

**Estudo experimental do comportamento
térmico de uma superfície alhetada exposta
à circulação forçada de ar**
(Versão final após defesa)

Tomás Lourenço Rolo de Souza

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Mestrado Integrado)

Orientador: Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva
Coorientador: Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva

novembro 2021

Agradecimentos

Prestar o meu mais profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, à família.

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Dinho da Silva, pelo tempo dedicado, pelos conhecimentos transmitidos e supervisão, permitindo o desenvolvimento desta dissertação com o maior rigor possível.

Ao meu coorientador, Professor Doutor André Resende Rodrigues da Silva, pelos ensinamentos ao longo do meu percurso académico e, agora, pela disponibilidade para coorientar esta dissertação.

Ao Professor Hélder Correia, pela ajuda no trabalho desenvolvido no FabLab.

Ao Sr. João Correia, pela atenção, pelos conselhos transmitidos e disponibilidade demonstrada ao longo de todo o desenvolvimento da unidade experimental.

Gostaria de deixar uma palavra de apreço ao Martim Aguiar, por todos os conhecimentos transmitido sobre o processo de impressão 3D.

Por fim, mas com igual valor a todos os amigos que me acompanharam nesta jornada.

Resumo

Desde a revolução industrial, no século XIX, até aos dias de hoje, a temática da dissipação de calor tem vindo a demonstrar um papel de elevada importância no desempenho de qualquer tipo de máquina, evitando sobreaquecimentos danosos que podem resultar numa ameaça à vida do ser humano. Assim, através do desenvolvimento científico temos acesso às mais variadas formas de arrefecimento, com recurso a meios gasosos ou líquidos em cooperação com superfícies permutadoras, como é o caso das alhetas.

Nos primórdios da indústria aeronáutica foi crucial o arrefecimento dos motores a *pistons*, principalmente devido ao desenvolvimento de maiores potências em aeronaves militares e de competição. Com o avanço da tecnologia e com o aparecimento dos motores de turbinas a gás, a preocupação constante de arrefecimento tornou-se quase inexistente, passando a ser recorrente a aplicação de permutadores de calor de superfície em elementos da aviónica do avião. Atualmente, nos mais recentes motores, como por exemplo, o *Turbo Fan de Ultra High Bypass*, com menores consumos, permitiram uma diminuição num dos principais absorvedores de calor, o combustível, voltando a existir uma aplicação de permutadores de calor agora para arrefecimento do óleo.

Na presente dissertação desenvolve-se um trabalho experimental na ótica de melhorar o desempenho térmico de uma superfície com alhetas. Para isso, implementa-se o conceito de redireccionamento do escoamento para os canais das alhetas, com recurso a superfícies defletores sobrepostas à superfície de alhetas. O estudo faz uma comparação entre o desempenho de seis superfícies diferentes para a situação com e sem defletores.

Os resultados demonstram um benefício geral para todas as superfícies ensaiadas. Inclusive para gamas de velocidade diferentes. Verifica-se que para situações em que o escoamento é substancialmente mais rápido também o efeito dos defletores é mais notório.

Palavras-chave

Superfícies alhetadas; convecção forçada; coeficiente convectivo; fonte de calor

Abstract

Since the industrial revolution, in the 19th century, until nowadays, the subject of heat dissipation has demonstrated a highly important role in the performance of any type of machine, avoiding harmful overheating that can result in a threat to human life. Thus, through scientific development we have access to various forms of cooling, using gaseous or liquid media in cooperation with heat exchanger surfaces, as is the case of fins. In the early days of the aviation industry, it was crucial to cool the piston engines, mainly due to the development of higher power military and competition aircrafts. With the advance of technology and the appearance of gas turbine engines, the constant concern for cooling became almost non-existent, and the application of surface heat exchangers in the aircraft avionics elements became recurrent. Currently, in the most recent engines, as for example, the Turbo Fan Ultra High Bypass, with lower consumption, allowed a decrease in one of the main heat absorbers, the fuel, being again an application of heat exchangers now for oil cooling. In the present dissertation an experimental work is developed in order to improve the thermal performance of a finned surface. For that, the concept of redirecting the flow to the fin channels is implemented, using deflector surfaces superimposed on the finned surface. The study compares the performance of six different surfaces for the situation with and without deflectors. The results show an overall benefit for all surfaces tested. Even for different speed ranges. It is found that for situations where the flow is substantially faster the effect of the deflectors is also more noticeable.

Keywords

Finned surfaces;forced convection;convective coefficient;heat source

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Perspetiva geral.....	1
1.2.	O problema em estudo e a sua relevância	2
2.	Revisão bibliográfica.....	3
2.1.	Objetivos	7
2.2.	Estrutura.....	8
3.	Fundamentos teóricos	9
3.1.	Introdução	9
3.2.	Modos de transmissão de calor: convecção forçada.....	9
3.3.	Superfícies com alhetas	12
3.4.	Interação entre alheta e escoamento	14
4.	Instalação experimental	19
4.1.	Introdução	19
4.2.	Esquema de Conjunto.....	19
4.3.	Equipamento Experimental.....	21
4.3.1.	Superfícies alhetadas.....	21
4.3.2.	Defletores	26
4.3.3.	Conduta de ar	28
4.3.4.	Ventilador.....	30
4.3.5.	Fonte de calor.....	30
4.4.	Instrumentação.....	32
4.4.1.	Regulador de Velocidade.....	32
4.4.2.	Termopares	33
4.4.3.	<i>Datalogger</i> de temperatura.....	34
4.4.4.	Anemómetro de fio quente.....	35
4.4.5.	Fontes de energia	37
5.	Análise e Discussão de Resultados	39
5.1.	Procedimento Experimental.....	39
5.2.	Ensaio Realizados	46
5.2.1.	Ensaio sem defletores.....	46
5.2.2.	Ensaio com defletores.....	52
5.2.2.1.	Defletores com 30 graus de inclinação.....	52
5.2.2.2.	Defletores com 45 graus de inclinação.....	54
5.2.3.	Caso F.....	55
6.	Conclusão.....	61

6.1. Recapitulação	61
6.2. Sugestão para trabalho futuro	62
Bibliografia	63

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Aplicação de superfícies alhetadas em motores <i>Turbo Fan</i> , adaptado de (Sakuma et al., 2017).	5
Figura 2.2 - Esquema do trabalho experimental de <i>Elsayed, Meshaly et al.</i> , adaptado de Shaalan, Saleh, Mesalhy, & Elsayed, 2012.....	6
Figura 3.1 -Gráfico do rendimento de uma alheta, adaptado de Bergman et al., (2011).	13
Figura 3.2 - Ilustração do efeito <i>bypass</i> e perda, adaptado de Liu et al., 2019.....	15
Figura 3.3 - Legenda das dimensões da superfície com alhetas (H- altura, L- Comprimento, S- espaçamento, t – espessura).....	15
Figura 4.1 - Esquema do conjunto experimental.....	20
Figura 4.2 - Esquema da secção de teste.	20
Figura 4.3 - <i>Setup</i> experimental.	21
Figura 4.4 - Bloco de alumínio antes de ser maquinado.	22
Figura 4.5 - Superfície alhetada B.	23
Figura 4.6 - Identificação gráfica do rendimento (linha preta), adaptado de (Bergman et al., 2011).....	25
Figura 4.7 – (a) Superfície A; (b) Superfície B; (c) Superfície C; (d) Superfície D; (e) Superfície E; (f) Superfície F.....	26
Figura 4.8 – (A) Defletores de 6 mm de largura com 30° inclinação (vista isométrica); (B) Defletores de 6 mm de largura com 45° de inclinação (vista isométrica); (C) Defletores de 12 mm de largura e 30° inclinação.	27
Figura 4.9 - Comparação dos dois conjuntos de placas defletoras.....	28
Figura 4.10 - Vista isométrica do desenho computacional.....	28
Figura 4.11 - Conduta de ar.....	29
Figura 4.12 - Ventilador acoplado à conduta de ar.....	30
Figura 4.13 - Instalação da fonte de calor na conduta com isolamento em corticite (vista lateral).....	31
Figura 4.14 - Uniformizador de escoamento.	31
Figura 4.15 - Apoio lateral dos defletores.	32
Figura 4.16 - Regulador de velocidade.	33
Figura 4.17 - Esquema do posicionamento dos termopares.....	34
Figura 4.18 - <i>Datalogger</i> de temperatura <i>PCE-T 1200</i>	35
Figura 4.19 - (A) Leitor do anemómetro; (B) Sensor.	36
Figura 4.20 - Esquema da instrumentação da velocidade e temperatura da conduta.	37
Figura 4.21 - Fonte de alimentação do ventilador.	37
Figura 4.22 - Fonte de energia para a placa quente.	38
Figura 5.1 - Vista superior da placa com oito termopares.	39
Figura 5.2 - Comparação da evolução dos dois conjuntos de termopares.	40
Figura 5.3 - Teste experimental, com linhas, da perturbação do escoamento.	40
Figura 5.4 - Termopares para medição da temperatura de saída do escoamento.	41
Figura 5.5 - Gama de velocidades do ventilador.....	42
Figura 5.6 - Ensaio para teste da fonte de calor.	42
Figura 5.7 – Unidade experimental.	43
Figura 5.8 - Ensaio da superfície A: (A) sem defletores e (B) com defletores.....	45
Figura 5.9 - Evolução das temperaturas médias ao longo do tempo durante o ensaio 6.	46
Figura 5.10 - Destaque do último parcial de 20 minutos de ensaio.	47
Figura 5.11 - Superfícies alhetadas D e F.	50

Figura 5.12 - Valores do coeficiente convectivo para ensaio, sem defletor, das superfícies alhetadas.	50
Figura 5.13 - Superfícies alhetadas B e C.....	51
Figura 5.14 - Número de <i>Nusselt</i> para cada superfície sem defletores.	52
Figura 5.15 - Comparação do coeficiente convectivo para situação sem defletor (-) e com defletor (30°).....	53
Figura 5.16- Comparação do coeficiente convectivo para situação com defletor (30°) e com defletor (45°).....	55
Figura 5.17- Sequência de ensaios da superfície F: (A) sem defletores, (B) com defletores de 6 mm e (C) com defletores de 12 mm.	56
Figura 5.18- Comportamento da superfície F aos ensaios desenvolvidos.....	58
Figura 5.19- Relação do número de <i>Nusselt</i> com o número de <i>Reynolds</i>	59

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Intervalo de valores ótimos.	23
Tabela 4.2 - Protótipos para estudo experimental.	23
Tabela 4.3 - Características da superfície de alhetas B.	24
Tabela 4.4 - Características dimensionais da conduta de ar.	29
Tabela 4.5 - Características principais do ventilador <i>Sunon</i>	30
Tabela 4.6 - Características do <i>datalogger</i> de temperatura.	35
Tabela 4.7 - Características do anemómetro.	36
Tabela 5.1 - Características dos ensaios realizados.	44
Tabela 5.2 - Interpolação linear das características do ar.	48
Tabela 5.3 - Caudais volúmicos e mássicos para as várias velocidades de escoamento.	48
Tabela 5.4 - Números de <i>Reynolds</i> para os ensaios realizados.	49
Tabela 5.5 - Taxas de calor para ensaios a 2 m/s sem defletores.	49
Tabela 5.6 - Taxa de calor para o ar nos ensaios 1 a 12.	53
Tabela 5.7 - Síntese de ensaios, à superfície F, e respectivos resultados.	57

Lista de Acrónimos

A	Área (secção), [m ²]
L	Comprimento, [mm]
t	Espessura
V	Velocidade, [m/s]
H	Altura da alheta [mm]
C	Meia-altura da conduta [mm]
S	Espaçamento das alhetas [mm]
ACOC	Permutador ar-óleo- do inglês, <i>Air-Cooled Oil Cooler</i>
SACOC	Superfície permutadora ar-óleo- do inglês, <i>Surface Air Cooled Oil Cooler</i>
T _s	Temperatura de superfície [°C]
T _∞	Temperatura do escoamento [°C]
T _i	Temperatura à entrada [°C]
q	Taxa de calor transferido [W]
h	Coefficiente Convectivo [W/m ² K]
T _{m,o}	Temperatura média à saída [°C]
k	Condutibilidade Térmica[W/mK]
A _s	Área total da superfície alhetada [m ²]
A _a	Área de alheta [m ²]
L _c	Comprimento característico
g	Global
η	Rendimento
SFC	Consumo Específico de Combustível- do inglês, <i>Specific Fuel Consumption</i>

1. Introdução

1.1. Perspetiva geral

Desde a primeira revolução industrial, no século XIX, que o Homem começou a utilizar máquinas geradoras de calor nas mais diversas atividades, predominando muitas delas até aos dias de hoje. Desde então, foram-se desenvolvendo os mais diversos sistemas/motores de combustíveis fósseis, caldeiras e máquinas térmicas, no entanto, com o passar do tempo surge a necessidade de dissipar o excesso de calor. Sendo assim, o arrefecimento e a dissipação de calor uns dos grandes desafios inerentes ao vasto leque de engenharias que atualmente existem.

O uso das superfícies alhetadas e um aumento da área superficial para a troca de calor são duas alternativas que, ao longo de várias décadas foram comprovadas como os meios mais eficazes e económicos, para ajudar na taxa de transferência de calor entre uma superfície sólida quente e um fluido ao seu redor (Aziz & Kraus, 1995; Aziz & Fang, 2010). As suas vantagens são comprovadas pela vasta gama de aplicações que possuem. Desde equipamentos industriais, como transformadores, refrigeradores, motores, entre outros, que geram calor quando estão em operação, o que pode ocasionar problemas de sobreaquecimento, danificando os seus componentes, e conseqüente, falha do sistema. Ultimamente, tem-se vindo a observar a aplicação tecnológica destas alternativas em componentes eletrónicos e microeletrónicos.

Devido a estas evidências seguiram-se inúmeros estudos, no sentido de aumentar essa mesma taxa de transmissão de calor, de compreender a influência dos fatores externos ou até de minimizar material e custos. Para isso, realizaram-se estudos relacionados com os impactos de alterações, como por exemplo: do perfil da alheta, da velocidade do escoamento, das propriedades termofísicas ou da área de secção transversal.

Recentemente, existem alguns trabalhos desenvolvidos já com um outro objetivo, de perceber as perdas envolventes. *Liu et al.* (2019) constataram que em certas configurações para condições específicas do escoamento o desempenho dos permutadores de calor é afetado (*Liu et al.*, 2019).

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

No seguimento das conclusões referidas anteriormente, Liu et al. (2019) através de um estudo numérico analisaram o impacto da geometria e das condições operacionais no efeito de *bypass* e perda em superfícies alhetadas para aplicações aeronáuticas. Destacando-se assim, como dois dos fenómenos que levam a um decréscimo do rendimento de uma superfície alhetada (Liu et al., 2019).

Quando o fluido de arrefecimento se depara com a superfície alhetada, primeiramente ocorre um fenómeno de desvio do escoamento, denominado *bypass*. Este ocorre quando uma parte do ar que se aproxima das alhetas é desviada, devido aos gradientes de pressão adversos induzidos pelas alhetas. Já para o ar que flui entre as alhetas, uma parte escapa, ocorrendo a perda, causada pelo aumento da pressão ao longo das alhetas, gerada pelo atrito. Tanto o *bypass*, como a perda reduzem a eficiência desses mesmos permutadores de calor de superfície na transferência de calor para o ar (Liu et al., 2019). Do estudo, destaca-se que as alhetas contínuas apresentam uma maior transmissão de calor, sendo que para as mesmas existe um efeito de *bypass* e perda na ordem dos 30 %.

