidade térmica dos materiais, e  $\frac{dT}{dz}$  corresponde ao gradiente de temperatura. O sinal de negativo serve para indicar que o fluxo de calor que ocorre no sistema flui sempre das temperaturas mais altas para as mais baixas.

Sabendo que a energia que varia no sistema corresponde à componente interna e que na condução de calor não existe movimento das moléculas, na sua forma infinitesimal  $-\nabla Q_s = \frac{du}{dt}$  – quando expressa por unidade de massa ( $du$  [ $J/kg$ ]), relaciona-se com a

temperatura por unidade de volume ( $V$ ) como  $\frac{\nabla Q_s}{V} = \frac{1}{V} \frac{dU}{dt} = \rho c_v \frac{dT}{dt}$ , com  $\rho$  como a massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ] do material e  $c_v$  corresponde ao calor específico a volume constante. Assumindo que o sistema se descreve com coordenadas cartesianas ( $x,y,z$ ), na fronteira, o fluxo de calor que sai do sistema iguala-se ao que entra mais o que variou dentro do volume de controlo, sendo essa variação o que expressa a Lei de Fourier em (2). Assim,  $Q_{in} - Q_{out}$  expressos por unidade de volume em coordenadas cartesianas, por exemplo, em  $x$  como  $\frac{dq''_{in}}{dx} - \left( \frac{dq''_{in}}{dx} + \frac{dq''}{dx} \right)$ , quando aplicada a Lei de Fourier permite expressar as trocas de calor na fronteira por unidade de volume como

$$\frac{Q_{in}-Q_{out}}{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Por fim, se se expressar o termo de geração interna de energia ( $Q_g$ ) por unidade de tempo e volume, a equação geral da condução de calor é descrita, em coordenadas cartesianas  $Oxyz$ , por:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g''' \quad (4)$$

que, no fundo, traduz a conservação de energia térmica num meio físico estacionário, à escala infinitesimal (unidades de  $\text{W/m}^3$ ). Esta equação é constituída por três parcelas que estão associadas a fenómenos distintos.

A primeira representa a taxa temporal de acumulação de energia, a segunda parcela corresponde ao balanço líquido – o que entra menos o que sai – entre as potências térmicas que entram e saem, por condução, através das fronteiras do volume de controlo infinitesimal, segundo as três direcções cartesianas ( $x,y,z$ ). Por último, encontramos representada a taxa volúmica de geração interna de energia.

Esta equação, apesar de exacta, é algo complexa e leva a dificuldades no que toca à sua aplicação prática. Como tal, frequentemente assumem-se algumas hipóteses, que sejam realistas e plausíveis, de modo a simplificar a sua solução.

Primeiramente, considera-se o regime permanente, o que significa que as propriedades e as temperaturas se manterão constantes ao longo do tempo, ditando assim, que não há acumulação de energia por parte do sistema. Se se considerar, também, que não existe qualquer tipo de geração interna de calor, resulta que a potência térmica que entra é igual à que sai do sistema.

De seguida, considera-se que a condução de calor é unidireccional, sendo apenas significativa num dos eixos, por exemplo, em  $x$ .

Ao aplicar estas simplificações, e se se considerar que a condutibilidade térmica é constante, a expressão geral resume-se a

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

ou seja, o fluxo de calor no sistema é constante e a variação de temperatura é linear, como assumido por Fourier aquando da formulação da sua Lei para descrever matematicamente a condução de calor.

### 1.1.1. Perspectiva vectorial do fluxo de calor

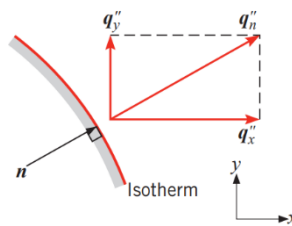
Pela Lei de Fourier, a dependência da variação de um escalar  $T(x,y,z)$  numa determinada direcção, confere ao fluxo de calor uma característica vectorial, pelo que, em coordenadas cartesianas, se  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$ , com  $e_n$  como vectores unitários nas três direcções, pode-se expressar o campo vectorial dos fluxos de calor num sistema com áreas de secção iguais como

$$\vec{q}'' = -k\nabla T \quad (6)$$

Assim, o fluxo de calor numa superfície genérica depende do modo como o vector normal a essa ( $\vec{n}$ ) se expressa em coordenadas cartesianas como

$$\vec{q}''_n = -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (7)$$

que representa, também, o fluxo de calor por condução numa direcção normal às linhas isotérmicas da distribuição de temperatura, conforme esquematizado na Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Fluxo de calor normal à linha isotérmica (adaptado de (Incropera et al., 1996))

As linhas de fluxo de calor, perpendiculares às isotérmicas, indicam o percurso feito pela energia que flui através do meio condutivo. Esta perspectiva pode ser visualmente útil na compreensão do mecanismo de condução de calor dada a semelhança existente entre as linhas de fluxo de calor que expressam o “escoamento” de energia e as linhas de corrente correspondentes ao escoamento de um fluido.

### 1.1.2. Coeficiente global de transferência de calor

Em algumas situações, o sistema não apresenta um valor único de condutibilidade térmica devido ao facto de ser constituído por camadas de materiais distintos. Isto faz com que o gradiente térmico não seja uniforme dificultando o cálculo de temperaturas. Como estratégia de resolução deste problema de cálculo, utiliza-se o coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , associado à lei de Fourier e expresso como

$$q'' = U\Delta T \quad (8)$$

com o coeficiente global  $U$  a representar a capacidade que um sistema tem de transmitir calor como um todo, e sendo calculado como

$$U = \frac{1}{R_{t,Eq}} \quad (9)$$

em que  $R''_{t,Eq}$  representa a resistência térmica global unitária [ $m^2K/W$ ] dos vários materiais envolvidos, podendo estar em série ou em paralelo entre si. É de notar que estas resistências são de natureza condutiva e expressam-se para cada material  $i$  como

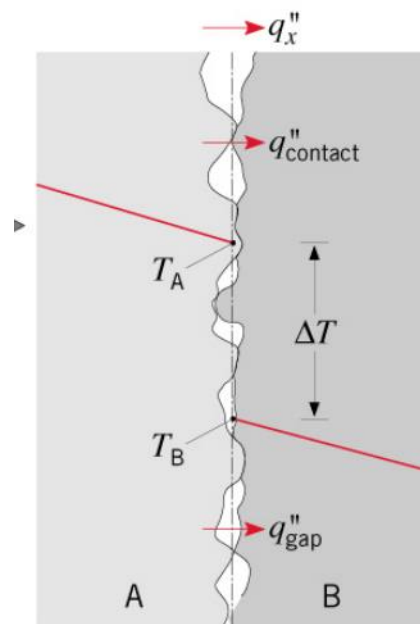
$$R''_{t,cond} = \frac{L_i}{k_i} \quad (10)$$

A resistência térmica específica de cada material é tanto maior quanto maior for a espessura da camada, e tanto menor quanto maior for a condutibilidade térmica do material. Por isso, se o fluxo de calor for uniformemente distribuído numa superfície e o regime for permanente, um material com uma menor condutibilidade térmica “oferece” mais resistência ao fluir do calor, pelo que, pela Lei de Fourier, a diferença de temperatura no comprimento  $L_i$  considerado aumenta. Por isso, se  $k_1 > k_2$ , então,  $\Delta T_1 < \Delta T_2$ , o que pode ser contra-intuitivo porque se a condutibilidade térmica é maior, mais facilmente se conduz o calor e como  $q'' \propto \Delta T$ , um estudante pode ser induzido a aumentar a diferença de temperatura se não tiver bem presente que a Lei de Fourier expressa antes que  $q'' \propto k\Delta T$ , para um mesmo  $L$ .

Um outro factor que pode influenciar o coeficiente global de transmissão de calor é a resistência térmica de contacto.

### 1.1.3. Contacto térmico entre superfícies

As condições de contacto entre duas superfícies de materiais distintos são determinantes na forma como o calor transita de uma para outra. Como exemplificado na Figura 1.4 quaisquer dois corpos em contacto um com o outro através de superfícies consideradas planas, apenas se tocam, realmente, em alguns pontos discretos (Cooper et al., 1969)



**Figura 1.4.** Resistência térmica de contacto. (Adaptado de (Incropera et al., 1996))

As irregularidades na interface fazem com que o contacto térmico não seja perfeito entre duas superfícies sólidas resultando numa maior dificuldade à passagem de calor de uma superfície para outra. Esta característica denomina-se como resistência térmica de contacto e depende:

- da dureza dos materiais constituintes;
- do acabamento superficial;
- e da pressão de contacto entre as superfícies.

O efeito desta resistência térmica de contacto unitária ( $R''_{t,ct}$ ) no coeficiente global de transferência de calor implica adicionar o valor em série às restantes resistências térmicas unitárias consideradas.

O valor da resistência térmica de contacto depende do par de superfícies em estudo e, por isso, é calculado experimentalmente. Tendo em conta que a transferência de calor depende do contacto entre duas superfícies, quanto maior for a quantidade de pontos discretos nos quais ocorre o contacto, maior será a transferência de calor, pelo que o aumento da pressão de contacto entre as superfícies reduz o valor desta resistência térmica.

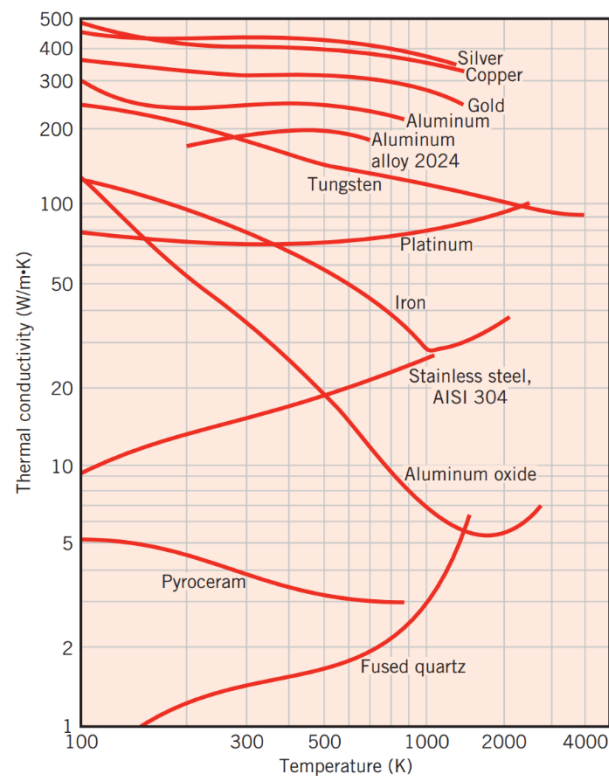
Uma segunda estratégia de redução do seu valor consiste no recurso a pastas térmicas de contacto. Devido à sua maior condutibilidade térmica em relação ao gás que

ocupa os espaços intersticiais, aliada à sua plasticidade, formam uma interface favorável à condução de calor, reduzindo substancialmente, a resistência térmica de contato.