Posto isto, surge a importância de se desenvolver uma solução, com o objetivo de diminuir estas perdas acima mencionadas. Assim, este trabalho foca-se em estudar a mais-valia de um redireccionamento do escoamento, tentando recolá-lo ao canal entre alhetas. Em suma, procura uma solução viável de aumentar a taxa de transmissão de calor.

2. Revisão bibliográfica

A problemática da dissipação de calor tem sido a força motriz para o desenvolvimento ocorrido nas superfícies transmissoras de calor. Os permutadores de calor desempenham um importante papel de engenharia nos mais diversos níveis, industrial e doméstico.

A nível histórico não se pode dizer que o tema dos permutadores de calor seja algo recente, ou pouco estudado, pois existe desde há muitas décadas um intenso aprofundar do conhecimento literário e experimental sobre este tipo de superfícies. Já em 1995, uma publicação científica apresentava uma revisão abrangente dos últimos 65 anos referente ao desenvolvimento ocorrido em superfícies transmissoras de calor (Kou et al., 2003). Desde então, com o avanço tecnológico, só se veio intensificar a relevância e a necessidade de melhorar essas mesmas superfícies, refletindo-se num aumento da área de superfície e do coeficiente de transferência de calor.

De uma forma quase unânime, os estudos já realizados sobre superfícies alhetadas vão ao encontro de um aumento do coeficiente de transferência de calor aquando de uma situação de convecção forçada em regime de escoamento interno (Kim et al., 2014). Nessa linha de pensamento, foram muitos os trabalhos numéricos e experimentais realizados.

Mais recentemente, existem estudos como de *Torabi et al.* (2013) que focam na variação do perfil de alhetas (retangular, trapezoidal e côncavo parabólico), sendo que obtiveram melhores resultados de coeficiente convectivo para o perfil côncavo (*Torabi et al.*, 2013). *Herring et al.* (2006) trabalhou na avaliação de várias superfícies (Herring & Heister, 2006), já *Bouchenafa et al.* (2019) estudaram as vantagens de alhetas onduladas em regime turbulento, sendo de notar que as ondulações têm um acréscimo significativo no calor transferido (*Bouchenafa et al.*, 2019). *Kou et al.* (2003) estudaram, numericamente, uma equação de três variáveis, de forma a identificar o comprimento ideal de uma alheta para uma superfície dissipadora de calor (Kou et al., 2003).

No âmbito da aeronáutica, a convecção forçada é um mecanismo de transferência de calor amplamente utilizado para o arrefecimento dos dispositivos eletrónicos.

Normalmente e a fim de manter o equipamento dentro de temperaturas toleráveis, conforme especificado pelo seu fabricante, o fluxo de ar é fornecido por ventiladores para remover o calor desses componentes (Tecchio et al., 2017). A necessidade de sistemas de arrefecimento eficazes foi desencadeada, nos últimos anos, por dois grupos de maior relevância.

Primeiramente, os avanços na aviónica, quer isto dizer, nos sistemas eletrônicos. Este cenário é mais evidente em aeronaves mais recentes, incorporadas com *full fly-by-wire*, onde a necessidade de dissipação de calor aumentou consideravelmente. Para além disso, a sua aplicação abrange permutadores de calor ar-combustível, ar-condicionado, o arrefecimento do óleo do motor e dos sistemas hidráulicos, entre muitos outros (Tecchio et al., 2017).

Em segundo lugar, os recentes conceitos de motor, bem como, rotores abertos com geradores de gás muito compactos que levaram ao aumento das cargas de calor no óleo (Kellermann et al., 2020). Com motores mais eficientes veio também uma redução do consumo específico de combustível (SFC, do inglês *Specific Fuel Consumption*), o que se traduz, tal como indica o nome, em menores quantidades de combustível gasto, ou seja, como o combustível é um dos elementos mais importantes na absorção de calor vai levar a um défice na absorção do calor do óleo. Isto, aliado a motores com mais engrenagens (geram mais calor) irá resultar numa necessidade maior de superfícies de arrefecimento a ar (Sakuma et al., 2017). No entanto, trabalhos experimentais de Sousa et al. (2014) concluíram que uma superfície de alhetas dentro da zona de *bypass* do motor com um permutador ar-óleo (ACOC, do inglês *Air-Cooled Oil Cooler*) conseguiu extrair 76% da carga térmica do lubrificante do motor de uma aeronave quando esta realizava uma operação de descolagem (das mais exigentes a nível de calor gerado). Os investigadores concluíram que a superfície de alhetas analisada fornece uma taxa de fluxo de calor suficientemente elevada para lidar com o calor adicional, gerado por tecnologias de ponta exigidas em futuros projetos de sistemas de propulsão mais eficientes (Sousa et al., 2014).

Sakuma et al. (2017), por sua vez, investigaram a variação em superfícies permutadoras de ar-óleo (SACOC, do inglês *Surface Air Cooled Oil Cooler*) (Figura 2.1), concluindo que duas superfícies SACOC com duzentos milímetros de comprimento teriam o mesmo desempenho na dissipação de calor de uma superfície

de novecentos milímetros, mantendo a mesma queda de pressão e conseguindo, ainda, uma otimização da área e peso (Sakuma et al., 2017).

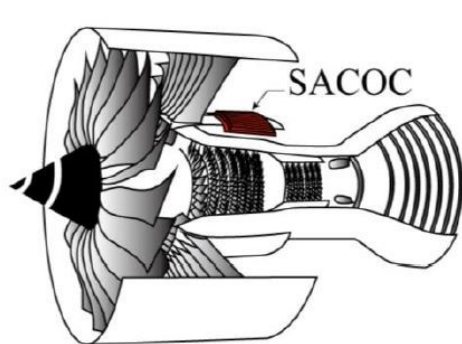


Figura 2.1 – Aplicação de superfícies alhetadas em motores *Turbo Fan*, adaptado de (Sakuma et al., 2017).

Dada a importância das superfícies SACOC vários projetos de investigação são financiados pela União Europeia (Kellermann et al., 2020).

Kim et al. (2018) estudaram computacionalmente o efeito de alhetas descontínuas com um grau de inclinação na direção do escoamento, sob condições de alta velocidade encontradas no *bypass* dos motores. Os investigadores concluíram que existe uma evidente vantagem para aplicações aeronáuticas, onde o peso e o tamanho são fatores críticos (Kim et al., 2018).

Recentemente, *Liu et al.* (2019) realizaram um estudo numérico para descrever a perda de pressão e a transferência de calor de diferentes configurações de alhetas de superfícies transmissoras de calor de aeronaves, incluindo alhetas contínuas, segmentadas e intercaladas. Concluíram que a configuração contínua tem a razão de taxa de transferência de calor por queda de pressão mais vantajosa. Revelam também um efeito negativo e bastante preponderante no coeficiente de convecção por parte do *bypass* e perda (Liu et al., 2019).

Nesse contexto, do efeito de *bypass* e perda, o trabalho desenvolvido por *Cai et al.* (2019) quantificaram uma discrepância de 19,1 % no coeficiente de transferência de calor numa superfície nas mesmas condições com e sem *bypass*, com base em dados experimentais obtidos pelos mesmos. Apresentam, ainda, como valor otimizado da

razão da área frontal da alheta com a área frontal de toda a superfície de 0,5 (Cai et al., 2019).

Para além disto, destacam-se as conclusões obtidas pelo trabalho de *Shaalán et al.* (2012) que descrevem que o acréscimo de uma barreira melhora o desempenho térmico, contudo a adição de intervalos de ar entre a barreira, observado na Figura 2.2, aumentam a resistência térmica. Ao aumentar o comprimento destas mini barreiras tem-se um aumento do fluxo de calor em deterioramento do desempenho térmico. As mini-barreiras funcionam como um desvio de fluxo e criam jatos para destruir redemoinhos e vórtices criados pelo escudo (Shaalán et al., 2012).

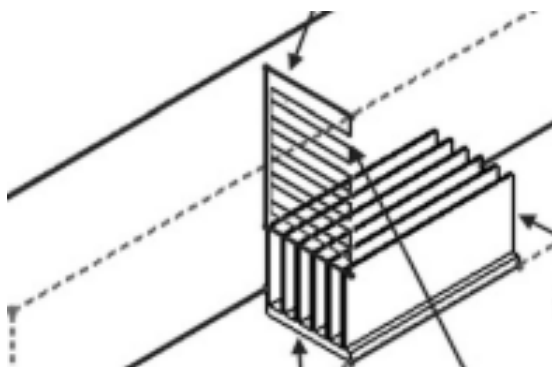


Figura 2.2 - Esquema do trabalho experimental de *Elsayed & Meshaly*, adaptado de Shaalan et al., 2012.

Wang et al. (1999) refere que além das superfícies de arrefecimento de uma aeronave servirem para a dissipação de calor, servem também como meio de controlo da camada limite. Uma vez que, a adição de calor a uma camada limite laminar aumenta a instabilidade e, portanto, pode levar a uma transição mais precoce, aumentando assim o efeito de atrito (*Wang et al.*, 1997).

2.1. Objetivos

O desenvolvimento da presente dissertação pretende retirar conclusões sobre o aumento da taxa de transmissão de calor em superfícies alhetadas de perfil retangular, inserindo um novo conceito a este tipo de permutadores, defletores.

Para atingir o objetivo mencionado acima, o trabalho desenvolvido irá passar pelas seguintes etapas:

- Conceber e construir superfícies alhetadas com diversas relações de altura/espessura/espacamento para funcionamento posterior como dissipadores térmicos;
- Conceber e construir um túnel de circulação forçada de ar com regulação de velocidade, devidamente instrumentado por forma a permitir a medição da temperatura e da velocidade do ar, bem como a temperatura nos dissipadores térmicos;
- Quantificar o comportamento das diversas superfícies alhetadas, em termos de taxas de transmissão de calor para diferentes condições de operação (velocidade do escoamento e potência térmica dissipada);
- Determinar o coeficiente convectivo para as diversas superfícies alhetadas e para diferentes condições de operação;
- Avaliar o efeito da introdução de superfícies deflectores para as diversas superfícies alhetadas e para diferentes condições de operação.

2.2. Estrutura

O presente trabalho rege a sua estrutura através do desenvolvimento e apresentação de 6 capítulos.

O capítulo 1 apresenta a introdução ao trabalho desenvolvido, referindo o que suscitou o interesse do desenvolvimento experimental realizado. De um modo introdutório, é referido o problema estudado, bem como o contributo e a importância do mesmo.

O capítulo 2 expõe os trabalhos realizados por outros investigadores sobre superfícies transmissoras de calor nos últimos anos. E, ainda, os objetivos a que o trabalho se propõe.

O capítulo 3 apresenta os conceitos teóricos, dando as bases para interpretar e compreender os resultados apresentados. Para um melhor entendimento dos conceitos aplicados na fase experimental é mencionado o processo de convecção forçada, os conceitos e fórmulas sobre superfícies alhetadas e o comportamento da perda e *bypass*. Aliado à parte teórica faz-se uma síntese dos cálculos necessários para a obtenção de resultados.

O capítulo 4 exhibe a informação relativa à cerca dos equipamentos experimentais, bem como os equipamentos de instrumentação para a obtenção de resultados do trabalho experimental.

O capítulo 5 descreve o procedimento experimental implementado, onde são mostrados os parâmetros individuais dos ensaios. Emprega todos os resultados obtidos, e faz-se a análise dos resultados em forma de gráficos e tabelas. São feitas comparações entre as soluções apresentadas à cerca do estudo feito, e se estas apresentam vantagens ou desvantagens.

Por último, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais do presente trabalho experimental, assim como as perspectivas futuras para dar seguimento ao novo conceito abordado.

3. Fundamentos teóricos

3.1. Introdução

O capítulo que se segue tem como objetivo apresentar a base teórica que sustenta o desenvolvimento desta dissertação, expondo os diversos tópicos que a compõem. Ao longo deste capítulo, faz-se uma construção do tema através dos vários subcapítulos apresentados. Subcapítulos esses que abordam a transmissão de calor em situação de convecção forçada, superfícies alhetadas e perdas associadas a este método de arrefecimento.

3.2 Modos de transmissão de calor: convecção forçada

A transferência de calor é um processo que está constantemente presente no cotidiano do ser humano, o que despertou vários estudos, desde os tempos primordiais. A curiosidade envolvida no fluir de algo, até então desconhecido, entre objetos quentes e frios suscitou o desejo de compreensão deste fenômeno a que, atualmente, se chama transferência de calor (Lienhard et al., 2017).

No âmbito da engenharia, entende-se por transferência de calor a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura espacial (Bergman et al., 2011). Esta pode ocorrer de três modos distintos, em simultâneo ou não, por condução, por convecção ou radiação. Dentro da convecção podemos ainda distinguir a convecção natural da convecção forçada, sendo esta última o conceito abordado no trabalho experimental realizado.

Bergman et al. (2011) explica a convecção forçada como sendo uma transmissão de calor com a particularidade de que possui um fluxo causado por meios externos como, por exemplo, um ventilador, uma bomba ou correntes do ar exterior. É um mecanismo de transferência de calor amplamente utilizado na indústria aeronáutica (Bergman et al., 2011). O fluxo de ar é fornecido por ventiladores ou mesmo pelo escoamento do ar para remover o calor dos componentes (Tecchio et al., 2017).

A avaliação quantitativa da energia em trânsito resultante deste processo convectivo é assegurada pela Lei do Arrefecimento de Newton. Na literatura, esta lei é acompanhada da seguinte afirmação:

“A taxa de arrefecimento de um corpo quente em qualquer momento é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e seu meio circundante (ar)” (Cheng & Fuiii, 1998).

Expondo isto em equação, obtém-se:

$$q = Ah(T_s - T_\infty) \quad 3.1$$

Em que A representa a área de superfície de permuta, T_s a temperatura de superfície de permuta, T_∞ a temperatura do escoamento não perturbado e q a taxa de calor transferido. É importante salientar a variável h , uma vez que, em termos quantitativos a diferença entre as duas situações (convecção natural e forçada) reside nessa mesma grandeza que, como se observou, define o coeficiente de transferência de calor por convecção. Na aplicação da expressão 3.1, é importante destacar a consideração de escoamento externo.

A presente dissertação pretende quantificar o valor do coeficiente convectivo. Com alguma manipulação algébrica evidenciar o h :

$$h = \frac{q}{A(T_s - T_\infty)} \quad 3.2$$

Dada a necessidade de quantificar a variação de energia no fluido, entre a entrada e a saída de ar, desenvolvida para os testes experimentais, efetua-se um balanço térmico ao ar (fluido de arrefecimento). Para condições de regime permanente e propriedades constantes:

$$q = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_\infty) \quad 3.3$$

O movimento do fluido em convecção forçada é gerado por uma fonte de energia externa (bomba, ventilador, entre outros) que permite definir uma escala de velocidade típica: U - velocidade (m/s). Esta velocidade está presente no número de

Reynolds, um número adimensional, importante em convecção forçada (em toda a mecânica de fluidos), definido como a razão entre as forças de inércia (convectivas) promotoras do movimento e as forças de viscosidade que se opõem ao movimento.

- O escoamento é laminar quando o número de *Reynolds* é inferior a um valor crítico, Re_{cr} , que depende da geometria. Transita para o regime turbulento quando Re é superior a esse valor crítico.

Ao trabalhar com fluxos internos, é importante ter em conta a região de entrada, que vai ter peso na caracterização do fluxo, como laminar ou turbulento. O número de *Reynolds* para fluxo em tubo circular é definido como:

$$Re_D \equiv \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad 3.4$$

$$D = \frac{4A}{P} \quad 3.5$$

$Re < 2300$ \longrightarrow regime laminar
 $Re > 4000$ \longrightarrow regime turbulento

O número de *Nusselt* é um indicador do ganho térmico, que resulta da substituição do mecanismo de condução, pelo mecanismo de convecção no transporte de calor, através da mesma camada de fluido (Silva, Pedro D. 2017). Com base em soluções de análise e resultados experimentais foi demonstrado que, para convecção forçada em escoamentos internos existem correlações para o número de *Nusselt* obtido por equações como a seguinte:

$$Nu = \frac{\text{fluxo por convecção}}{\text{fluxo por condução pura}} = \frac{h L}{k} \quad 3.6$$

3.3. Superfícies com alhetas

As alhetas consistem numa “extensão ou protuberância artificial fixadas sobre as superfícies de transferência de calor para aumentar a sua área efetiva e, assim, incrementar a quantidade de calor transferida por unidade de tempo” (Silva, 2017).

Apresentando preços competitivos e processos de fabricação simples e fiáveis, o sistema convencional de arrefecimento a ar, combinando um dissipador de calor com uma placa de alhetas e convecção forçada tem sido amplamente utilizado em arrefecimento de sistemas eletrónicos nos últimos anos (Wu et al., 2011).

Como em qualquer processo de engenharia a fase de projeto de uma superfície alhetada passa também pelo cálculo do rendimento, para estas superfícies será o quociente entre a taxa de transmissão de calor real e a taxa de transmissão de calor máxima. Traduzindo para uma equação, obtém-se:

$$\eta_f = \frac{q_f}{A_f h \Delta T_b} \quad 3.7$$

Contudo, a informação relativa ao rendimento do perfil de uma alheta (importante para assumir uma uniformização da temperatura em toda a alheta) é, geralmente, apresentada sob forma gráfica ou através de expressões matemáticas similares às indicadas anteriormente. A Figura 3.1 é um exemplo da consulta gráfica do rendimento.

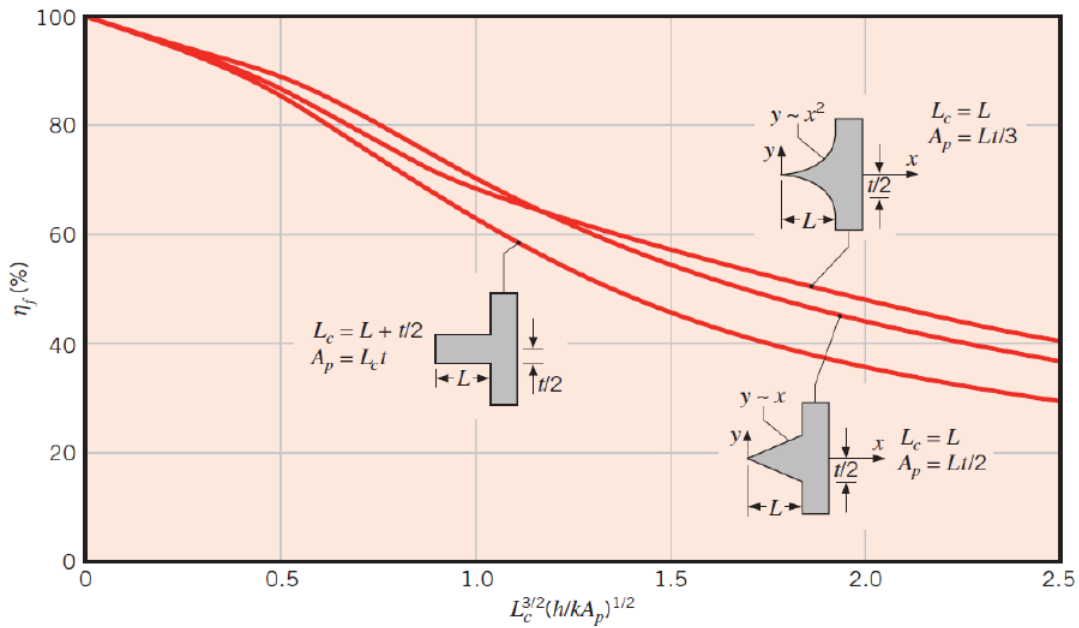


Figura 3.1 -Gráfico do rendimento de uma alheta, adaptado de Bergman et al., (2011).

Para se consultar o gráfico do rendimento a expressão do eixo das abcissas tem de ser calculada (tendo em atenção o perfil):

$$L_c^{3/2} \left(\frac{h}{kA_p} \right)^{1/2} \quad 3.8$$

$$\text{Com, } A_p = L_c \times t \quad 3.9$$

É relevante explicar a origem do comprimento corrigido, L_c , na expressão apresentada (Silva, 2017). A ideia subjacente a este procedimento de substituição de L (comprimento da alheta) por L_c surge devido à forma simples que a expressão do rendimento de uma alheta exhibe quando a sua extremidade está isolada termicamente.

Assim, quando a extremidade de uma alheta está submetida a convecção imposta (situação que se aproxima mais da utilização prática das alhetas) é possível utilizar para cálculo do seu rendimento a Equação 3.9, desde que se observe o seguinte procedimento: o comprimento real da alheta deve ser substituído por um

comprimento equivalente (corrigido), que tenha em conta a transferência de calor que ocorre na extremidade da alheta. Para alhetas retangulares tem-se então:

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad 3.10$$

Até agora referiu-se apenas o caso particular de uma alheta, mas sendo que uma superfície alhetada, é um conjunto de alhetas, adaptou-se o caso particular de uma alheta retangular, para uma superfície alhetada.

Sendo, A_g a área global da superfície alhetada, inclui a área da superfície não ocupada por alhetas, A_s .

$$A_g = NA_a + A_s \quad 3.11$$

3.4. Interação entre alheta e escoamento

Como em qualquer processo energético, existem inúmeras causas para um rendimento inferior aos cem %. No caso de superfícies alhetadas, apesar do intensivo uso que lhes tem sido entregue nas mais diversas áreas, estas continuam a apresentar perdas para as quais ainda não existe solução, sendo uma percentagem importante atribuída a problemas identificados em *Liu et al.* (2019). Neste subcapítulo apresentam-se evidências do impacto que estas têm no rendimento e como as suas características dimensionais afetam individualmente (Liu et al., 2019).

Quando o ar se aproxima das alhetas, uma parte é desviada (*bypass*) devido aos gradientes de pressão adversos induzidos à entrada das alhetas. Além disso, para o ar que flui entre as alhetas, uma parte sai (perda) devido ao aumento da pressão causada pelo atrito das paredes. Tanto o *bypass* como a perda, fenômenos ilustrados na Figura 3.2, reduzem o rendimento desses mesmos permutadores de calor de superfície na sua função de transferir calor para o ar. Quando o desvio e a perda são baixos, a taxa de transferência de calor é alta, e quando o *bypass* e a perda são altos, a taxa de transferência de calor é baixa.

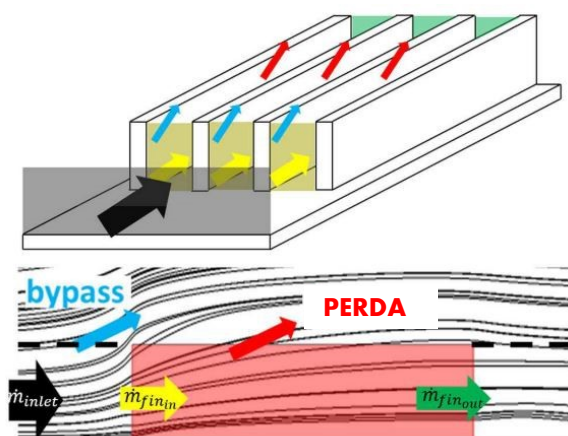


Figura 3.2 - Ilustração do efeito *bypass* e perda, adaptado de Liu et al., 2019 .

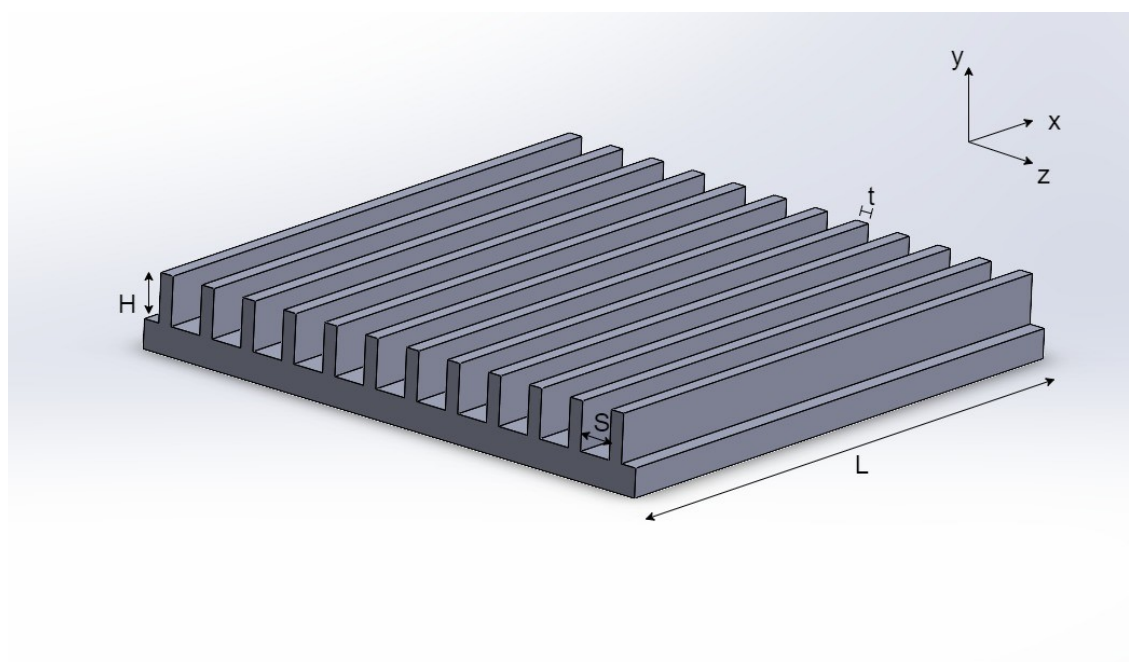


Figura 3.3 - Legenda das dimensões da superfície com alhetas (H- altura, L- Comprimento, S- espaçamento, t – espessura).

Olhando, primeiramente, para o efeito *bypass*: quando o espaçamento é grande, é de esperar que maior parte do fluxo entre no espaço entre as alhetas. Permitindo que uma quantidade considerável de fluxo se aproxime do permutador de superfície, podendo ser desviada ou contornada. De um modo quantitativo o tema é abordado, no artigo de *Liu et al.* (2019), pelas seguintes razões numéricas:

1. A razão entre metade da altura da conduta e a altura da alheta, C/H respetivamente. “o *bypass* e a perda aumentam à medida que a altura do canal aumenta. Contudo, para valores superiores a vinte, um aumento de C tem um efeito inferior a três % no *bypass* e na perda (...) o desvio, a perda e a taxa de transferência de calor são essencialmente independentes de C/H quando $C/H \geq 20$.”
2. A área disponível à entrada é dada pela forma, $\frac{t}{(S+t)}$, sendo o quociente entre a espessura da alheta (t) e o somatório dessa mesma espessura com o espaçamento entre alhetas (S). Quando a expressão toma valores mais baixos “é esperado o decréscimo do efeito *bypass*, uma vez que a área disponível para entrada do fluxo é maior”. Logo para valores superiores a 0,2 surgem impactos de 20% de *bypass* e com tendência de crescimento acentuado.
3. A divisão do espaçamento entre alhetas, S , e H . $S/H \geq 0,4$ isto é, aumentos adicionais no espaçamento têm um efeito mínimo na transferência de calor através das alhetas.

Por outro lado, a perda como parte do fluxo que entra nos canais do permutador deixará o espaço entre as alhetas antes de chegar ao final da superfície. Da mesma forma, que para o efeito *bypass*, surgem as razões numéricas que expressam a variação na perda com a alteração das características das alhetas.

1. Para um menor espaçamento entre as alhetas, esses três parâmetros: temperatura de entrada, diferença de temperatura entre a superfície e o escoamento, e a velocidade afetam a perda. Isto ocorre devido à temperatura e à velocidade de entrada que afetam a espessura da camada limite próxima da alheta. Quando esta camada é mais espessa, a pressão na base da alheta é maior, o que aumenta a componente do gradiente de pressão na direção Y , que, conseqüentemente, leva ao aumento da perda.

2. L/H , ao contrário do *bypass*, afeta a perda. À medida que o comprimento aumenta, a perda também aumenta, uma vez que para um L suficientemente longo, todo o fluxo que entra na região entre as alhetas sairá das mesmas em $y = H$, como consequência do aumento de pressão.
3. O aumento de espessura das alhetas, tal como para o efeito *bypass*, também leva a um efeito negativo para a perda, uma vez que este aumenta mesmo para um espaçamento de valor fixo, devido ao aumento da área de bloqueio para o escoamento que deveria entrar.

4. Instalação experimental

4.1. Introdução

O presente capítulo apresenta a instalação concebida para o estudo experimental do tema que foi anteriormente introduzido. Para isso, procedeu-se à construção de uma conduta de ar, à qual se incorporou um ventilador, criando assim condições de convecção forçada. Neste capítulo aborda-se, ainda, a instrumentação aplicada à conduta que vai ao encontro das variáveis que se mostraram no capítulo anterior, relevantes para o estudo. Como explicado, é de elevada importância para objetivos de cálculo de coeficientes convectivos, fatores como a medição da temperatura da superfície e do escoamento, assim como velocidade do escoamento no interior da conduta. Para além disso, para cálculos de ganho térmico é aplicado um sensor de temperatura à saída. Todo este enquadramento é explicado ao detalhe nos subcapítulos que se seguem.

4.2. Esquema de Conjunto

Na Figura 4.1 pode-se observar o esquema da instalação e das várias partes constituintes da bancada de ensaio.

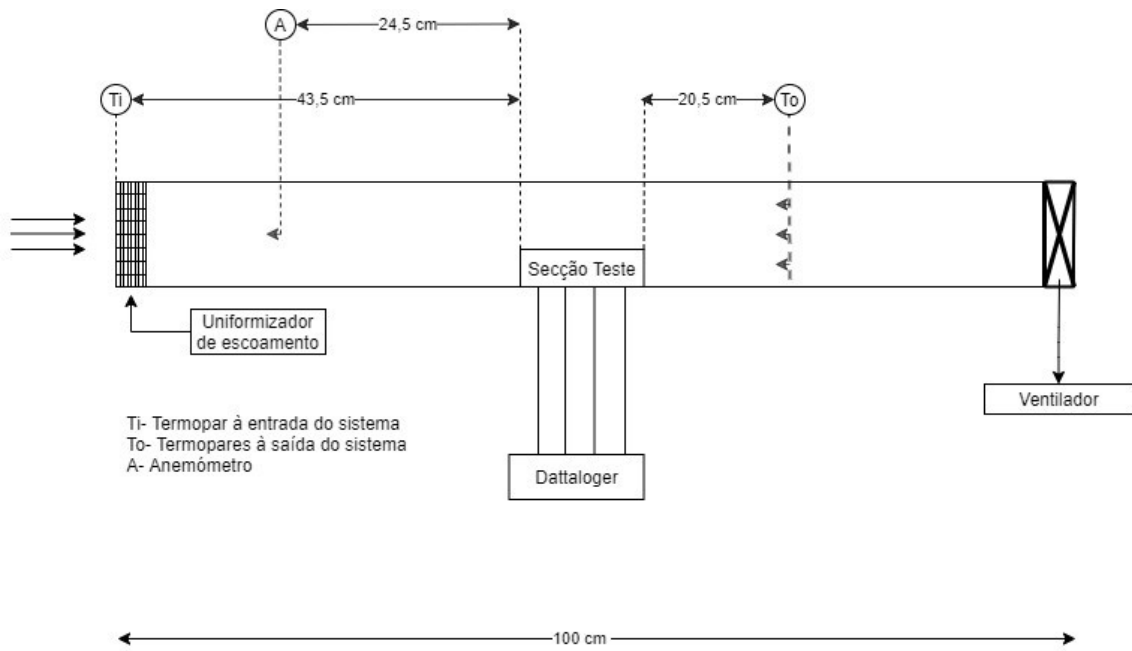


Figura 4.1 - Esquema do conjunto experimental.