#### **1.1.4. Condutibilidade térmica**

Uma das propriedades físicas mais relevantes dos materiais aquando do estudo da condução de calor é a condutibilidade térmica. Apesar disso, existem algumas dificuldades na sua determinação experimental (dos Santos, 2002).

A condutibilidade térmica pode ser definida como a taxa à qual é transferido o calor pelo processo de difusão (Cengel, Y. (2003). Este valor depende de vários factores, tais como a estrutura molecular da matéria e o estado em que a mesma se encontra. A título de exemplo, para uma mesma temperatura, a condutibilidade térmica do gelo ( $2.18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) – água em estado sólido (*s*) – é mais elevada do que a da água em estado líquido (*l*)  $0.56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Ramires et al. (1995)). E uma diferença ainda mais notória é a que acontece na mudança de fase de líquido para gás (*g*) como descrito por Millat et al. (1996), podendo-se sintetizar que  $k_s > k_l > k_g$  (Incropera et al., 1996). Por outro lado, nos estados físicos líquido e gasoso, dada a maior energia cinética molecular, proporcional à temperatura, é maior a influência que este parâmetro exerce sobre uma propriedade como a condutibilidade térmica. Assim, variações significativas de temperatura podem ser responsáveis pelo aumento ou diminuição desta propriedade intrínseca dos materiais, como se pode verificar na figura 1.5.



**Figura 1.5.** Variações da condutibilidade térmica em função da temperatura. (Adaptado de (Incropera et al., 1996))

Na maioria dos casos práticos, e por questões de facilidade de cálculo, considera-se a condutibilidade térmica como constante e com valor médio entre os valores máximo e mínimo na distribuição de temperatura. Outro factor que pode influenciar a condutibilidade térmica é a direcção na qual está a ser estudada a transferência de calor, podendo  $k_x \neq k_y \neq k_z$  (Xu et al., 2015). Porém, no caso de um material isotrópico, o valor da condutibilidade térmica é independente da direcção de transferência de energia.

No que diz respeito a aplicações práticas, dentro da temática de transferência de calor por condução, os materiais são seleccionados para diferentes aplicações dependendo do seu valor da condutibilidade térmica. De uma forma geral, podemos considerar que existem dois tipos principais que orientam essa selecção: dissipadores de calor (*heatsink*); e isolantes térmicos.



#### **1.1.4.1. Dissipação de calor**

Na equação geral de condução de calor (4) podemos verificar que a acumulação de calor, quando em excesso, poderá levar a uma miríade de problemas, desde sobreaquecimentos a alterações na qualidade de acabamentos superficiais (Jamshidinia & Kovacevic, 2015). Quando se trata de processos cuja duração temporal seja significativa, em geral, teremos também acumulação de calor e poderemos estar perante uma situação na qual seja necessária uma estrutura de dissipação de calor integrada.

Numa situação de elevadas necessidades de dissipação de potência térmica, geralmente, recorre-se a materiais com elevadas condutibilidades térmicas, como é o caso do cobre, alumínio, ou materiais contendo algum teor de grafeno. Para além da elevada condutibilidade térmica, a geometria dos dissipadores de calor procura aumentar a área de troca de calor, como é o caso das alhetas, como são geralmente encontradas em aplicações de eletrónica e computadores onde existe uma grande quantidade de calor a ser gerada num espaço diminuto, tornando-se um dos fatores limitantes da sua construção (Tuckerman et al. 1984). Como referido anteriormente, poderá existir uma resistência térmica de contacto entre o chip a arrefecer e o dissipador de alhetas, pelo que se usa adesivo ou pasta térmica (Chung, 2001) de modo a reduzir essa resistência térmica, aprimorando a qualidade do contacto térmico e, por consequência, melhorando o desempenho do dissipador de calor.

#### **1.1.4.2. Isolantes**

Ao contrário das situações referidas na secção anterior, se o objetivo for minimizar o calor transferido numa área determinada, criando uma barreira térmica, utilizam-se materiais isolantes com baixos valores de condutibilidade térmica. Exemplo disso são os materiais usados em paredes de habitação, cujo objetivo durante os meses de Inverno é o de minimizar as perdas de calor para o exterior, e o efeito oposto nos meses de Verão. Noutras aplicações em que se pretende transportar energia entre dois pontos distantes num processo por meio de um fluido, importa isolar os tubos de modo a minimizar a energia térmica perdida (Poredoš & Kitanovski, 2002).

Apesar do vácuo ser o melhor isolante térmico, por reduzir os mecanismos de transmissão de calor ao radiativo (Donaldson et al., 1965), a viabilidade da sua utilização em aplicações comuns como a habitação não é económica ou logisticamente viável. Como tal, os materiais isolantes têm-se desenvolvido por forma a adquirir maior versatilidade na sua aplicação, abrangendo geometrias complexas a isolar termicamente através da distribuição macroscópica da massa de material isolante (Al-Sanea & Zedan, 2011).

Uma outra estratégia para criar barreiras térmicas consiste no recurso a materiais com estruturas porosas, de modo a beneficiar do potencial isolante do ar intersticial. Um dos melhores exemplos comercializado por Portugal é a cortiça. Devido à sua estrutura porosa, a cortiça constitui um excelente isolante térmico.

Uma estratégia muito comum utilizada na construção civil são os vidros duplos com caixa de ar. Essa caixa de ar formará uma resistência térmica, dificultando a passagem de calor, sem que se use mais matéria prima. Porém, o dimensionamento deve considerar a possibilidade de geração de correntes de convecção natural.

## **1.2. Instalação Original e Processamento de Dados**

Nesta secção descreve-se a instalação experimental original projetada pela empresa P.A. Hilton no âmbito do estudo da condução de calor. A bancada experimental utilizada como base é o modelo H940 da empresa P.A. Hilton e foi desenhada com o propósito de realizar experiências de condução de calor em regime permanente, avaliando, de uma forma didática e experiencial, a forma como algumas variáveis influenciam a transmissão de calor por difusão.

O modelo datado de 1991, compõe-se de uma unidade de controlo, uma bancada experimental cujo aquecimento é garantido por uma resistência elétrica de potência regulável e possui um sistema de arrefecimento com água corrente para assegurar uma condição de fronteira fria, bem definida, e que evite o sobreaquecimento da experiência.

A unidade de controlo ilustrada na Figura 1.6 é composta por um interruptor (1), um controlo analógico de 9 posições correspondente a 9 termístores (2), um mostrador digital que exhibe a temperatura em °C com precisão de 0.1°C (3) e, por fim, um

potenciômetro de controlo analógico com potência variável entre 0 e 100 W (4) e o respectivo mostrador digital.



Figura 1.6. Unidade de controlo

A bancada contendo a experiência de condução de calor propriamente dita e exibida na Figura 1.7 constitui-se por uma secção de condução linear de área constante (6) e uma de condução de área variável em que a condução de calor ocorre no sentido radial (7).

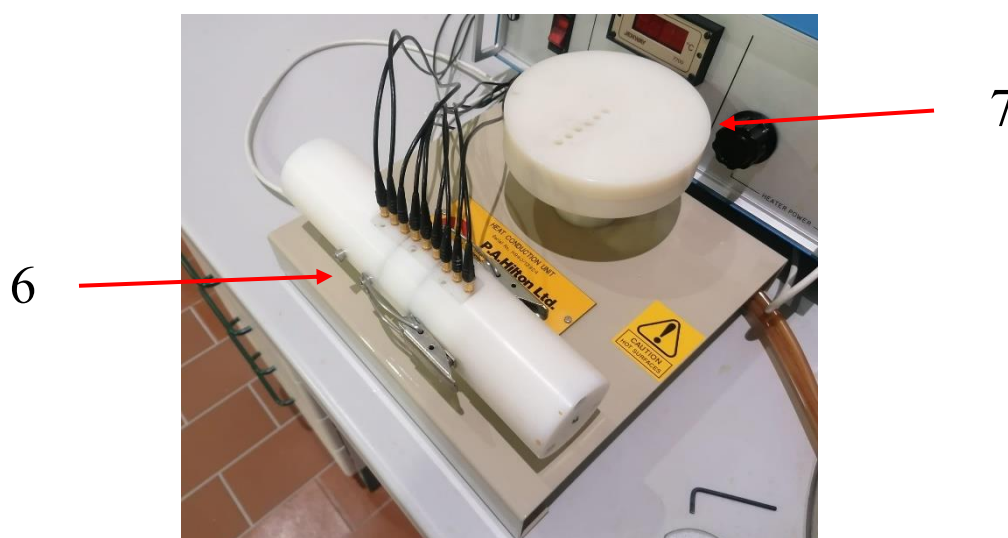
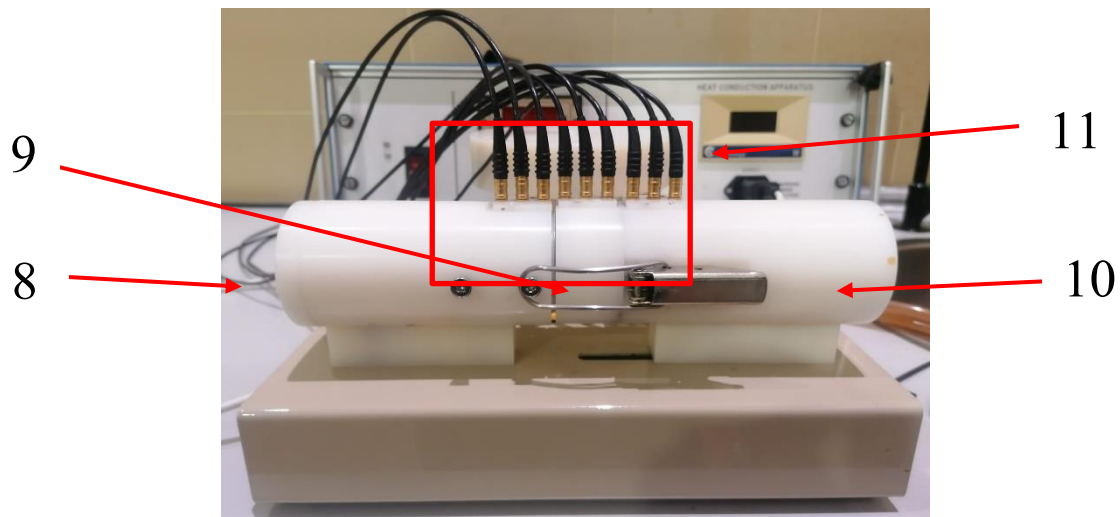


Figura 1.7. Bancada experimental original

A bancada de condução linear é constituída por 3 módulos:

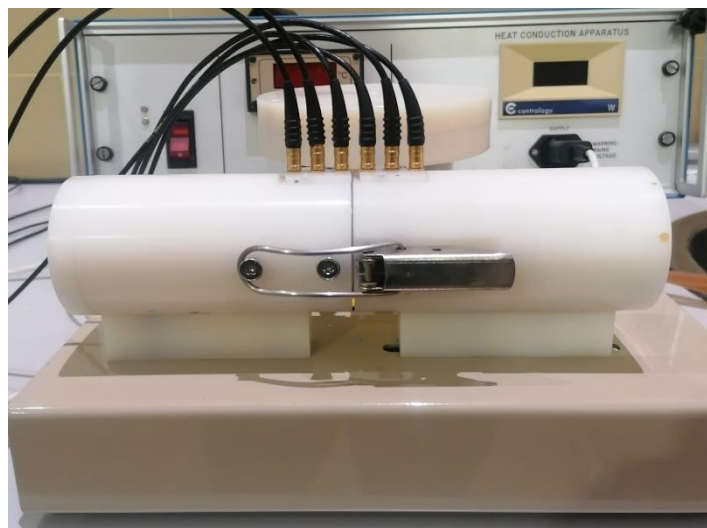
1. módulo de aquecimento (8);
2. módulo de testagem (9); e
3. módulo de arrefecimento (10).