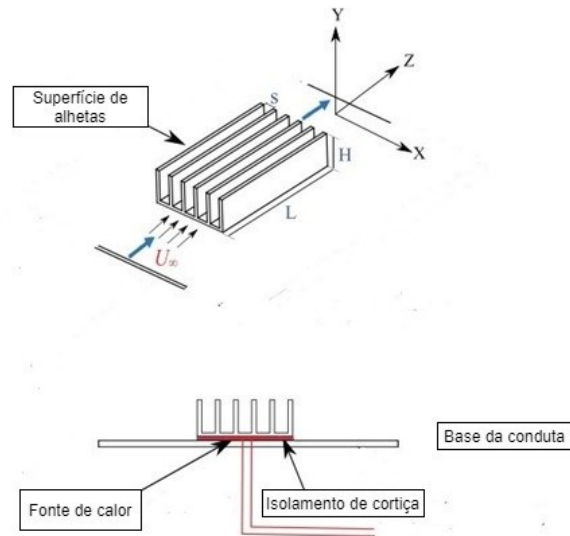


Figura 4.2 - Esquema da secção de teste.

A secção de teste e o posicionamento da superfície alhetada em função da conduta demonstrado na Figura 4.2.

Por fim, tem-se na Figura 4.3, uma imagem real da bancada construída para a obtenção de resultados.

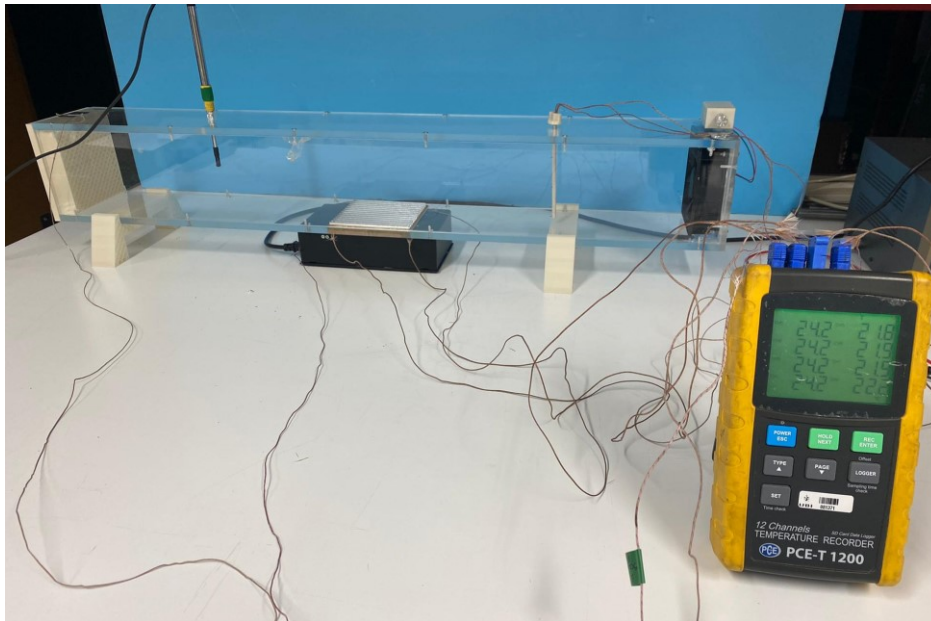


Figura 4.3 - *Setup* experimental.

4.3. Equipamento Experimental

4.3.1. Superfícies alhetadas

Como ponto de partida para a construção das superfícies alhetadas, utilizou-se um bloco de alumínio. Este foi cortado em várias peças quadradas, de doze centímetros de lado (Figura 4.4), uma vez que se tratava das dimensões aproximadas da fonte de calor referida no subcapítulo seguinte.



Figura 4.4 - Bloco de alumínio antes de ser maquinado.

Tendo por base o estudo numérico de *Liu et al.* adotou-se as condições apontadas por eles, nas quais se verificaram efeitos mais acentuados. Para isso, efetuaram-se cálculos matemáticos, de modo a garantir que as condições referidas estavam asseguradas ou, nessa impossibilidade, de garanti-las na sua vizinhança. A estes parâmetros limitadores conjugou-se uma fronteira para o rendimento das alhetas, um valor que fosse suficientemente grande para garantir a uniformização da temperatura ao longo da altura da mesma. Estaríamos a falar em alhetas com um rendimento superior a 90% para considerar a uniformização da temperatura ao longo de toda a alheta. Posto isto, desenvolveram-se os cálculos necessários para definir as dimensões da alheta.

Nesta perspetiva, construiu-se uma folha de cálculo, na qual seria possível verificar se estaríamos ou não perante tais condições, consoante as dimensões do perfil da alheta (H , t , L e S).

Após atribuir as medidas, elaborou-se a Tabela 4.1 com razões que indicam quão perto se estaria das condições de trabalho favoráveis à realização deste trabalho prático.

Tabela 4.1 - Intervalo de valores ótimos.

<i>OUTPUT</i>	<i>S/H</i>	<i>L/H</i>	<i>C/H</i>	<i>t/(S+t)</i>
VALORES	0,2 - 0,4	5 - 10	15 - 20	0,3 - 0,5

A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos pelo procedimento de cálculo.

Tabela 4.2 - Protótipos para estudo experimental.

	H	S	L	T	S/H	L/H	C/H	t/(S+t)
A	0,005	0,005	0,12	0,002	1	24	12,8	0,7
B	0,005	0,007	0,12	0,002	1,4	24	12,8	0,2
C	0,005	0,007	0,12	0,003	1,4	24	12,8	0,3
D	0,005	0,029	0,12	0,002	5,8	24	12,8	0,06
E	0,005	0,021	0,12	0,002	4,2	24	12,8	0,0025
F	0,01	0,005	0,12	0,002	0,5	12	6,4	0,7

Apresenta-se, de seguida, o procedimento de cálculo para a superfície B (Figura 4.5).

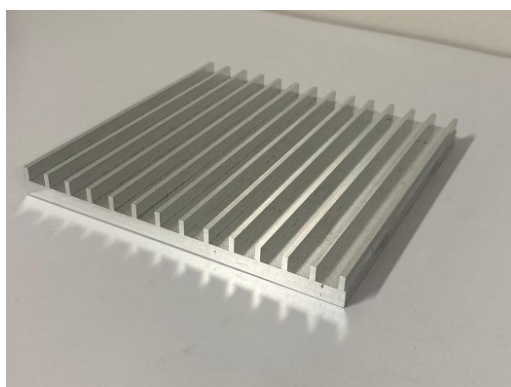


Figura 4.5 - Superfície alhetada B.

Podem observar-se na Tabela 4.3 as dimensões e respetivas razões do protótipo.

Tabela 4.3 - Características da superfície de alhetas B.

	H	S	L	t	S/H	L/H	C/H	t/(S+t)
PROTÓTIPO	0,005	0,007	0,12	0,002	1,4	24	12,8	0,22

Ao confirmar-se a proximidade aos parâmetros requeridos, sucedeu-se o cálculo do rendimento do perfil da alheta.

Como demonstrado na subcapítulo 2.2 para o cálculo do rendimento global do perfil da alheta recorreu-se:

Ao cálculo do comprimento característico, pela equação 3.10:

$$L_c = 100 + \frac{2}{2} \quad 4.1$$

Ao cálculo da área de permuta, pela equação 3.9:

$$A_p = 101 \times 2 \quad 4.2$$

Posto isto, é possível calcular a expressão 3.8, para consultar a Figura 4.6.

Na Figura 4.6 observa-se delineada uma linha preta, de forma a indicar qual o valor do eixo das ordenadas correspondente:

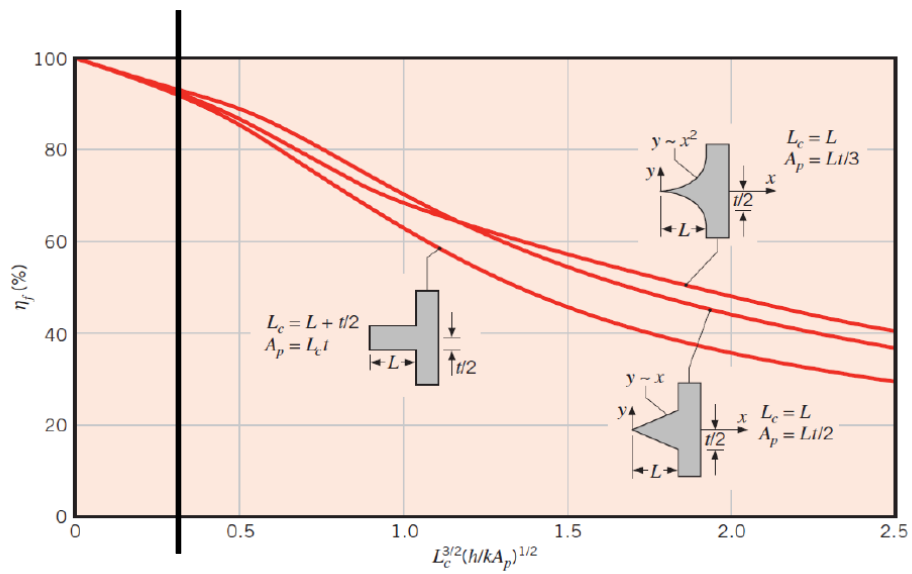


Figura 4.6 - Identificação gráfica do rendimento (linha preta), adaptado de (Bergman et al., 2011)

Assim, foi possível atingir o final da fase de projeto da superfície de alhetas idealizada, sendo que o processo se repetiu para os restantes protótipos de ensaio, avançando para a maquinação dos mesmos.

O conjunto de imagens da Figura 4.7 representa as superfícies maquinadas consoante as dimensões apresentadas na Tabela 4.3.

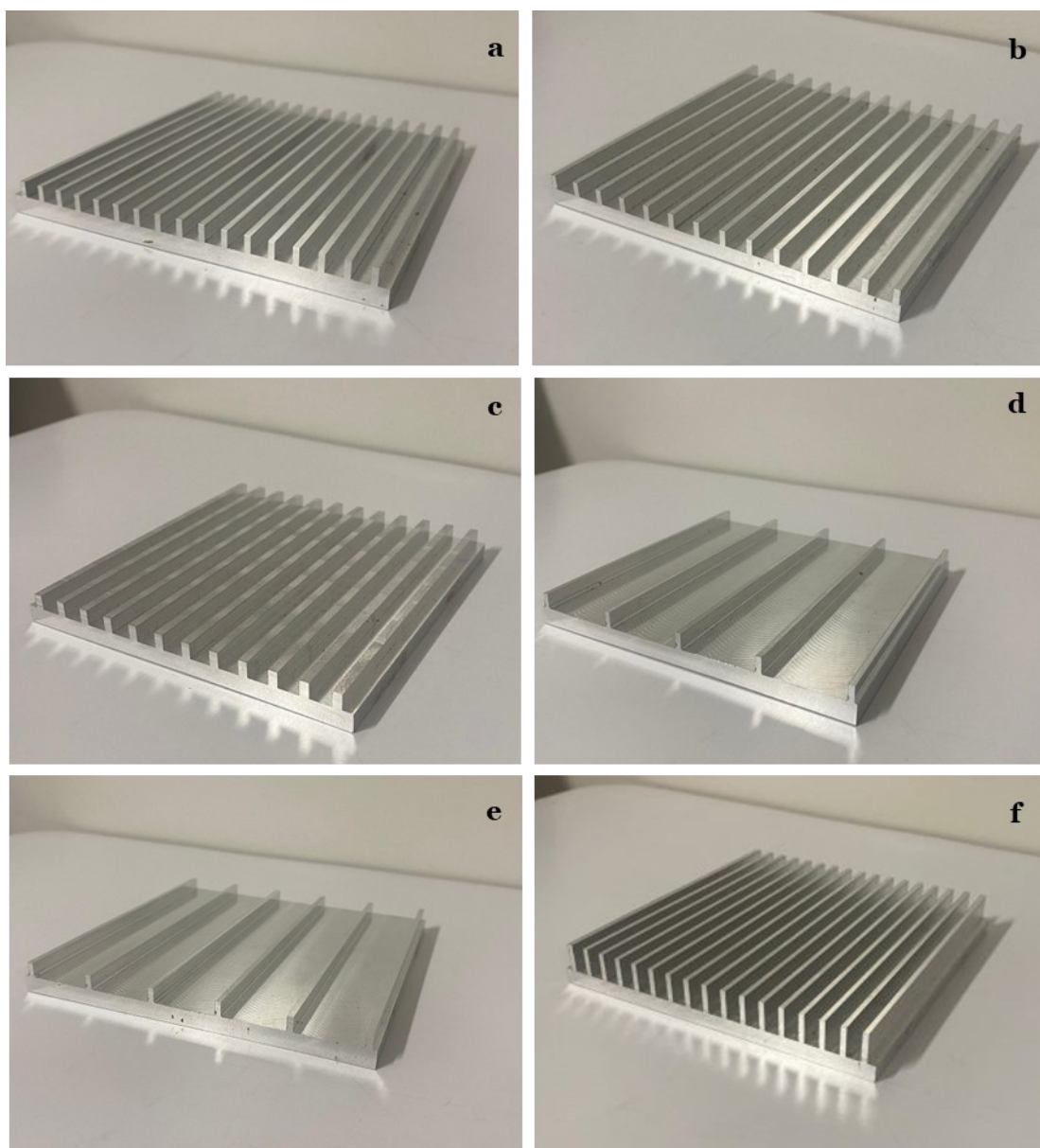


Figura 4.7 – (a) Superfície A; (b) Superfície B; (c) Superfície C; (d) Superfície D; (e) Superfície E; (f) Superfície F.

4.3.2. Defletores

A presente dissertação propõe o novo conceito de defletores para um redirecionamento do escoamento, tendo esta abordagem o objetivo de aumentar a taxa de transmissão de calor. Os defletores consistem em placas retangulares, obtidas

a partir de folha de alumínio, de um milímetro de espessura. Um conjunto de defletores é constituído por três placas retangulares, distribuídas uniformemente no comprimento da superfície alhetada a começar na extremidade da alheta.

Foram estudados três conjuntos de defletores:

1. O primeiro conjunto com seis milímetros de largura, 30° de inclinação (Figura 4.8.A), tendo a vantagem de uma esteira bastante suave (Shademan & Naghib-Lahouti, 2020).
2. Para o segundo conjunto, seguiram-se os mesmos parâmetros do conjunto anterior, alterando apenas a inclinação para 45° (Figura 4.8.B).
3. E por último, o terceiro conjunto com doze milímetros de largura, oferecendo o dobro da área frontal e com 30° de inclinação (Figura 4.8.C).