Todos os módulos são feitos de um cilindro de latão com 25 mm de diâmetro, com as faces nas extremidades devidamente isoladas. Cada módulo está equipado com 3 termístores (11) espaçados de 10mm, e uniformemente distribuídos ao longo da direção de condução de calor tal como se pode constatar na Figura 1.8.



**Figura 1.8.** Módulo linear original de condução de calor com a secção de testagem

A parte de condução linear da bancada pode ainda ser montada de uma outra forma. Prescindindo do módulo de testagem central, os módulos de aquecimento e de arrefecimento podem ser diretamente acoplados um ao outro, simulando assim uma barra uniforme com termístores localizados a intervalos regulares de 10 mm, como ilustrado na Figura 1.9



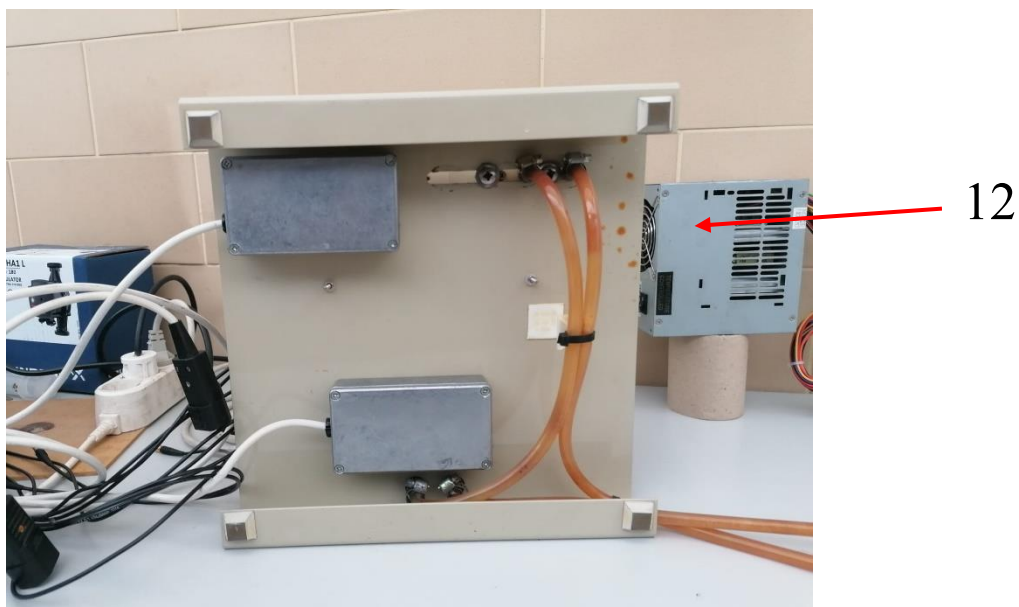
**Figura 1.9.** Módulo linear original de condução de calor sem a secção de testagem

A bancada de condução de calor radial representada na Figura 1.10 compõe-se de um módulo em forma de disco com 3 mm de espessura, cujas posições radiais de medição da temperatura variam entre os 4 e aos 55 [mm] com 6 termístores colocados em intervalos regulares desde o centro até à extremidade. O disco contém aquecimento no centro e arrefecimento na periferia. .



**Figura 1.10.** Módulo radial de condução de calor

O sistema de arrefecimento apresentado na Figura 1.11 é o mesmo para os dois módulos sendo constituído por um tubo (12) que passa pelo módulo radial e de seguida pelo módulo linear. Este tubo, terá de estar conectado a uma tomada de água que pode, ou não, funcionar em circuito fechado.



**Figura 1.11.** Sistema de arrefecimento da bancada experimental

O processamento de dados permitido por este equipamento é elementar. Para além de não ser possível aceder a todos os valores de temperatura ao mesmo tempo, não permite a possibilidade de visualizar o gradiente de temperatura nem como se processa o aquecimento/arrefecimento. O sistema não possui qualquer ferramenta de armazenamento de dados, tendo estes de serem seleccionados e registados manualmente. Desta forma, além das limitações didáticas da instalação para o actual desenvolvimento tecnológico, apresenta uma estratégia de aquisição de dados extremamente morosa e pouco proveitosa. Como advertência geral, é descrito no manual da experiência que o dispositivo não deve atingir temperaturas acima dos 100°C

### **1.3. Objetivos Global e Específicos**

O objetivo global do presente trabalho é providenciar a professores e alunos o equipamento e passos necessários para a realização de experiências que melhorem o ciclo de aprendizagem na disciplina de transmissão de calor, com particular ênfase no mecanismo de condução térmica. Para além da compreensão da temática ao nível fundamental, pretende-se também usar a estratégia da aprendizagem experiencial para favorecer a síntese entre teoria e prática no ensino em engenharia. As experiências (passo 1 do ciclo de aprendizagem) serão realizadas de forma a concretizar os passos 2 e 3 (visualização e conceptualização) encontrando-se o equipamento preparado para a preparação de futuras experiências que explorem os mesmos conceitos, constituindo, por isso, uma via aberta ao passo 4 da experimentação activa. Desta forma, a aprendizagem da disciplina de transmissão de calor evoca a vertente emocional, frequentemente ausente do ensino tecnológico, embora se reconheça o seu valor apreendedor, assim como a curiosidade e o entusiasmo que em tudo estão relacionadas com a nossa motivação e capacidade apreendedora.

Os objetivos específicos consistem em desconstruir o processo de condução de calor através da sua demonstração visual e didática, explicitando os efeitos dos vários fenómenos envolvidos. Para tal, baseado no manual instrucional da empresa P.A.Hilton,

foram realizadas quatro experiências que evidenciam os efeitos de algumas variáveis no processo de transmissão de calor, tais como:

- a área de secção de transmissão de calor
- o contacto térmico entre superfícies
- e o efeito de isolantes térmicos

O próximo capítulo explica o detalhe da modernização da instalação pedagógica original.



## **2. MODERNIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO DIDÁTICA**

Tendo a instalação didática cerca de 30 anos, o seu funcionamento apresentava alguns problemas ao nível de coerência na leitura dos valores de temperatura. Como esperado, o desenvolvimento tecnológico ao longo deste período permite novas e melhores formas de executar as mesmas tarefas, seja pelas novas técnicas de aquisição de dados, seja pelo tipo de instrumentação associada à medição de parâmetros em transmissão de calor (temperaturas, fluxos de calor, etc.). Após uma análise dos defeitos encontrados, foram efectuadas alterações ao equipamento base no sentido da sua modernização.

### **2.1. Problemas Encontrados e Soluções**

Os cinco grandes problemas encontrados concentram-se: nos sensores de temperatura; no sistema de fixação dos sensores à instalação; no procedimento de leitura e processamento dos dados; no ruído electromagneticamente induzido; e, por fim, no sistema de arrefecimento.

#### **2.1.1. Sensores de temperatura**

Primeiramente, apesar dos termístores apresentarem valores estáveis, estes eram incoerentes com os gradientes de temperatura impostos, apresentando valores que seriam considerados impossíveis para a situação em questão. Como tal, foi feita uma substituição dos termístores por outros sensores de temperatura.

Como sensores de temperatura, optou-se pela utilização de termopares do tipo K cuja gama de medição está entre os  $-40^{\circ}\text{C}$  e os  $1100^{\circ}\text{C}\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ , com um tempo de resposta dependente do tamanho da junção.



**Figura 2.1.** Equipamento de soldadura (esquerda) da junção de um termopar tipo-K (direita).

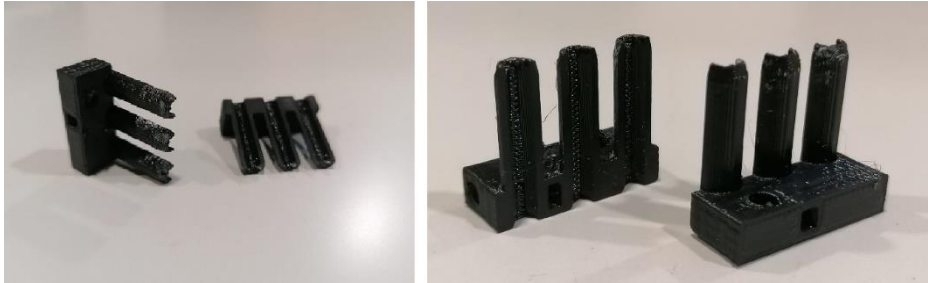
A junção dos termopares realiza-se por soldadura com uma técnica por eléctrodo, resultando em esferas mais pequenas, representada na Figura 2.1 com leituras mais estáveis.

### **2.1.2. Fixação dos termopares**

Da alteração dos termístores para termopares surgiu a necessidade de criar um sistema de fixação que permitisse alterar facilmente os sensores, enquanto se mantêm fixos nos módulos. Para tal, como ilustrado na Figura 2.2 foi desenhada em *SolidWorks* e, posteriormente, impressa a 3D, a peça de fixação, cujo resultado consta da Figura 2.3.

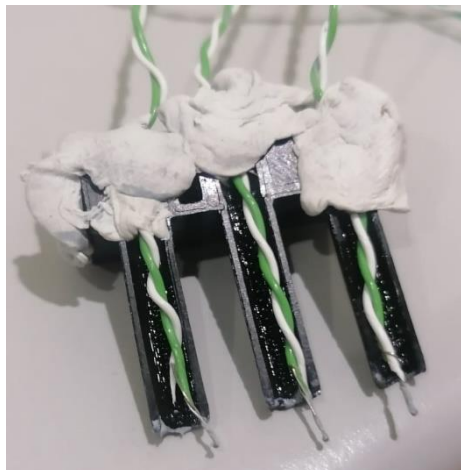


**Figura 2.2.** Peças de fixação desenhada em *Solidworks*



**Figura 2.3.** Peças de fixação impressas em 3D

Esta peça foi instalada com o auxílio da massa de fixação moldável como demonstrado na Figura 2.4, devido à facilidade na sua utilização e implementação. A Figura 2.5 mostra o efeito da massa de moldável após fixados os termopares quando aplicados na .