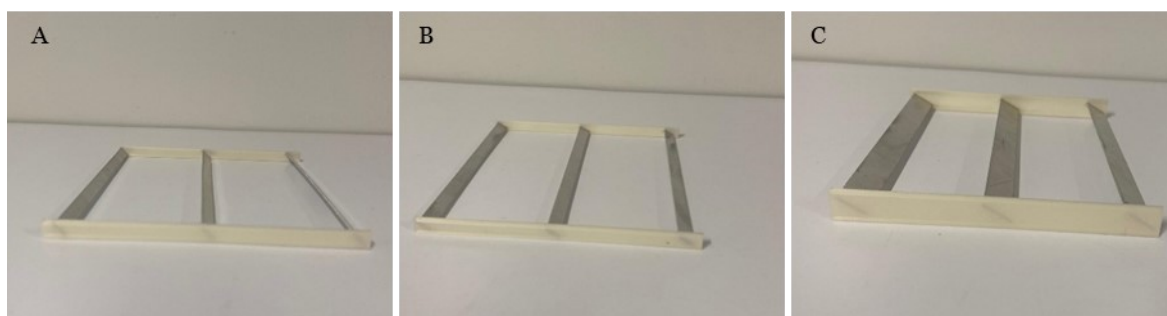


Figura 4.8 – (A) Defletores de 6 mm de largura com 30° inclinação (vista isométrica); (B) Defletores de 6 mm de largura com 45° de inclinação (vista isométrica); (C) Defletores de 12 mm de largura e 30° inclinação.

Os defletores na conduta foram fixados através da pressão exercida pelas das paredes da conduta, pelo que ambos os conjuntos tinham a largura interna da conduta de ar (Figura 4.9).

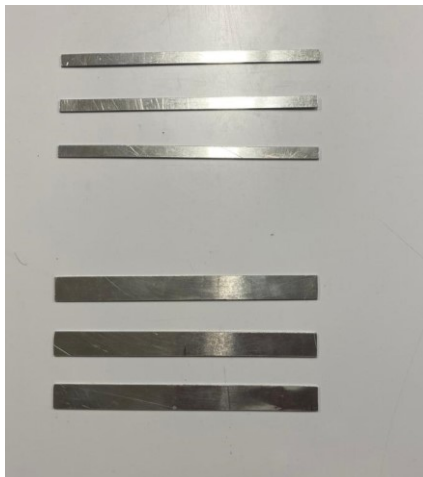


Figura 4.9 - Comparação dos dois conjuntos de placas defletoras.

4.3.3. Conduta de ar

Devido à necessidade de simular um ambiente de convecção forçada, construiu-se uma conduta de secção retangular. Esta foi idealizada de forma a mimetizar o máximo possível um ambiente externo, isto é, com uma razão significativa entre a altura da alheta e da conduta, de modo a assumir um escoamento externo, tal como o utilizado no estudo em que este trabalho experimental se baseou.

Numa fase inicial idealizou-se o desenho da conduta no *software Solidworks*, como demonstra a figura 4.10. Com recurso a uma máquina CNC do FabLab fez-se o corte com as dimensões pretendidas para a secção transversal, para a furação dos parafusos de aperto e a abertura, no plano inferior, para a superfície alhetada correspondente à secção de teste.

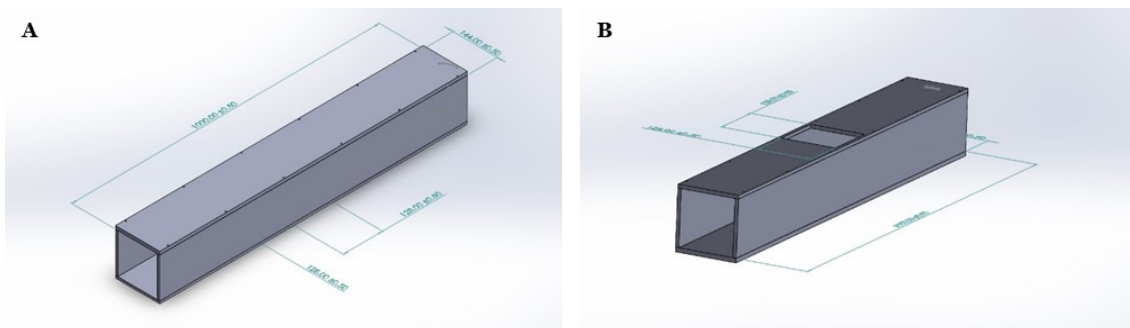


Figura 4.10 - Vista isométrica do desenho computacional.

Na construção da conduta foram utilizadas placas de acrílico com espessura de oito e dez milímetros para as paredes e tetos, respectivamente. Recorreu-se a este material devido às várias vantagens a ele associadas, como facilitar a observação durante todas as operações, ajustar os sensores à altura pretendida e, para trabalhos futuros, ser possível visualizar o comportamento do escoamento (Figura 4.11).



Figura 4.11 - Conduta de ar.

Com recurso ao material acrílico já existente, conseguiu-se construir uma conduta com um metro de comprimento. A Tabela 4.4 destaca as várias dimensões da conduta.

Tabela 4.4 - Características dimensionais da conduta de ar.

Comprimento [cm]	100
Largura [cm]	12,8
Altura [cm]	12,8
Área Transversal [cm ²]	16,4
Área da Secção de Testes [cm ²]	12,4*12,4
Razão altura da alheta e da conduta	26

4.3.4. Ventilador

Para tornar possível a simulação de um ambiente de convecção forçada instalou-se um ventilador, *Sunon XDFJGMS* (Figura 4.12). Este equipamento foi instalado na parte final da conduta de ar, de modo a permitir uma convecção por efeito de sucção do ar, como definido.

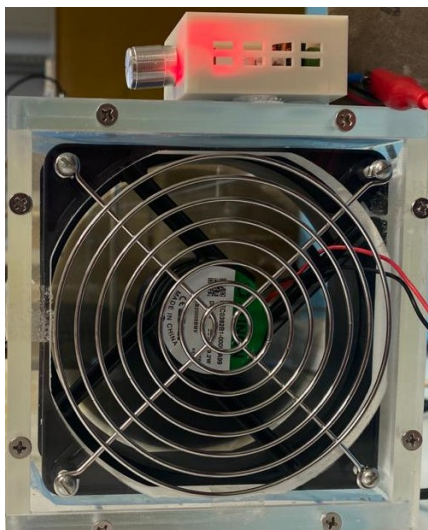


Figura 4.12 - Ventilador acoplado à conduta de ar.

Na Tabela 4.5 encontram-se descritas as condições de funcionamento do ventilador.

Tabela 4.5 - Características principais do ventilador *Sunon*.

Dimensões (largura x altura x profundidade) [mm]	120 x 120 x 38
Tensão de alimentação (V DC)	24
Corrente nominal (A)	0,4
Velocidade giratória (obr./min)	3100 ($\pm 10\%$)

4.3.5. Fonte de calor

A placa de aquecimento utilizada como dissipador de calor neste trabalho laboratorial, já existente no laboratório, é uma superfície plana, de secção quadrada medindo 11,8 cm de aresta de alumínio. É constituída por quatro resistências que, por sua vez, estão isoladas com lã de vidro, para minimizar as perdas de calor. Houve um

cuidado redobrado em criar um bom isolamento entre o material acrílico e a placa de aquecimento, através de uma junta de corticite visível na Figura 4.13.

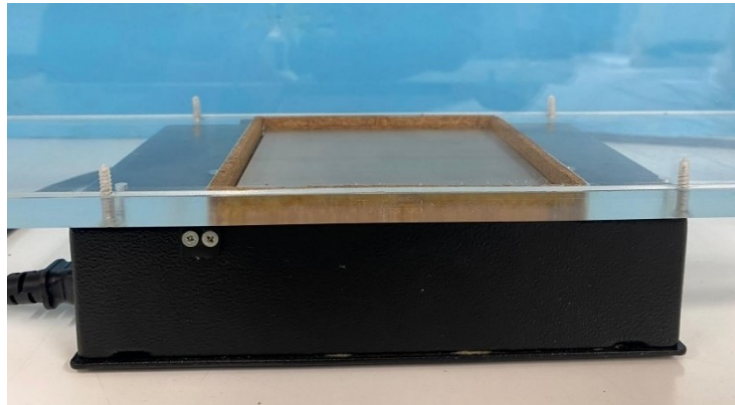


Figura 4.13 - Instalação da fonte de calor na conduta com isolamento em corticite (vista lateral).

Usou-se, ainda, o processo de impressão 3D para a fabricação de três peças: uma com o objetivo de uniformizar o escoamento da conduta, tendo em atenção a perda de carga causada (Figura 4.14). A segunda peça foi fabricada com o intuito de apoiar lateralmente os defletores (Figura 4.15) e, por último, produziram-se as peças de suporte da conduta.

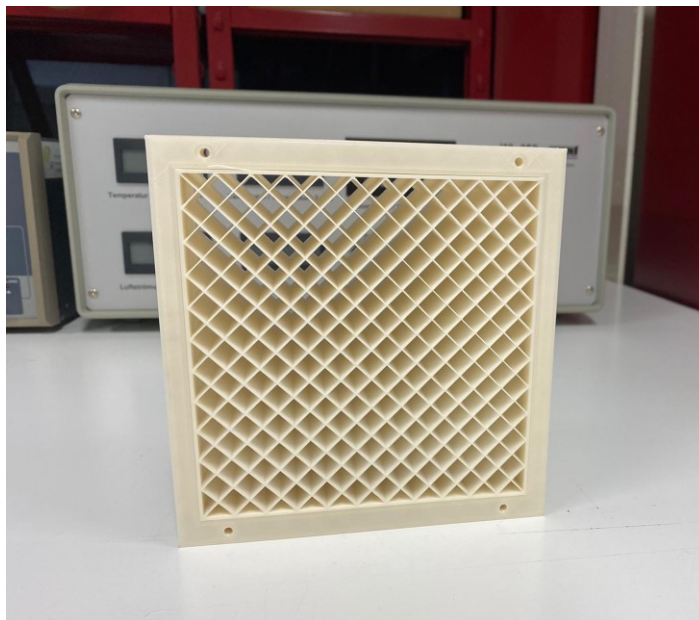


Figura 4.14 - Uniformizador de escoamento.

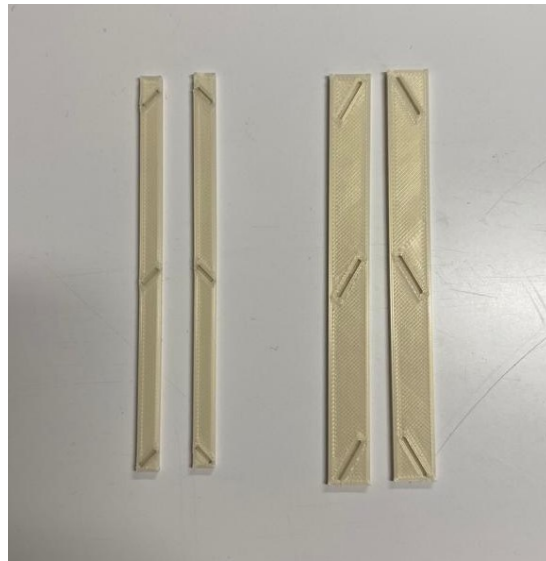


Figura 4.15 - Apoio lateral dos defletores.

4.4. Instrumentação

4.4.1. Regulador de Velocidade

Sendo a velocidade uma variável em estudo neste trabalho experimental, existiu a necessidade de se controlar o ventilador. Para isso, incluiu-se um regulador de velocidade, do modelo *PWM 6-28V 3A DC Motor Speed Switch Controller* (Figura 4.16).



Figura 4.16 - Regulador de velocidade.

4.4.2. Termopares

Na medição da temperatura foram utilizados termopares do tipo T (do fabricante *Omega Engineering*), colocados diretamente nas laterais das alhetas. Estes tipos de termopares foi o disponibilizado em laboratório para a execução deste trabalho, cumprindo o intervalo de valores de temperatura necessários.

A constituição do termopar compreende dois condutores elétricos, de materiais distintos. Uma das extremidades, é fixada na alheta do permutador, denominada de extremidade sensível, que permite recolher os resultados do comportamento térmico da superfície. A outra extremidade é ligada ao equipamento que realiza a aquisição de dados.

De forma a manter a coerência do estudo, recorreu-se ao mesmo tipo de termopares para a medição de temperaturas do escoamento, à entrada e à saída da secção de testes. O esquema da Figura 4.17 ilustra as distâncias a que estes foram colocados.

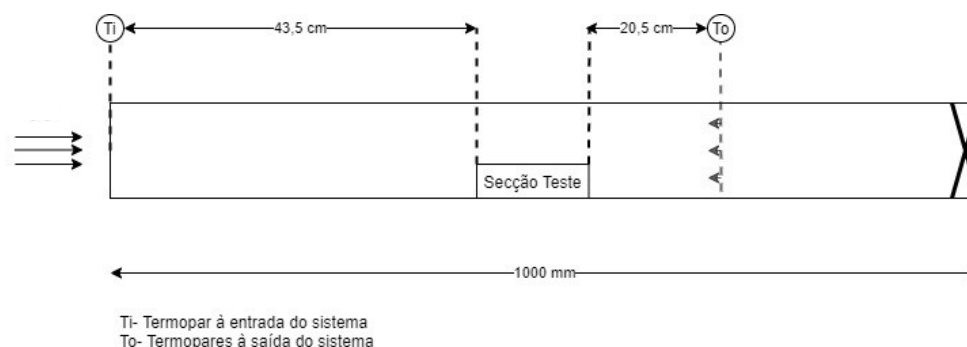


Figura 4.17 - Esquema do posicionamento dos termopares.

A temperatura à entrada foi medida com recurso a um termopar colocado a meia-altura da conduta. Já à saída foram colocados três termopares ao longo da altura da conduta, realizando-se a média aritmética das suas leituras para os cálculos à posteriori.

4.4.3. Datalogger de temperatura

Para fornecer as medições dos termopares referidos anteriormente, incorporou-se um *Datalogger* de temperatura, do modelo *PCE-T 1200* (Figura 4.18), cuja função é registar as temperaturas. A leitura dos valores foi armazenada num cartão de memória.



Figura 4.18 - Datalogger de temperatura PCE-T 1200.

A Tabela 4.6 destaca as características de funcionamento do *Datalogger*.

Tabela 4.6 - Características do *datalogger* de temperatura.

Nº canais para terminais	12
Condições de operação-Temperatura (°C)	Entre 0 e 50
Amplitude de medição- Temperatura (°C)	Entre -50 e 400 (Termopares Tipo T)
Precisão	$\pm (0,4\% \text{ do valor medido} + 0,5^{\circ}\text{C})$

4.4.4. Anemómetro de fio quente

Para medir o escoamento de ar que entra na conduta foi utilizado um anemómetro de fio quente à entrada da conduta. Como dispositivo digital foi usado um *Testo 425* (Figura 4.19.A), este equipamento está traçado para realizar medições de caudais volúmicos em condutas, constituído por uma sonda telescópica e um sensor NTC (permite a relação entre uma resistência elétrica e a temperatura) conectados permanentemente.

O anemómetro utilizado é o mais recomendado para medições nestes ambientes, uma vez que permite a realização do caudal volúmico de modo pouco intrusivo, por consequência das suas pequenas dimensões (Testo, 2009).

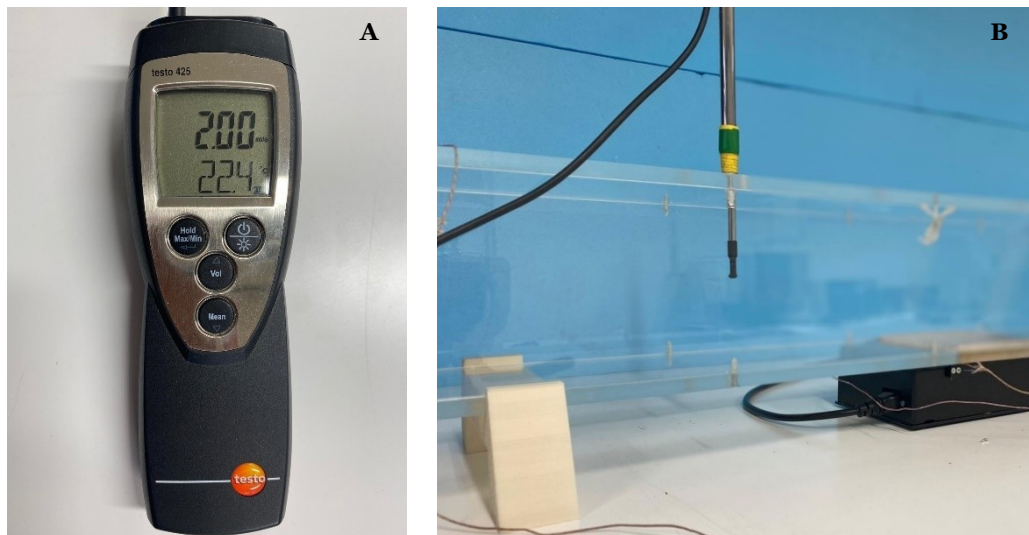


Figura 4.19 - (A) Leitor do anemómetro; (B) Sensor.

O princípio de funcionamento deste dispositivo tem por base a transferência de calor por convecção forçada entre um filamento aquecido, de forma elétrica, e o fluido escoado pela conduta. A velocidade é obtida através da variação da taxa de transferência de calor entre o escoamento e a sonda. A estabilização entre a variação da resistência elétrica do filamento e o escoamento é da responsabilidade do circuito interno do anemómetro, onde é possível obter os valores da velocidade e de temperatura do fluido a escoar (Moraes, 2003).

Tabela 4.7 - Características do anemómetro.

Gama de medição	Velocidade (m/s)	0 a 20
Resolução	Velocidade (m/s)	0,01
Precisão (± 1 dígito)	Velocidade (m/s)	$\pm 0,3$ (-5% do valor medido)

A Figura 4.20 apresenta a distância longitudinal do anemómetro em relação ao início da secção de teste, colocado a meia-altura da conduta (62 mm).

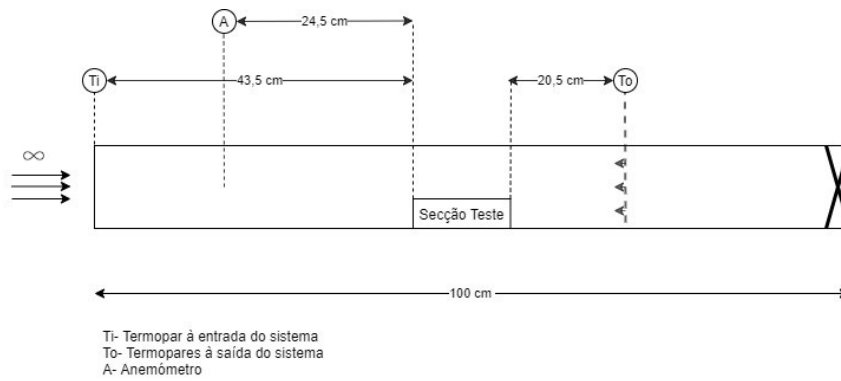


Figura 4.20 - Esquema da instrumentação da velocidade e temperatura da conduta.

4.4.5. Fontes de energia

Para fornecer energia ao ventilador recorreu-se a uma fonte de alimentação de corrente contínua, do fabricante *BK Precision* (modelo *Triple Output DC Power Supply 1660*) (Figura 4.21).

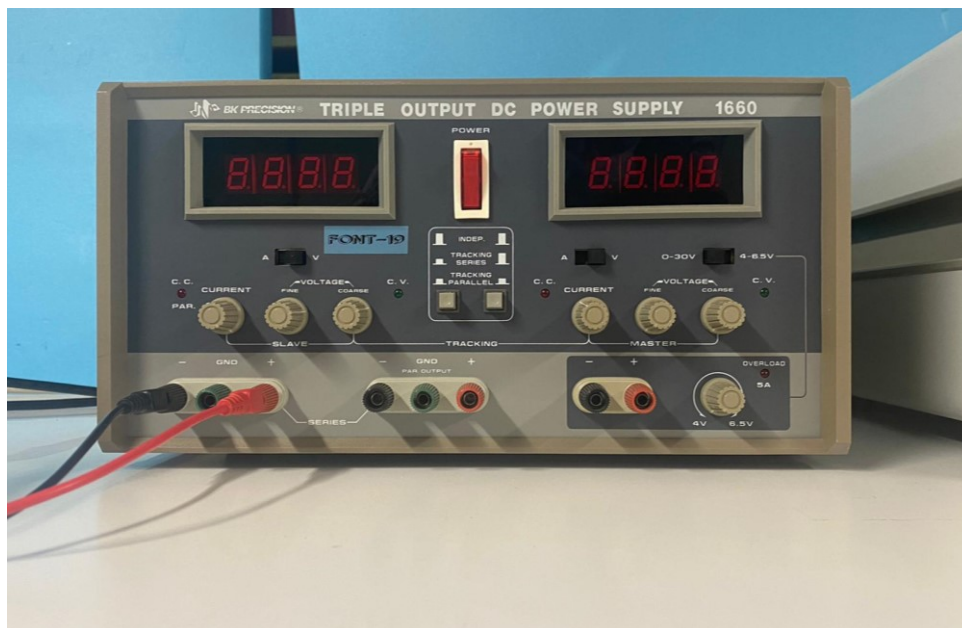


Figura 4.21 - Fonte de alimentação do ventilador.

No caso da fonte de calor, a energia é fornecida pela fonte de alimentação (*Gunt WL 352*) observada na Figura 4.22.



Figura 4.22 - Fonte de energia para a placa quente.

5. Análise e Discussão de Resultados

5.1. Procedimento Experimental

Os ensaios laboratoriais visaram obter resultados experimentais, de modo a quantificar o ganho térmico do ar pela implementação de um redireccionamento do escoamento. Precederam-se aos ensaios principais, um conjunto de testes para ajustar todo o sistema às características requeridas.

Inicialmente, avaliou-se a forma de medição da temperatura da superfície de alhetas. Nesse sentido foram considerados dois conjuntos de termopares:

- Um conjunto de quatro termopares sobre a superfície alhetada, numerados de um a quatro na Figura 5.1 e distribuídos de forma equidistante;
- Um segundo conjunto distribuído pelas duas laterais da superfície, numerados de cinco a oito.

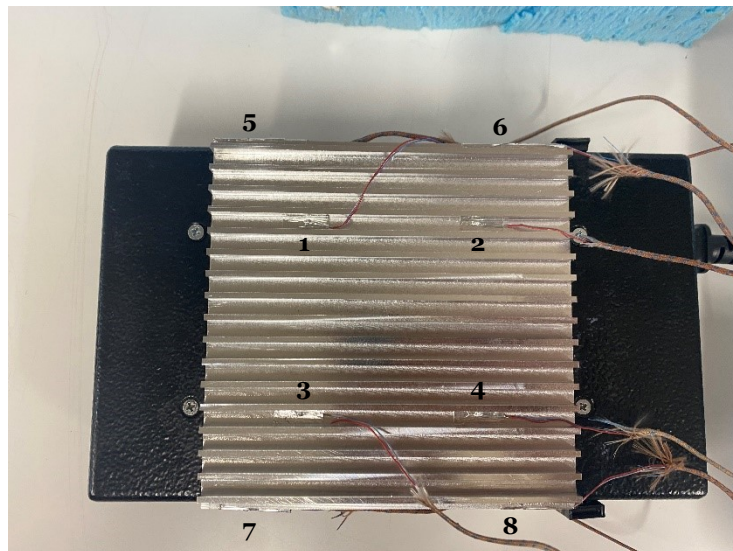


Figura 5.1 - Vista superior da placa com oito termopares.

A comparação das médias calculadas para ambos os conjuntos (Figura 5.2), permitiu afirmar que a temperatura lateral era uma boa representação da temperatura da superfície da placa, em função do maior desvio ser de $0,07^{\circ}\text{C}$. Com isto, beneficia-se do facto do escoamento não ser perturbado pelos termopares nos canais das alhetas.

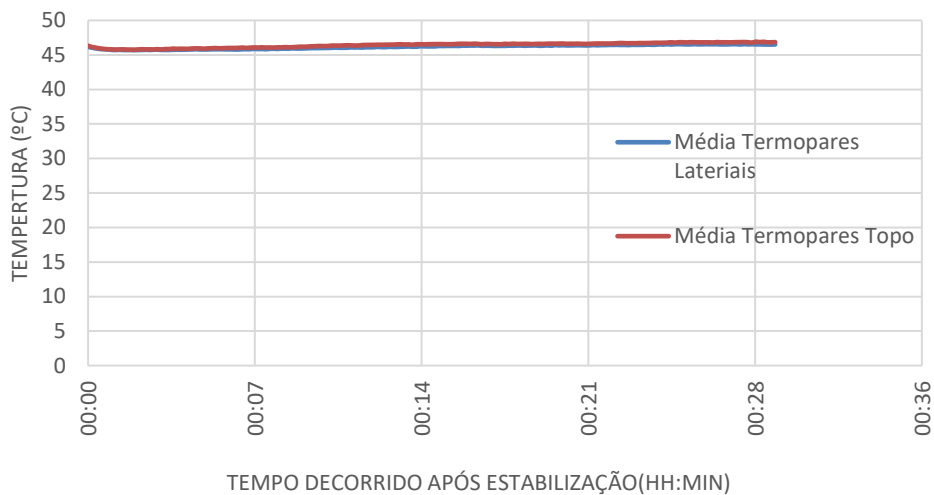


Figura 5.2 - Comparação da evolução dos dois conjuntos de termopares.

Seguidamente, para os termopares colocados à saída da secção de teste, visto no subcapítulo 4.4.2, fez-se um teste à perturbação do escoamento na região de saída da conduta (Figura 5.3).

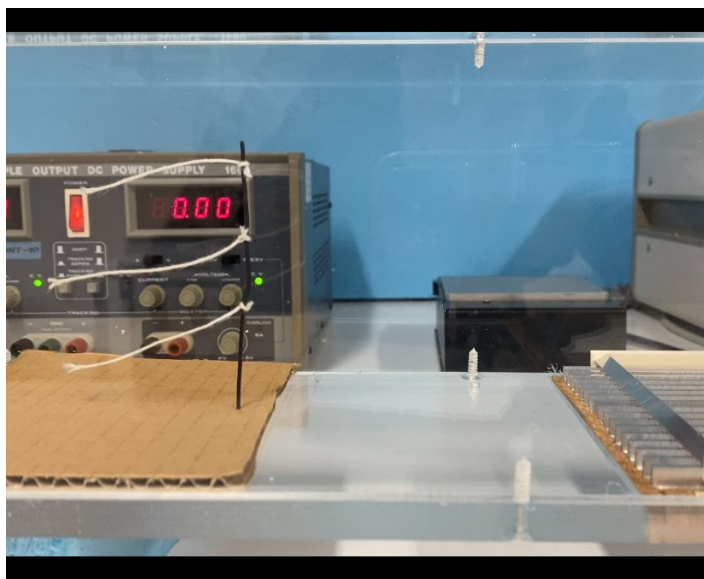


Figura 5.3 - Teste experimental, com linhas, da perturbação do escoamento.

A Figura 5.4 demonstra o tubo oco construído por impressão 3D para a medição da temperatura à saída, posicionando os três termopares de forma equidistante.

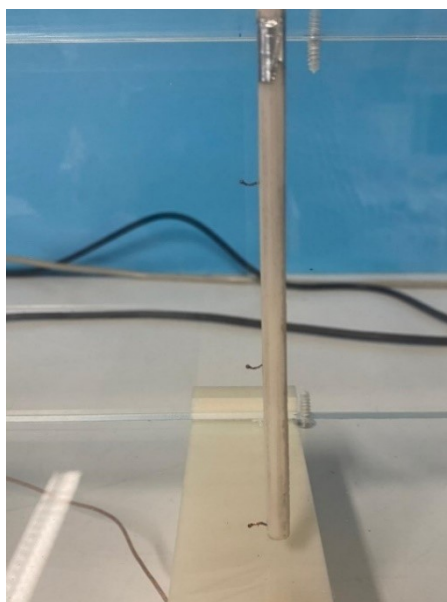


Figura 5.4 - Termopares para medição da temperatura de saída do escoamento.

Efetuuou-se, ainda, um varrimento de temperaturas à altura da conduta no local da medição da temperatura de saída. Verificou-se uma diferença entre a média de doze pontos de medição, para a média de três pontos de $0,4^{\circ}\text{C}$.

Realizou-se um teste, de modo a saber a gama de velocidades possível de atingir no interior da conduta. Dessa série de ensaios resultou uma curva de calibração entre a velocidade e a tensão, visível na Figura 5.5. Definiu-se uma velocidade mínima de $0,96\text{ m/s}$ e uma velocidade máxima de $4,55\text{ m/s}$.

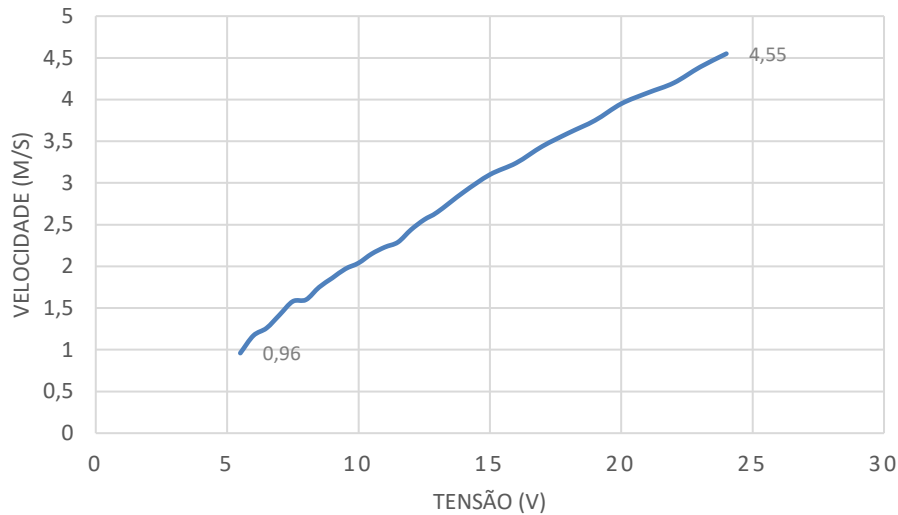


Figura 5.5 - Gama de velocidades do ventilador.

Por último, estudou-se um conjunto de combinações de potência fornecida *versus* velocidade do escoamento, para que existisse uma diferença de temperatura no ar à saída suficientemente significativa. A condição fronteira passava pelo limite de potência fornecido pela fonte de calor. Como medida de segurança a fonte desliga-se quando atinge os 100°C, como se pode ver pela Figura 5.6. Posto isto, definiram-se os ensaios e características dos mesmos.