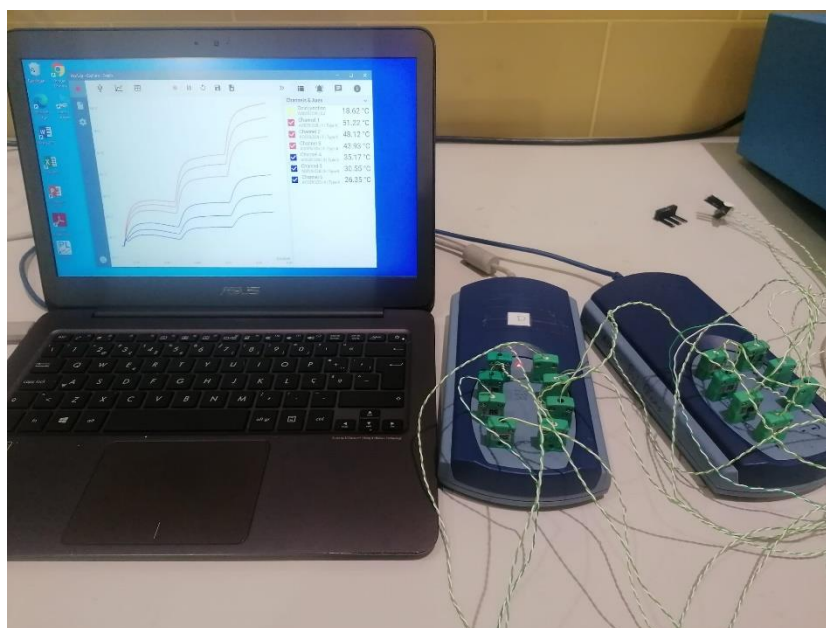
**Figura 2.4.** Peças de fixação com os termopares fixos com *bostik*



**Figura 2.5.** Peças de fixação instaladas na bancada experimental

### 2.1.3. Leitura e Processamento de dados

O sistema de leitura de temperatura requeria atualização para tecnologias de aquisição de dados mais recentes que permitissem obter um conjunto de dados em tempo útil adequado para incluir o seu processamento na aprendizagem dos conceitos, e exploradas noutras disciplinas de Instrumentação e Medida. No sistema original, para além de permitir a leitura de um termistor de cada vez, não permitia o armazenamento de dados digitais em tempo-real tendo de ser tudo registado manualmente. A solução explorada inclui um módulo de aquisição de dados da Pico TC-08, que permite fazer a leitura em simultâneo de oito termopares em tempo-real como apresentado na Figura 2.8.



**Figura 2.6.** Sistema de aquisição de dados

Um aspecto final refere-se ao estado da pasta térmica de contacto de origem que havia solidificado, criando uma resistência térmica que afectava qualquer medida, mesmo com a nova abordagem experimental, pelo que foi necessário removê-la e substituir por uma nova camada de pasta térmica. Contudo, salienta-se a importância de uma manutenção anual da instalação quanto a este aspecto.

#### **2.1.4. Interferência eletromagnética**

O princípio de funcionamento de um termopar envolve a geração de uma força electromotriz mediante a diferença de temperatura nas junções das sua extremidades. Assim, um dos maiores desafios no uso de termopares é a sua susceptibilidade a perturbações de origem electromagnética como as identificadas por Michael Faraday que deram origem à conhecida “gaiola de Faraday”. Nesse sentido, quando se utilizou um computador que só possuía uma entrada USB, sendo por isso necessário recorrer a uma extensão de USB para poder conectar os dois sistemas Pico de aquisição de dados, registou-se bastante interferência nos dados recolhidos. Hipotizou-se a extensão de USB pudesse estar a induzir campos electromagnéticos devido à passagem de corrente eléctrica causando o problema. Alterando o PC para ter acesso a 2 entradas USB o problema da interferência ficou resolvido e foi possível obter leituras coerentes.

#### **2.1.5. Sistema de Arrefecimento**

Por último, o sistema de arrefecimento está desenhado de forma a que seja necessário o acesso a uma fonte de água corrente, levando, por isso, ao desperdício de grandes quantidades de água e dificuldades de ordem logística restringindo a montagem da instalação didática junto de um lavatório. Para evitar o desperdício de água, testou-se e recomenda-se a instalação de um sistema de *watercooling* de computador que funciona em circuito fechado.

### **2.2. Nova Bancada Experimental**

A nova bancada experimental apresentada na Figura 2.7, semelhante à anterior, encontra-se agora equipada com termopares (1) ligados ao sistema de aquisição de dados pico 8 (2).



**Figura 2.7.** Bancada experimental renovada

Após implementadas todas as alterações, o sistema permite medir em simultâneo a temperatura nos diversos pontos ao longo dos módulos em formato digital, viabilizando a criação de uma base de dados a processar de modo a quantificar parâmetros envolvidos na transmissão de calor por condução. Por outro lado, a experiência adquire uma nova dimensão temporal, não estando apenas limitada ao estudo da condução de calor no regime permanente, sendo possível observar em tempo real o processo de aquecimento. Ao longo das próximas subsecções serão descritos os objetivos de cada experiência e o procedimento base da sua realização.

### **2.2.1. Experiência 1**

A primeira experiência concentra-se na Lei de Fourier através da condução de calor ao longo de um módulo cuja secção de transmissão de calor se mantém constante. Neste caso é necessário garantir que o sistema produz um fluxo de calor unidireccional e que as temperaturas ao longo da sua direcção de propagação sejam mensuráveis. Para esse efeito utiliza-se um módulo linear de condução de calor numa das extremidades para se impor um fluxo de calor por aquecimento de uma barra cilíndrica de latão e uma outra barra na extremidade oposta para criar uma condição de fronteira de arrefecimento.

Para garantir a aplicabilidade da lei de Fourier, todas as perdas de energia pela superfície lateral do cilindro são consideradas desprezáveis devido ao bom isolamento térmico do sistema. Deste modo assegura-se que o fluxo de calor gerado é unidireccional

resultando em variações de temperatura ao longo do eixo dos cilindros no eixo do  $Ox$ , direção na qual é medida a temperatura do cilindro por termopares do tipo K.

Esta experiência evidencia:

- o facto de o gradiente de temperatura ser inversamente proporcional à condutibilidade térmica. Quer isto dizer que, quanto maior for a condutibilidade térmica, menor será o gradiente térmico, logo, tendo acesso aos valores de temperatura, é possível calcular a condutibilidade térmica do material.
- traçar num gráfico da temperatura  $T(x)$  a variar com a distância de modo a obter o declive  $dT/dx$  a partir do qual se pode calcular a condutibilidade térmica, assumida como isotrópica, através da Lei de Fourier como

$$k = \left(\frac{q}{A}\right) \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)^{-1} \quad (11)$$

sendo  $q$  a potência definida na experiência e  $A$  a área de secção circular do módulo de ensaio.

O espectável seria obter um perfil de temperaturas com uma variação linear em relação à distância  $x$  como ilustrado na Figura 2.8

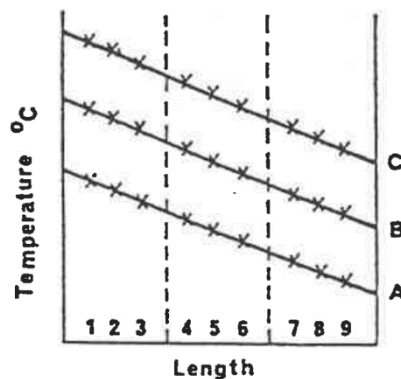


Figura 2.8. Perfil linear de variação de temperatura

Para realizar a experiência, o potenciómetro é regulado para três valores distintos da potência de aquecimento ( $q = 10, 20$  e  $30$  W), seguindo o seguinte procedimento experimental:

1. Certificar que o módulo central está bem seguro entre os dois módulos fixos para minimizar qualquer resistência de contacto.
2. Ligar o módulo de aquecimento à tomada de alimentação
3. Ligar o sistema de arrefecimento com água
4. Ligar o interruptor do controlador da bancada experimental
5. Ligar ambas as unidades de aquisição de dados ao computador
6. Abrir a aplicação PicoLog no computador e iniciar o processo de aquisição de dados
7. Regular o potenciómetro para a posição desejada
8. Esperar tempo suficiente para que os valores de temperatura estabilizem e seja atingido o regime permanente
9. Registrar os valores de temperatura obtidos
10. Processar os dados para calcular a condutibilidade térmica média com respectiva análise de propagação de erros

Para além de enfatizar a relação direta entre a área útil de condução e a potência térmica transferida, quando executada com precisão, como o ensaio mede a condutibilidade térmica de um material, esse valor pode ser, posteriormente, comparado com valores tabelados de conductibilidade térmica.

### **2.2.2. Experiência 2**

Nesta experiência, o aquecimento de um disco a partir do seu centro permite estudar de que forma varia o gradiente de temperatura ao longo do raio, criando uma situação em que a área de condução de calor aumenta ao longo de  $r$  em direção à periferia isolada, garantindo a unidirecionalidade do fluxo de calor, simplificando o cálculo experimental, ilustrado pela Figura 2.9.



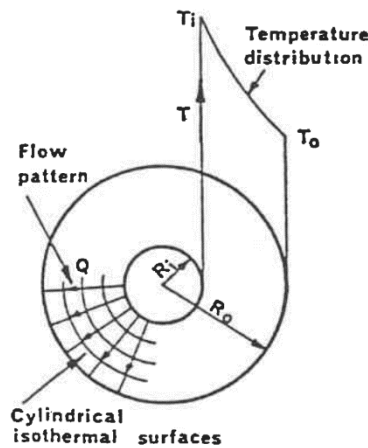


Figura 2.9. Unidirecionalidade do fluxo de calor

Para a potência térmica introduzida na região central, e minimizadas as perdas, o aumento da área ao longo do raio distribui proporcionalmente essa potência térmica alterando o valor do fluxo de calor na direção radial. Conseqüentemente, ao contrário da experiência anterior, o gradiente de temperatura obtido induz um perfil não linear na temperatura sendo maior no centro e menor nas extremidades, como esquematizado na Figura 2.10.