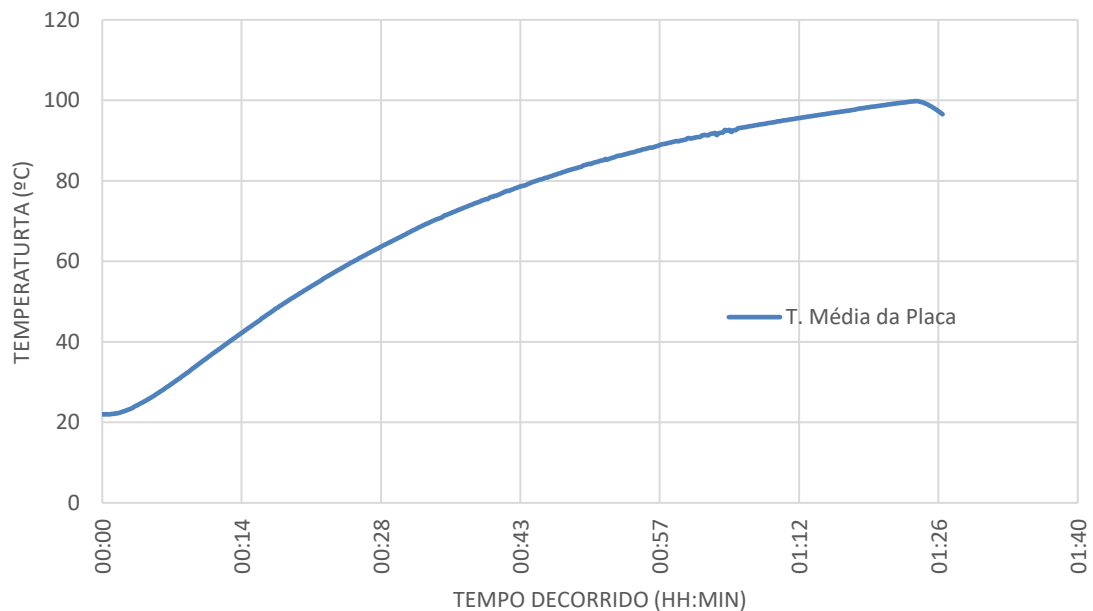


Figura 5.6 - Ensaio para teste da fonte de calor.

Após calibração de toda a unidade experimental (Figura 5.7), seguiram-se os ensaios laboratoriais com vista ao objetivo primordial da dissertação.

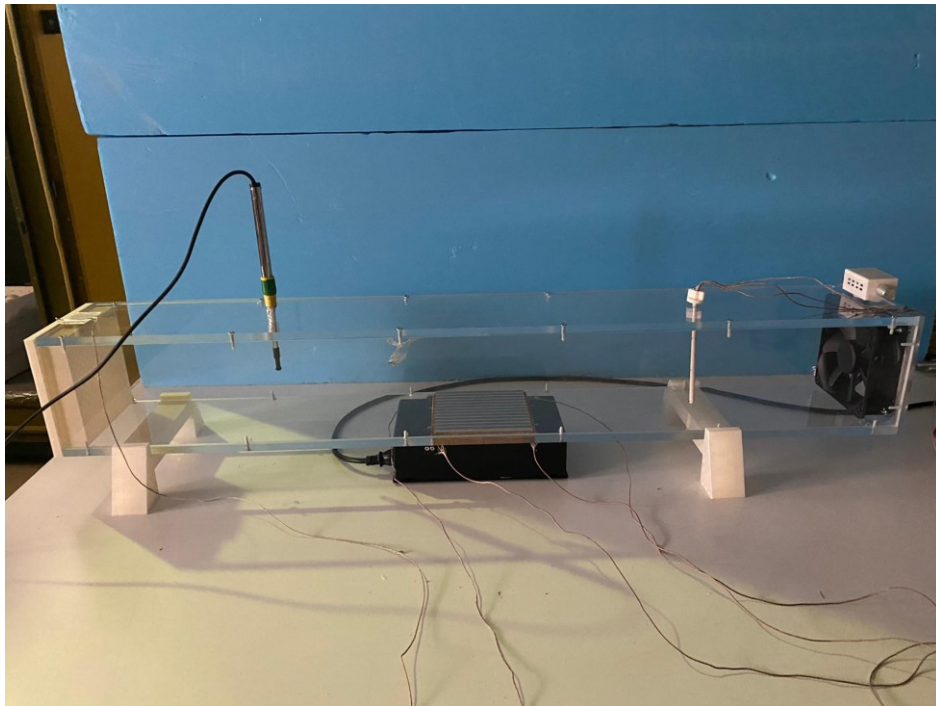


Figura 5.7 – Unidade experimental.

A Tabela 5.1 resume as características dos ensaios desenvolvidos.

Tabela 5.1 - Características dos ensaios realizados.

Ensaio	Velocidade (m/s)	Inclinação Defletor (°)	Superfície
1, 2, 3, 4, 5, 6	2	-	A, B, C, D, E, F
7, 8, 9, 10, 11, 12	2	30	A, B, C, D, E, F
13, 14, 15	2	45	A, D, F
16	1,5	-	F
17	1,5	30	F
18	1,5	45	F
19	3	-	F
20	3	30	F
21	3	45	F
22	4	-	F
23	4	30	F
24*	1,5	30	F
25*	3	30	F

(*) defletor de maior área.

Através da leitura da Tabela 5.1 pode-se verificar que os primeiros seis ensaios foram dedicados a todas as superfícies sem defletores.

Seguidamente, foram avaliadas novamente todas as superfícies com a inclusão do conjunto de placas defletoras com um ângulo de 30° correspondentes aos ensaios 7 a 12.

Os ensaios 13 a 15, visaram estudar o efeito da alteração do ângulo de ataque do defletor, passando este a ser de 45°, nas superfícies alhetadas A, D e F.

Os ensaios 16 a 25 são um estudo mais aprofundado para a superfície F.

Para efeitos de descrição do processo de ensaio considerou-se a entrada da conduta à esquerda como ponto de partida. O ar aspirado começa por passar no termopar à entrada da conduta, dando informação da temperatura do escoamento. De seguida, passa através do uniformizador de ar, ainda antes da secção de testes, este passa pelo anemómetro. Após percorrer vinte centímetros entra na secção de testes e percorre os doze centímetros de superfície alhetada. Por fim, passa pelo conjunto de três termopares, sendo a média destes o indicador da temperatura do ar à saída.

A metodologia utilizada para todos os ensaios foi a seguinte:

1. Fixação de 4 termopares nas duas laterais da superfície;
2. Colocação da superfície na conduta;
3. Calibração da velocidade do escoamento;
4. Início da gravação do ensaio;
5. Ativação da fonte de calor.

No caso de ser um ensaio com defletores, a placa já se encontrava instalada. Portanto, a montagem passava só pela instalação dos defletores a estudar nesse ensaio, conseguindo minimizar os erros sistemáticos associados. Exemplificado na sequência de imagens da Figura 5.8.

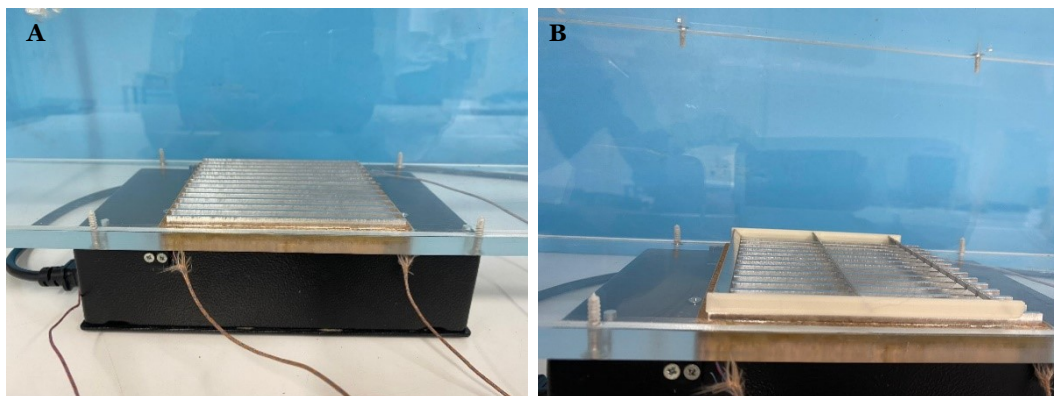


Figura 5.8 - Ensaio da superfície A: (A) sem defletores e (B) com defletores.

Posto isto, para o tratamento de resultados utilizou-se a média dos valores do último parcial de 20 minutos, para cada ensaio.

5.2. Ensaio Realizados

Os ensaios realizados e que serão agora expostos dividiram-se em três grupos: ensaio sem e com defletores e um caso particular.

5.2.1. Ensaio sem defletores

O estudo experimental iniciou-se pela avaliação somente das superfícies alhetadas.

No momento inicial, o sistema encontra-se em equilíbrio, sendo que após a ligação da fonte de calor se verifica o aumento da temperatura média da placa até atingir um regime permanente. Como exemplo da metodologia de cálculo usada, bem como, da interpretação gráfica do comportamento descrito, analisou-se o ensaio à superfície F no caso de “sem defletores”.

A análise do ensaio começa com a verificação gráfica da presença de um regime permanente. Este regime pode ser constatado pela curva seguida de uma linha reta.

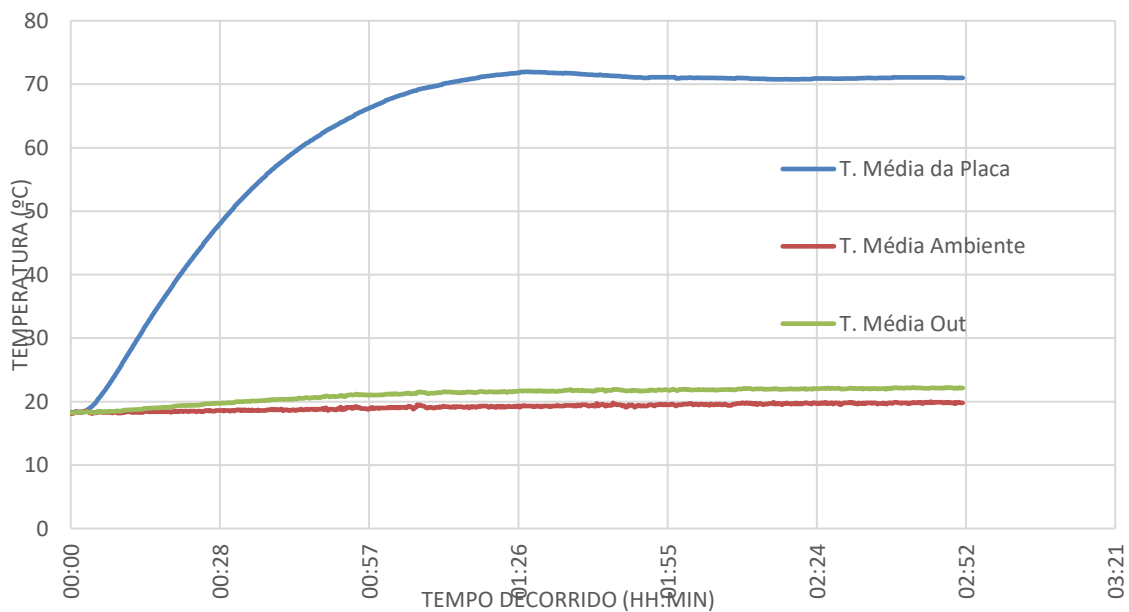


Figura 5.9 - Evolução das temperaturas médias ao longo do tempo durante o ensaio 6.

Como é possível observar, pela Figura 5.9, o ensaio durou aproximadamente duas horas e cinquenta e dois minutos. Destacando o último parcial de 20 minutos utilizado para os cálculos, onde se comprova o regime permanente pela reta, na Figura 5.10, sem oscilações.

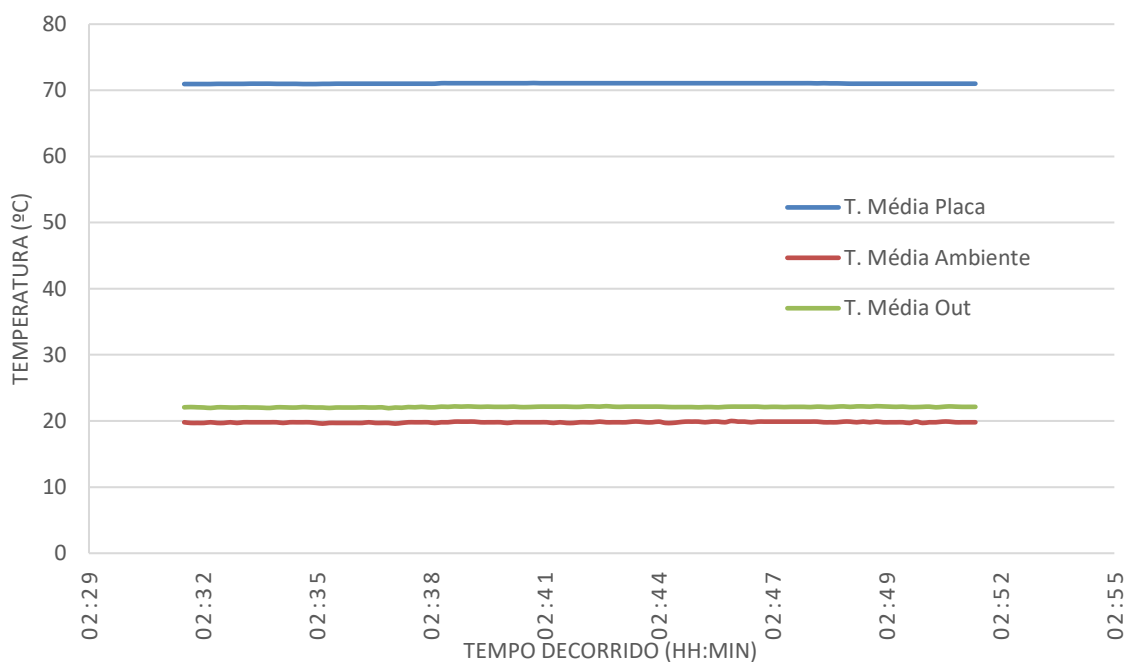


Figura 5.10 - Destaque do último parcial de 20 minutos de ensaio.

Passada esta verificação, inicia-se o tratamento dos dados recolhidos com a média das temperaturas da superfície da placa e do escoamento, de entrada e de saída, para o propósito do cálculo de duas diferenças de temperaturas. Um ΔT interno, ΔT_i , com aplicação na Equação 3.3 e um ΔT externo, ΔT_e , com aplicação na Equação 3.2.

No caso do ΔT_i , dado pela diferença entre a temperatura do escoamento à saída e à entrada da conduta, tentou-se maximizá-la, contudo devido ao limite térmico da fonte de calor essa diferença tomou valores entre 1,5°C a 2,6°C.

Já no caso do ΔT_e , representativo da diferença entre a temperatura da placa e a temperatura do escoamento à entrada a diferença foi bastante substancial, tomando valores superiores a 50°C.

A medição das temperaturas tem um erro experimental associado na ordem dos 0,6°C.

Com a temperatura média do escoamento e, tendo por base, as tabelas da literatura *Bergman et al.* (2011) recorreu-se ao método de interpolação linear para quantificar algumas propriedades do ar (Tabela 5.2) (Bergman et al., 2011).

Tabela 5.2 - Interpolação linear das características do ar.