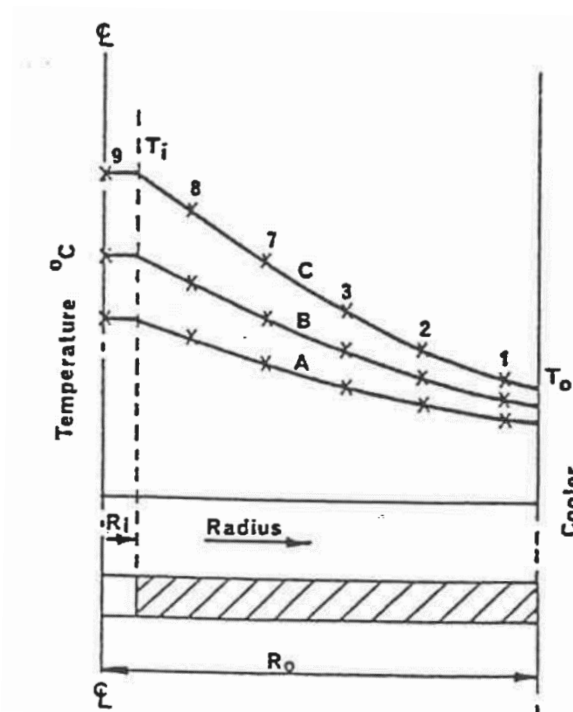


Figura 2.10. Gradiente de temperatura radial

Neste caso, a potência transmitida é constante e dada pela equação

$$q = \left( \frac{T_i - T_o}{R_{t,cil.}} \right) \quad (12)$$

onde  $R_{t,cil.} = \frac{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{2\pi Lk}$  é a resistência térmica à condução na camada cilíndrica do disco.

Resolvendo em ordem à condutibilidade térmica, para cada par de valores de temperatura,

$$k = \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \frac{q}{2\pi L(T_i - T_o)} \quad (13)$$

Uma alternativa a esta abordagem seria considerar que o perfil de temperatura em camadas cilíndricas é uma função logarítmica da forma

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (14)$$

Os valores de  $C_1$  e  $C_2$  podem ser obtidos analiticamente como  $C_1 = \frac{\bar{T}_i - \bar{T}_o}{\ln(r_i/r_o)}$  e  $C_2 = \bar{T}_o - \ln(r_o)$ . Usando os valores de temperatura e distâncias, ou fazendo um ajuste dos pontos experimentais a esta função, pela Lei de Fourier

$$k = \frac{q}{2\pi L C_1} \quad (15)$$

uma vez que  $A = 2\pi rL$  e  $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{C_1}{r}$ .

Para realizar a experiência, o potenciômetro foi regulado para três potências de aquecimento distintas (10, 20 e 30 Watts) seguindo o seguinte procedimento experimental:

1. Ligar o módulo de aquecimento radial à tomada de alimentação
2. Ligar o sistema de arrefecimento com água
3. Ligar o interruptor do controlador da bancada experimental
4. Ligar ambas as unidades de aquisição de dados ao computador
5. Abrir a aplicação PicoLog no computador e iniciar o processo de aquisição de dados
6. Regular o potenciômetro para a posição desejada
7. Esperar tempo suficiente para que os valores de temperatura estabilizem e seja atingido o regime permanente
8. Registrar os valores de temperatura obtidos
9. Processar os dados para calcular a condutibilidade térmica média com respectiva análise de propagação de erros

### 2.2.3. Experiência 3

Do contacto térmico entre duas superfícies advém sempre alguma perda de eficiência na condução de calor, que se manifesta através de uma resistência térmica de contacto. Essa resistência térmica pode ser observada como uma descontinuidade no perfil de temperatura.

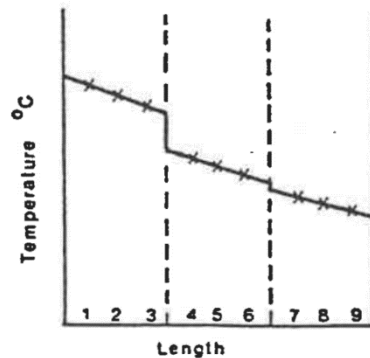


Figura 2.11. Influência da resistência térmica de contacto

Na Figura 2.11 pode observar-se o gradiente térmico de uma barra dividida em três partes quando comparada com uma barra sólida do mesmo material descrita na Figura 2.8. Em cada um dos pontos de contacto entre superfícies, pode observar-se uma diminuição súbita da temperatura, concordante com a existência de uma resistência térmica de contacto. Dos vários factores envolvidos na condução de calor através do contacto térmico entre duas superfícies, pretende-se avaliar o efeito da utilização de pastas térmicas. Para tal, idealizou-se uma experiência composta por 2 ensaios onde cada um inclui dois módulos em que a única variável será o contacto entre esses. Para realizar as experiências, o potenciómetro foi regulado para três potências de aquecimento distintas (10, 20 e 30 Watts) seguindo o seguinte procedimento experimental:

1. Aplicar as condições de contacto pretendidas
2. Verificar o acoplamento dos módulos
3. Ligar o módulo de aquecimento à tomada de alimentação
4. Ligar o sistema de arrefecimento com água
5. Ligar o interruptor do controlador da bancada experimental

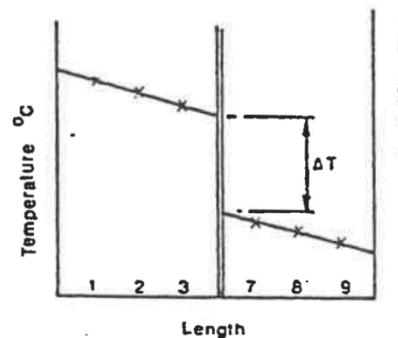
6. Ligar ambas as unidades de aquisição de dados ao computador
7. Abrir a aplicação PicoLog no computador e iniciar o processo de aquisição de dados
8. Regular o potenciómetro para a posição desejada
9. Esperar tempo suficiente para que os valores de temperatura estabilizem e seja atingido o regime permanente
10. Registrar os valores de temperatura obtidos
11. Utilizar os valores para calcular a condutibilidade térmica

O primeiro ensaio serve de controlo e considera uma força de aperto inicial definida pelo equipamento, sem qualquer tipo de pasta térmica de contacto. Assim, com este ensaio estabelece-se o que se considera como o valor base da resistência térmica de contacto entre as superfícies. No segundo ensaio aplica-se a pasta térmica de contacto com o propósito de diminuir o efeito da resistência térmica de contacto. Os dados adquiridos no segundo ensaio devem refletir uma melhoria significativa na condução de calor através das duas superfícies.

#### **2.2.4. Experiência 4**

Nesta experiência, o objetivo consiste em observar de que forma a presença de uma camada de material isolante entre duas superfícies influencia o gradiente de temperatura quando imposto um fluxo de calor uniformemente distribuído. Teoricamente, tal como o mau contacto entre as superfícies, a introdução de uma camada de material isolante introduz uma resistência térmica significativa entre os módulos, dificultando a passagem do calor. Como tal, a sua influência poderá ser observada através de uma queda significativa da temperatura entre os módulos.

Como se pode observar através da Figura 2.12, o efeito de um material isolante é muito mais evidente do que o de uma resistência térmica de contacto.



**Figura 2.12.** Influência da presença de um material isolante

Com o objetivo de simular tal situação, foram realizados dois ensaios em condições de temperatura idênticas, diferindo apenas no material existente entre as duas superfícies a contactar. No primeiro ensaio, utiliza-se uma pasta térmica, de modo a estabelecer uma linha de base para aquilo que seria considerado um bom contacto térmico. De seguida, coloca-se um disco de papel entre as duas superfícies de modo a introduzir uma camada de material isolante e estudar os efeitos dessa resistência térmica sobre o perfil de temperatura. Espera-se medir uma variação súbita da temperatura na passagem entre módulos. Para realizar a experiência, o potenciômetro foi regulado para três potências de aquecimento distintas (10, 20 e 30 Watts) seguindo o seguinte procedimento experimental:

1. Garantir que estão correctamente definidas as condições de contacto
2. Garantir que os módulos estão acoplados correctamente
3. Ligar o módulo de aquecimento à tomada de alimentação
4. Ligar o sistema de arrefecimento com água
5. Ligar o interruptor do controlador da bancada experimental
6. Ligar a unidade de aquisição de dados ao PC
7. Abrir a aplicação PicoLog no computador e iniciar o processo de aquisição de dados
8. Regular o potenciômetro para a posição desejada
9. Esperar tempo suficiente para que os valores de temperatura estabilizem e seja atingido o regime permanente
10. Registrar os valores de temperatura obtidos
11. Utilizar os valores para calcular a condutibilidade térmica do material isolante medindo com um paquímetro a espessura do disco usado

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção apresentam-se os resultados das experiência e respectiva discussão sob o ponto de vista pedagógico e de como se integram no ciclo de aprendizagem de David Kolb. Nas seguintes subsecções, serão apresentados os resultados obtidos para a distribuição de temperatura ao longo dos pontos de medida e respectiva evolução. Inclui-se, ainda, a indicação da temperatura ambiente. As curvas respeitam o código de cores que se encontra definido da seguinte maneira:

**Vermelho** – Módulo de Aquecimento

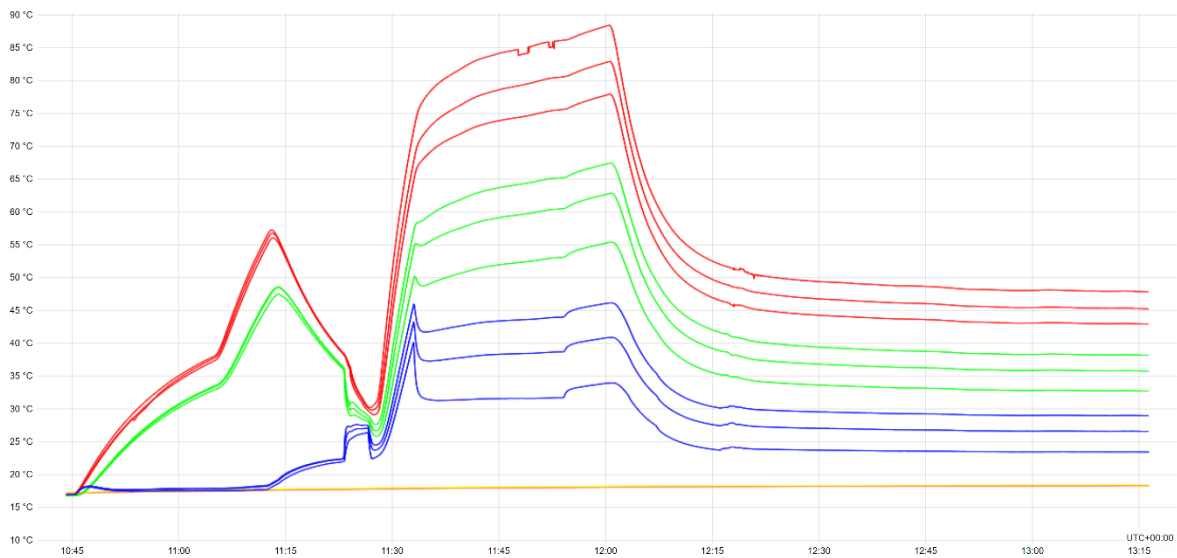
**Verde** – Módulo de Testagem

**Azul** – Módulo de Arrefecimento.

**Amarelo** – Temperatura Ambiente

#### 3.1. Condução de calor linear

A Figura 3.1 apresenta os dados exploratórios da experiência de condução linear provenientes do PicoLog. Considerando o tempo em que cada grupo de alunos pode realizar uma experiência, a evolução da temperatura nos diversos pontos indica a necessidade de uma preparação prévia da experiência. As duas primeiras evoluções de temperatura oferecem uma variação não-linear típica de um processo transiente de condução de calor, sendo o aumento mais acentuado nos termopares mais próximos da fonte de calor (vermelho), e menos acentuado quanto mais perto da fonte de arrefecimento (verde). Após a imposição de duas potências mais baixas, conclui-se que a melhor estratégia na realização da experiência seria usar a potência máxima da instalação, para obter um aumento súbito dos valores de temperatura acima dos patamares esperados para regime permanente, e procurar os valores da condição de regime permanente para uma determinada potência térmica imposta ( $q$ ) por arrefecimento.



**Figura 3.1.** Aquecimento módulo linear 20W ver

Uma vez atingido o regime permanente, a partir dos dados exportados obtêm-se as temperaturas médias (aritmética) dos últimos 10min em cada posição, cuja incerteza com um Intervalo de Confiança (IC) de 95%,  $\varepsilon_T = 1.96 \frac{\sigma_T}{\sqrt{N}}$  obtida a partir do desvio padrão dos valores ( $\sigma_T$ ) numa amostra de  $N = 600$  dados, considerando a frequência de aquisição de 1 Hz, resultou, nesta experiência, em valores de  $< 0.065\%$ , revelando-se marginal. A Figura 3.2 apresenta os valores da temperatura média para as várias localizações ao longo dos módulos. O gradiente de temperatura provém de uma interpolação linear, sendo a incerteza obtida a partir de

$$\varepsilon_{\nabla_x T} = \sqrt{\left(\frac{1}{N-2}\right) \cdot \frac{(\bar{T} - T(x))^2}{(x - \bar{x})^2}} \quad (14)$$

~

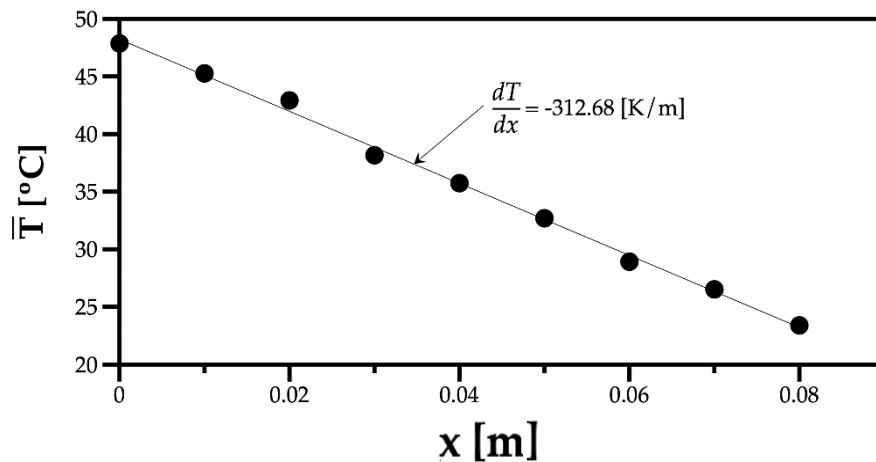


Figura 3.2. Gradiente de temperaturas linear a 20W

Para a potência térmica de 20 W considerada, e aplicando a Lei de Fourier, a condutibilidade térmica obtida para o latão foi de  $k = 130.3 \pm 2.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , estando acima dos valores tabelados na gama  $109\text{-}111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$  de acordo com (Gustavsson et al., 1994). Porém, numa análise preliminar de sensibilidade, bastaria que a potência fornecida fosse 15% inferior e o valor estaria dentro deste intervalo, pelo que se recomenda uma calibração do potenciômetro, o que acabou por ficar fora do âmbito desta dissertação.

Ainda, nota-se que entre os módulos em  $x = 25, 55 \text{ [mm]}$ , a diferença observada nos declives das rectas produzidas apenas com os termopares de cada módulo poderão dar origem a um efeito da resistência térmica de contacto entre os 3 módulos experimentais. A Figura 3.3 mostra o efeito dessas resistências térmicas que representam 8.2% e 4.1% da resistência térmica total do conjunto dos três módulos obtida com  $(T(0\text{mm}) - T(0.08\text{mm}))/q = 1.215 \text{ K/W}$ .

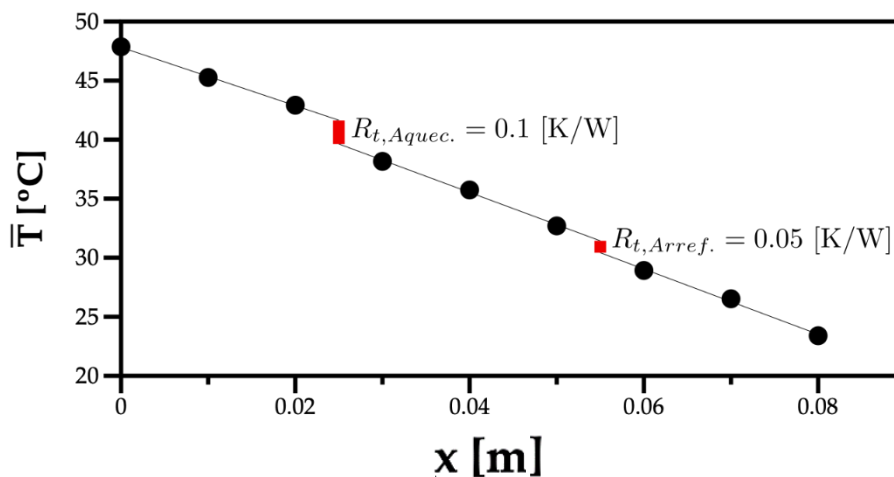
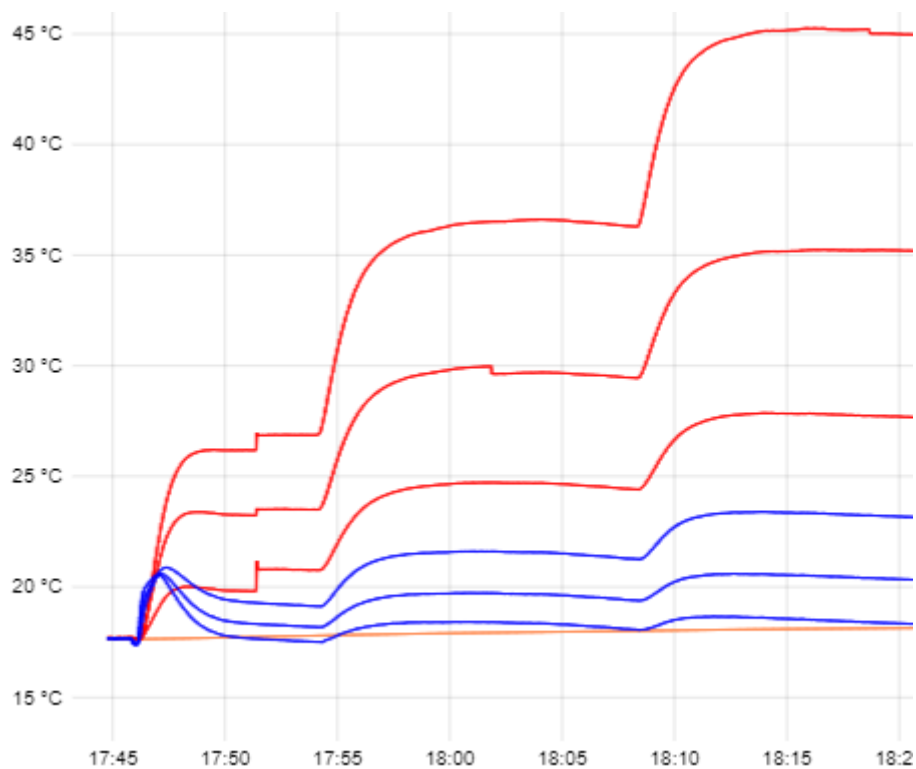


Figura 3.3. Resistência térmicas estimadas entre os módulos com uma potência dissipada de 20W .



### 3.2. Condução radial de calor

A Figura 3.4, retirada do software Picolog, representa a evolução de temperaturas quando o módulo radial é aquecido com respectivamente 10, 20 e 30 W. Ao contrário do anterior, este módulo tem a particularidade de aumentar a área de dissipação de calor à medida que os pontos medidos se afastam da fonte de calor no centro.



**Figura 3.4.** Aquecimento do módulo radial às diferentes potências

Na Figura 3.5 apresentam-se os valores médios de temperatura obtidos experimentalmente e respectivo ajuste da curva do perfil de temperatura para cada potência em ordem à distância. A incerteza máxima percentual obtida é de 0.03%. É de notar que a temperatura média no ponto próximo da periferia é próxima para as diferentes potências térmicas. Apesar de contra-intuitivo, a equação (15) mostra como a potência térmica ( $q$ ) é diretamente proporcional a  $C_1$ , mas não a  $C_2$ , pelo que uma alteração de  $q$ , consequentemente, induz uma alteração em  $C_1$ , mas não em  $C_2$ . Como  $C_2$  depende apenas da temperatura na periferia e a respectiva posição, e em  $C_1$  também a posição inicial se

mantém, só  $T(r_i)$  poderá alterar-se, como demonstrado nos resultados da Figura 3.5. Este raciocínio enquadra-se nos passos 2 e 3 do ciclo de aprendizagem experiencial e apesar do seu maior grau de complexidade, liga a teoria à prática.

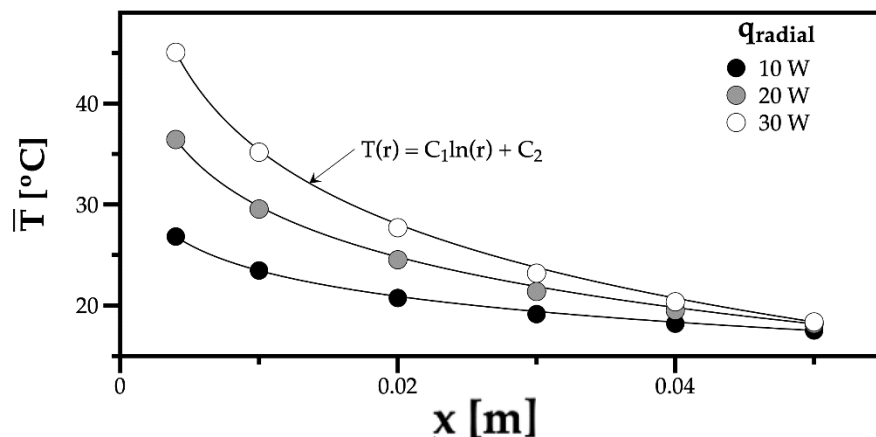


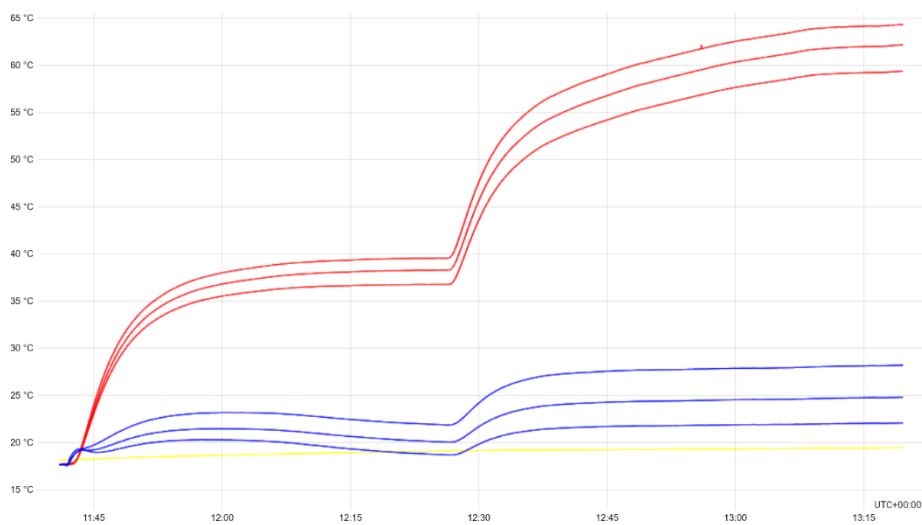
Figura 3.5. Temperatura do módulo radial em ordem á distância

O valor da condutibilidade térmica nesta experiência a partir da equação (15) resulta em  $k = 147.1 \pm 4.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ , acima do esperado para o latão. O valor está acima do previsto, mas também acima do valor obtido na experiência anterior, pelo que seria de averiguar a qualidade do latão usado, bem como verificar o fluxo de calor imposto, de modo a poder comparar com valores tabelados. Contudo, independentemente das razões apresentadas para estas diferenças, do ponto de vista pedagógico da apreensão dos conceitos da condução, as experiências não são comprometidas.

### 3.3. Efeito da resistência térmica de contacto

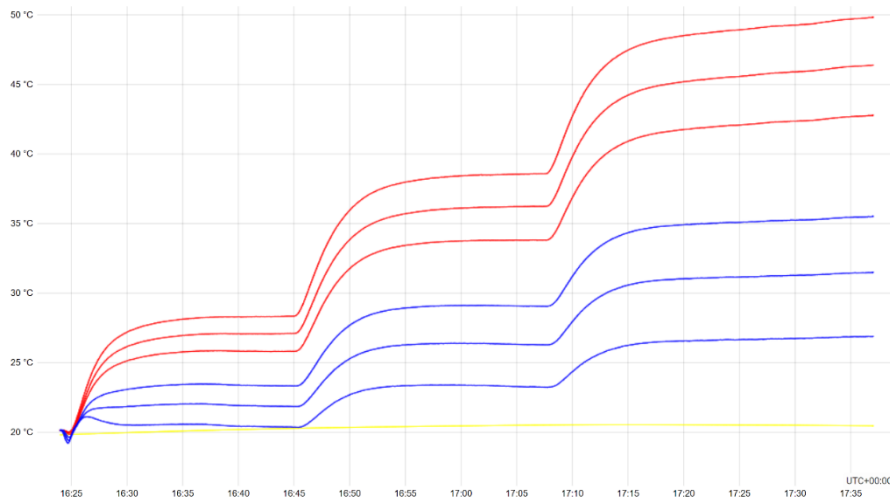
Na experiência 3 realiza-se o aquecimento de uma configuração da instalação didática em que se junta o módulo de aquecimento ao de arrefecimento sem o módulo central. Num primeiro ensaio, não se coloca qualquer pasta térmica e a força de aperto entre os módulos é mínima, ou seja, estão somente em contacto. Para as potências de ensaio indicadas de 10 e 20 W, a figura mostra a diferença entre os valores de temperatura nos módulos. Nomeadamente, nota-se que no caso da potência de 10 W, poderá ter havido alguma dilatação inicial e uma vez que o módulo de aquecimento atinge o regime permanente, o módulo de arrefecimento prevalece e começa a arrefecer. Este fenómeno

deixa de se observar no caso da potência térmica imposta de 20 W como se pode constatar na Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Aquecimento do módulo linear com mau contacto entre as superfícies

No segundo ensaio desta experiência relacionada com as resistências de contacto, além do aperto maior colocou-se pasta térmica entre o módulos. A Figura 3.7 mostra para três potências (10, 20 e 30W) os resultados obtidos. As diferenças são notórias quando comparadas com a situação anterior.



**Figura 3.7.** Aquecimento do módulo linear com pasta térmica de contacto

Extraíndo dos gráficos os valores de temperatura para um intervalo de tempo em que o regime se considera permanente, obtiveram-se os valores para as temperaturas médias nas três localizações em cada módulo –  $(x_0, x_1, x_2)$  para o módulo de aquecimento e  $(x_3, x_4, x_5)$

para o de arrefecimento –, a partir da qual se extrapola o valor da temperatura do respectivo módulo à interface de contacto. A Figura 3.8 mostra os resultados obtidos para os valores médios da temperatura nas várias localizações normalizados pelo valor máximo em  $x = 0$  mm. Assinala-se ainda o decréscimo causado pela resistência térmica de um “mau” contacto (MC) para as duas potência térmicas testadas, bem como o valor médio obtido a partir destes dois casos.

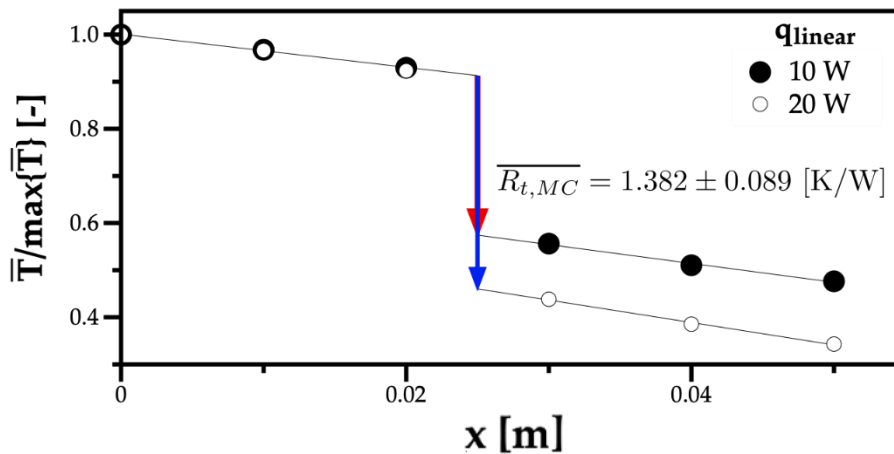


Figura 3.8. Valores médios de temperatura nas várias localizações normalizados pelo valor máximo em  $T(0)$  com os módulos encostados.

Quando se realiza um maior aperto aos módulos e se coloca pasta térmica para preencher os espaços intersticiais e diminuir a resistência de contacto, o efeito é notório na Figura 3.9, assim como o decréscimo da resistência térmica de contacto em uma ordem de grandeza.

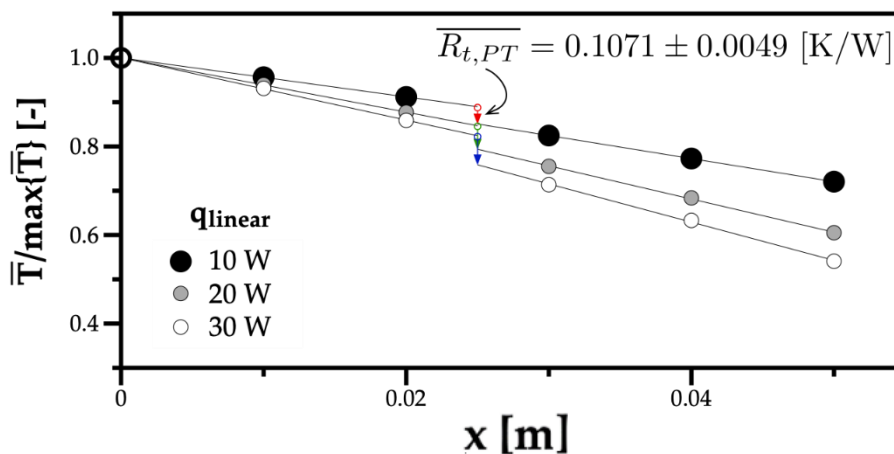


Figura 3.9. Valores médios de temperatura nas várias localizações normalizados pelo valor máximo em  $T(0)$ . com pasta térmica de contacto

Esta experiência mostra claramente o efeito das resistências térmicas de contacto sobre a transmissão de calor por condução, mas pode ser aliada à teoria para obter, também, a condutibilidade térmica. Neste caso, a resistência térmica equivalente entre  $T(0\text{mm})$  e  $T(50\text{mm})$  inclui a resistência térmica de contacto,  $R_{t,c}$ , e corresponde a

$$R_{t,Eq} = \frac{x_2 - x_0}{k A} + R_{t,c} + \frac{x_5 - x_3}{k A} \quad (15)$$

que, resolvendo em ordem a  $k$ , resulta nos valores indicados na Tabela 3.1 que compara esta experiência com a primeira. Apesar das diferenças observadas, a ordem de grandeza é semelhante e não inviabiliza a aprendizagem do efeito das resistências térmicas de contacto.

Ensaio	Módulo linear	Mau contacto	Pasta térmica
$k$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$130 \pm 2.80$	$144.6 \pm 10.5$	$153.8 \pm 4.04$

**Tabela 3.1.** Comparação dos valores para a condutibilidade térmica obtidos pelas experiências 1 e 3.

### 3.4. Efeito de materiais isolantes

Na Figura 3.10, pode observar-se o aquecimento do módulo linear com uma folha de papel de 80g, cuja espessura é de 100 $\mu$ m, para as três potências de 10, 20 e 30 W.

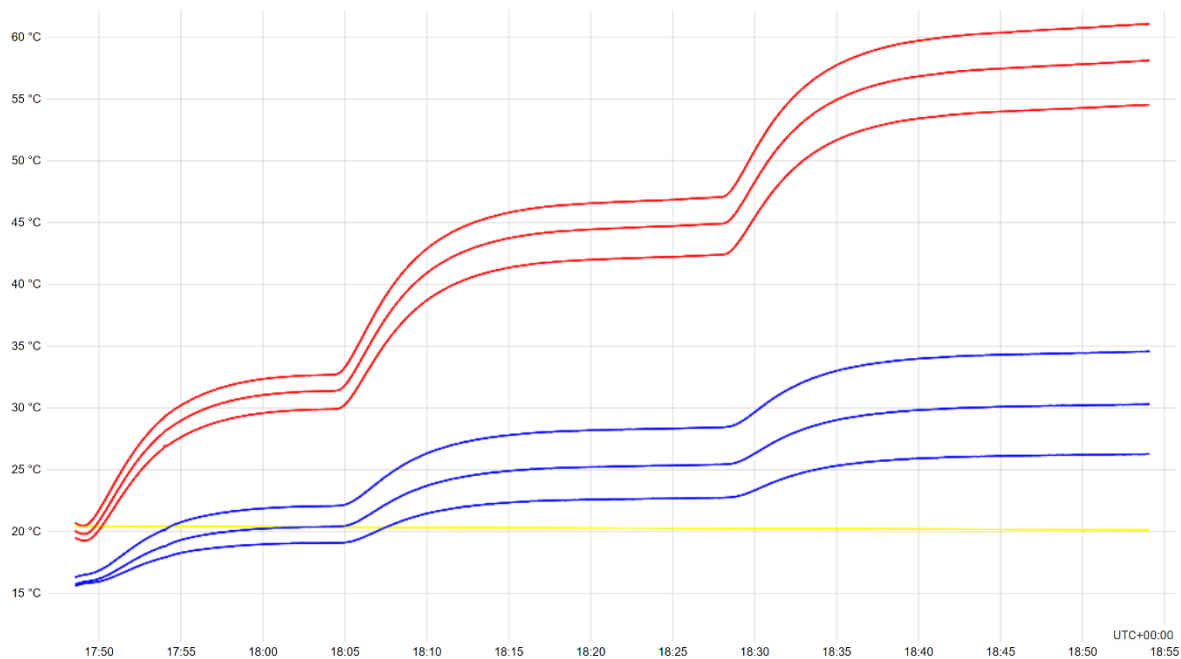


Figura 3.10. Aquecimento do módulo linear com o pedaço de papel

O procedimento de processamento dos dados é semelhante ao realizado na experiência 3, pelo que a partir da interpolação linear dos valores médios de temperatura nas três localizações dos módulos de aquecimento e arrefecimento, a resistência térmica induzida pela presença do papel resulta em  $R_{t,Papel} = 0.59 \pm 0.06$  K/W, obtendo-se um valor para a condutibilidade térmica de  $k = 0.347 \pm 0.034$  ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ ), ou seja, um valor da mesma ordem de grandeza, mas 3 vezes superior ao esperado<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dada a incerteza nos valores da potência térmica indicados, procurou-se realizar uma calibração. Porém, na adaptação da instrumentação necessária, o potenciômetro danificou-se, impedindo a realização da mesma.

### 3.5. Relação com o ciclo de aprendizagem

Nesta secção final analisamos a relação entre o ciclo de aprendizagem referido na introdução e as experiências da instalação didáctica modificada. O modelo da aprendizagem experiencial de Kolb foi concebido para ser aplicado a qualquer área do conhecimento, desde que sejam seguidos os 4 passos do ciclo de aprendizagem. De modo a integrar esse ciclo no ensino de transmissão de calor por condução foi sugerida a seguinte estratégia:

- O passo 1 – *experiência concreta* – tem como objetivo levar o aluno a “sentir” o fenómeno que se pretende estudar. Para isso, a simples experiência de colocar a palma de uma das mãos sobre uma superfície metálica, e outra sobre o tampo de madeira de uma mesa, seria o suficiente para entender que a quantidade de calor transmitida é diferente sabendo que a temperatura de ambas é a mesma em equilíbrio com o ambiente. O aluno nesta experiência relata a sensação que uma das superfícies se encontra mais fria do que a outra apesar de isso não ser verdade.
- Após explicar a razão de ambas as superfícies se encontrarem à temperatura ambiente, perguntar-se-á quais as razões físicas do fenómeno experienciado e enquadrar a explicação no mecanismo de condução de calor por difusão quando a estrutura molecular dos materiais não tem qualquer velocidade. Estas perguntas têm como objetivo desconstruir possíveis concepções erradas possuídas pelos alunos.
- Segue-se o passo 2 que tem como objetivo a visualização da evolução da temperatura do fenómeno a ser estudado. Como mencionado no capítulo introdutório, a condução de calor não pode ser observada mas antes os seus efeitos. É neste passo que se encontra o valor da actualização feita à instalação didáctica preparada para realizar experiências de transmissão de calor através de 4 tipos de experiências que conferem uma visão ampla dos efeitos dos parâmetros envolvidos neste fenómeno. As experiências criam uma memória dos fenómenos físicos, induzindo familiaridade com os conceitos ao nível do tacto e da visão.

- Despertado o interesse dos alunos, segue-se o passo 3, que consiste a explicação teórica e analítica de todo o processo. As expressões matemáticas tornam-se a linguagem universal que descreve o que se observou, nomeadamente a equação geral da condução de calor, a lei de Fourier e conceitos como condutibilidade térmica, resistência térmica de contacto e materiais isolantes. Esta parte é de extrema importância para a total compreensão do assunto a estudar e requer explicação de um tutor instruído e prática deliberada por parte daqueles que pretendem realmente entender.
- Por forma a finalizar o ciclo de aprendizagem experiencial, o passo 4 consiste na experimentação prática. Nesta fase, os alunos deverão realizar experiências que explorem de outras maneiras os fenómenos estudados no presente projeto. A aplicação dos conhecimentos a novas situações é a última peça fundamental e indispensável na conclusão ciclo de aprendizagem.

Finalmente, concluídos os 4 passos, o aluno aliou a teoria à prática através de uma aprendizagem experiencial onde as fórmulas não foram memorizadas, mas aplicadas, consolidando na memória a essência dos conceitos.



---

## 4. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

A aprendizagem é um processo que envolve todas as dimensões da experiência humana. A importância do processo experiencial encontra-se explicitado naquilo que são considerados 2 dos 4 passos do ciclo de aprendizagem conferindo-lhe, por isso, o estatuto de pilar essencial no processo de transformação da experiência e integração de conhecimento. Esta abordagem serve como proposta de inovação do método de ensino em transmissão de calor, recorrendo a experiências que sintetizam a teoria e a prática de engenharia. As instalações didáticas servem este propósito. Esta dissertação incide sobre a modernização de uma instalação de demonstração dos fenómenos de transmissão de calor por condução, integrando o tópico de engenharia no quadro de uma aprendizagem experiencial, como proposta por David Kolb, e respectivo ciclo de aprendizagem.

Os conceitos explorados pela instalação incluem a condução uni-dimensional, o análogo elétrico, a condutibilidade térmica, o efeito da geometria na condução de calor, as resistências de contacto e os materiais isolantes. A maior limitação do aparato experimental que podem levar a valores para a condutibilidade térmica diferentes dos tabelados foi a quantificação da potência térmica, que exige calibração em trabalho futuro. Contudo, verificou-se que essa não compromete a ordem de grandeza dos valores esperados, ou altera a compreensão dos comportamentos térmicos observados.

Como trabalhos futuros, sugere-se a calibração da potência térmica imposta nos módulos de aquecimento, a melhoria da secção central da configuração linear, minimizando as perdas de calor ao longo do módulo. Por fim, sugere-se o estudo da preparação de uma experiência que permita estudar a condução de calor em regime transiente uma vez que o sistema de aquisição de dados possui resolução temporal para que essa ocorra em tempo real.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Sanea, S. A., & Zedan, M. F. (2011). Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy*, 88(9), 3113–3124

Fourier, J. (1878). *The analytical theory of heat*. The University Press

Cengel, Y. (2003). *Heat and Mass Transfer: A practical approach*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Chung, D. D. L. (2001). Thermal interface materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 10(1), 56–59.

Cooper, M. G., Mikic, B. B., & Yovanovich, M. M. (1969). Thermal contact conductance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12(3), 279–300. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90011-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90011-8)

Dewey, J. (1938). *Experience and Education*. New York: Mac-millan.

Donaldson, E., Braun, E., & Muscari, J. (1965). Vacuum as an Environment and Insulator. *IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging*, 1(3), 32–38.

dos Santos, W. N. (2002). O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície (The hot wire method: the hot wire parallel technique and the hot wire surface technique). In *Cerâmica* (Vol. 48, Issue 306).

Gustavsson, M., Karawacki, E., & Gustafsson, S. E. (1994). Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors. *Review of Scientific Instruments*, 65(12), 3856–3859.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6). Wiley New York.

Jamshidinia, M., & Kovacevic, R. (2015). The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(1), 014003.

Kolb, D. (2003). The process of experiential. *Adult Continuing Educ. Teach. Learn. Res*, 4, 159.

Kolb, D. A. (n.d.). *Experiential Learning: Experience As The Source Of Learning And Development* Executive skills of Family Medicine Faculty View project Learning Sustainability View project. <http://www.learningfromexperience.com/images/uploads/process-of-experiential-learning.pdf>!

Lewin, K. (1942). Field theory and learning. In *The forty-first yearbook of the National Society for the Study of Education: Part II, The psychology of learning.* (pp. 215–242). University of Chicago Press. <https://doi.org/10.1037/11335-006>

Millat, J., Dymond, J. H., de Castro, C. A. N., & Wakeham, W. A. (1996). *Transport properties of fluids.* Cambridge University Press Cambridge.

Piaget, J. (1952). *The Origins of Intelligence in Children* New York: Int. Univ. Press.

Poredoš, A., & Kitanovski, A. (2002). Exergy loss as a basis for the price of thermal energy. *Energy Conversion and Management*, 43(16), 2163–2173. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00156-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00156-X)

Ramires, M. L. v, Nieto de Castro, C. A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M. J., & Wakeham, W. A. (1995). Standard reference data for the thermal conductivity of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 24(3), 1377–1381.

Sarton, G., Mayer, J. R., Joule, J. P., & Carnot, S. (1929). The discovery of the law of conservation of energy. *Isis*, 13(1), 18–44.

Tuckerman, D. B., & Or Publisher: Lawrence Livermore National Laboratory Livermore CA 9 Report Number: UCRL-, Univ. of Cal. (1984). *Heat-Transfer Microstructures for Integrated Circuits.*

Xu, W., Zhu, L., Cai, Y., Zhang, G., & Li, B. (2015). Direction dependent thermal conductivity of monolayer phosphorene: Parameterization of Stillinger-Weber potential and molecular dynamics study. *Journal of Applied Physics*, 117(21), 214308.