T [K]	roh [kg/m³]	k [W/(mK)]	v[m²/s]	Pr	Cp
250	1,3947	2,23E-02	1,14E-05	0,72	1006
300	1,1614	2,63E-02	1,59E-05	0,707	1007
293	1,1927	2,58E-02	1,53E-05	0,709	1006,9

A Tabela 5.3 resume os caudais obtidos para as diferentes velocidades do escoamento, lidas pelo anemómetro usadas nos ensaios.

Primeiro, para o cálculo do caudal volúmico recorreu-se à simplificação da área da secção transversal, devido à elevada razão entre a altura da conduta e altura das alhetas ter um impacto da área frontal ocupada pelas alhetas no máximo 2% do valor total. Sendo assim, a área considerada foi a secção transversal da conduta.

Com recurso à interpolação da Tabela 5.2, calculou-se o caudal mássico.

Tabela 5.3 - Caudais volúnicos e mássicos para as várias velocidades de escoamento.

Velocidade (m/s)	Caudal Volúmico (m³/s)	Caudal mássico (kg/s)
1,5	0,025	0,029
2	0,033	0,039
3	0,049	0,059
4	0,066	0,079

Na medição da velocidade o erro experimental médio associado é de 0,2 m/s.

Como apresentado no capítulo 3, o número de *Reynolds* fornece a informação do tipo de escoamento em causa.

Pelas Equações 3.4, obtemos os seguintes números de *Reynolds* (Tabela 5.4):

Tabela 5.4 - Números de *Reynolds* para os ensaios realizados.

Velocidade (m/s)	Re
1,5	1,25E+04
2	1,68E+04
3	2,51E+04
4	3,34E+04

Como é possível observar, todos os casos apresentam um regime turbulento. Na medida em que este é o tipo de escoamento presente na localização de superfícies alhetadas em motores de aeronaves.

Nesta fase havia informação suficiente para fazer um balanço térmico ao ar, considerando o regime de escoamento interno, como explicado no subcapítulo 3.2. Pela Equação 3.3 obtiveram-se as taxas de transmissão de calor para o ar. Para ensaios a 2 m/s em situação de alheta sem defletores, obtiveram-se as taxas de calor apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Taxas de calor para ensaios a 2 m/s sem defletores.

Superfícies Alhetadas	q (W)
A	61,4
B	51,1
C	52,7
D	48,5
E	32,9
F	91,1

Os cálculos corresponderam ao esperado, para as superfícies com menor área obteve-se menor transmissão de calor para o ar, 32,9 W (Figura 5.11. D), enquanto para maior área de superfície teve-se uma maior taxa de calor, sendo 91,1 W (Figura 5.11. F).

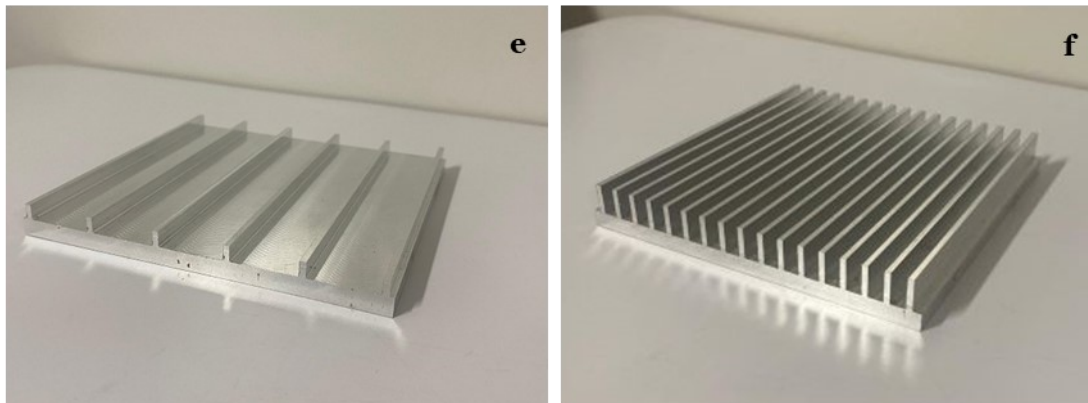


Figura 5.11 - Superfícies alhetadas D e F.

Através de alguma manipulação algébrica da Equação 3.1 obteve-se o valor do coeficiente convectivo. Analisou-se, na Figura 5.12, os valores obtidos de coeficiente convectivo, para a primeira bateria de ensaios (1 a 6), na situação da inexistência de defletores.

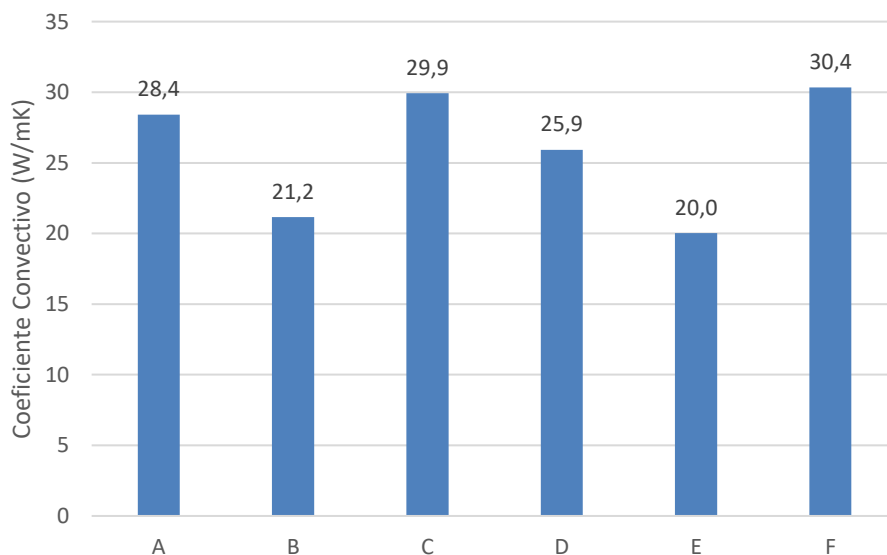


Figura 5.12 - Valores do coeficiente convectivo para ensaio, sem defletor, das superfícies alhetadas.

Da análise da superfície B e C, Figura 5.13, é de esperar que a área disponível à entrada dada pela forma, $\frac{t}{(s+t)}$, não se mostre tão relevante quando comparado com a área de superfície.

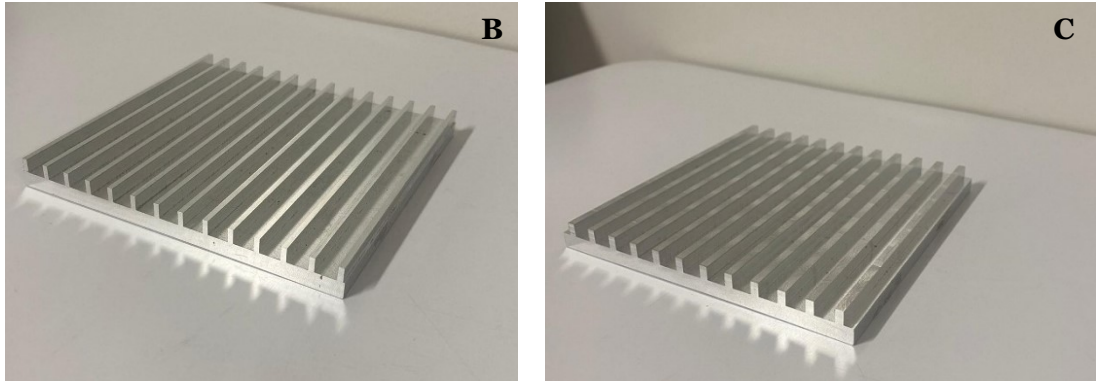


Figura 5.13 - Superfícies alhetadas B e C.

Valores do quociente S/H menores demonstram um efeito positivo traduzido em maiores coeficientes convectivos.

Comprova-se, consoante a literatura sobre superfícies alhetadas, que as alhetas com maior área de superfície representam um maior coeficiente convectivo.

Observou-se na Figura 5.13 o número de *Nusselt*, calculado pela Equação 2.5, que proporcionalmente ao coeficiente convectivo foi máximo para a superfície F e mínimo para a superfície D.

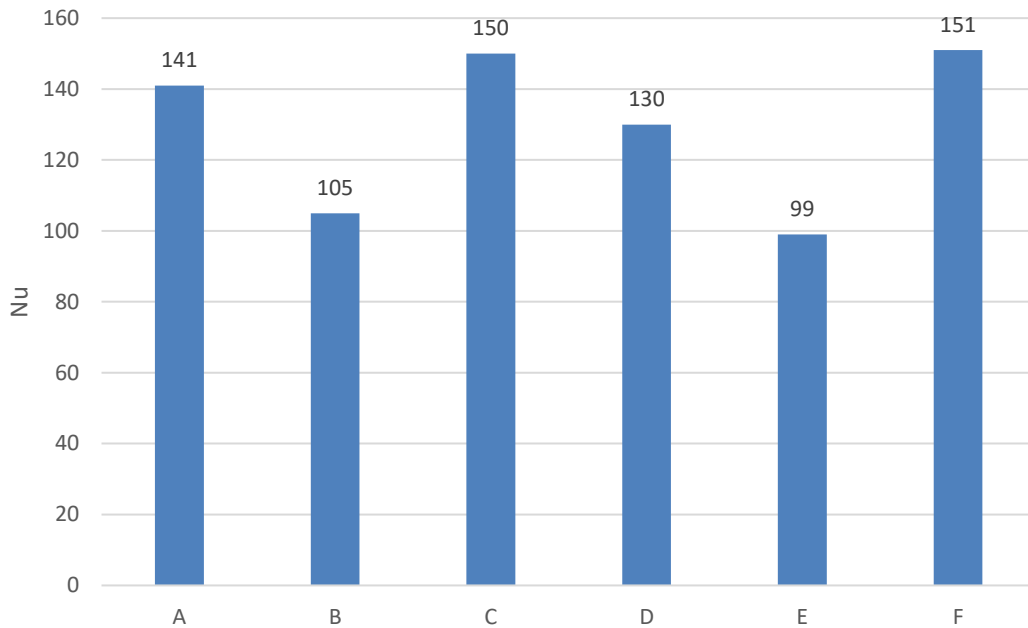


Figura 5.14 - Número de *Nusselt* para cada superfície sem defletores.

5.2.2. Ensaio com defletores

Após quantificação do comportamento das várias superfícies em relação à dissipação de calor, um dos objetivos futuros passa por aumentar esses mesmos valores, recorrendo ao já mencionado, sistema de redireccionamento do escoamento.

No entanto, o estudo dos defletores passou, não só pela avaliação positiva ou negativa da sua implementação, assim como, pelo impacto da variação do ângulo de ataque das placas defletoras. Apresentaram-se inicialmente os resultados obtidos para um ângulo de trinta graus e de seguida para um ângulo de quarenta e cinco graus.

5.2.2.1. Defletores com 30 graus de inclinação

Da mesma forma que se avaliaram anteriormente as superfícies alhetadas através do valor do coeficiente convectivo procedeu-se também para a implementação dos defletores, de forma comparativa.

Observando a Tabela 5.6 das evoluções das taxas de calor indicativos do efeito positivo dos defletores, dado que se verificaram maiores diferenças no ΔT_i e no ΔT_e na realização ensaios 7 a 12.

Tabela 5.6 - Taxa de calor para o ar nos ensaios 1 a 12.

	Defletor	q (W)
A	-	61,5
	30°	63,4
B	-	51,2
	30°	70,0
C	-	52,7
	30°	61,9
D	-	48,5
	30°	55,5
E	-	33,0
	30°	49,0
F	-	91,1
	30°	93,2

Ao analisar os resultados, constatou-se o aumento de todas as variáveis da Equação 3.3. Pode-se, então, prever o benefício do uso dos defletores traduzido no aumento do coeficiente convectivo das superfícies alhetadas.

Observando o Figura 5.15, obtém-se a comparação direta do valor da transmissão de calor para cada superfície, sem defletores (-) e com defletores (30°).

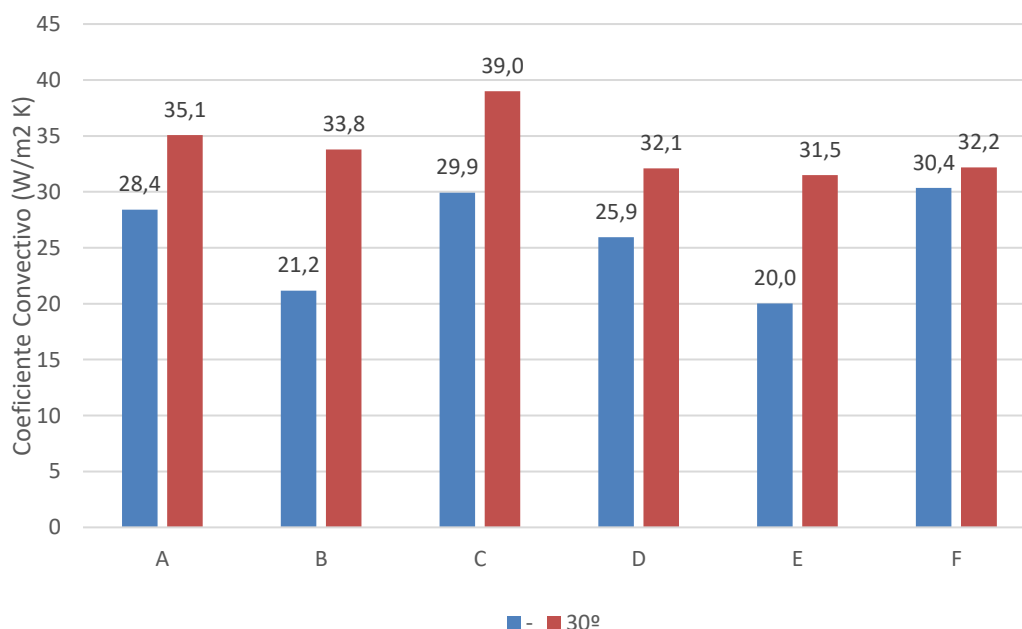


Figura 5.15 - Comparação do coeficiente convectivo para situação sem defletor (-) e com defletor (30°).

Começando por avaliar a superfície A pode-se identificar um acréscimo de 23% no valor do h . Esse acréscimo toma um valor ainda maior quando para a mesma superfície se se aumentar somente o espaçamento (superfície B), sendo que para este caso a vantagem de defletores traduz-se em 60%.

Se, em vez de se aumentar o espaçamento, se aumentar a espessura da alheta verifica-se um decréscimo na vantagem dos defletores, passando este a ser de aproximadamente 30%, um efeito significativo para um maior bloqueio da área frontal.

Observaram-se as superfícies D e E com características de um afastamento desproporcionado das alhetas, para compreender se seria possível um efetivo redirecionamento. Esse efeito foi comprovado pelo aumento do coeficiente convectivo até 57%. Destacando um efeito mais notório para um valor de S/H na ordem dos 5. Mas, de notar, que para valores de 4 ou mais esse comportamento tem tendência a decrescer.

Avaliando, por fim, a última superfície de trabalho, a superfície F. Para esta superfície, caracterizada por um L/H e um S/H menor, em cerca de metade, a aplicação dos defletores demonstrou ter um efeito pouco notório na alheta.

5.2.2.2. Defletores com 45 graus de inclinação

Para se perceber qual a influência do ângulo de ataque no contexto de um redirecionamento mais eficiente estudou-se uma variação de 15 graus na inclinação, passando a 45 graus, utilizando-se as mesmas placas defletoras. A Figura 5.12, facilita a obtenção de algumas ilações.

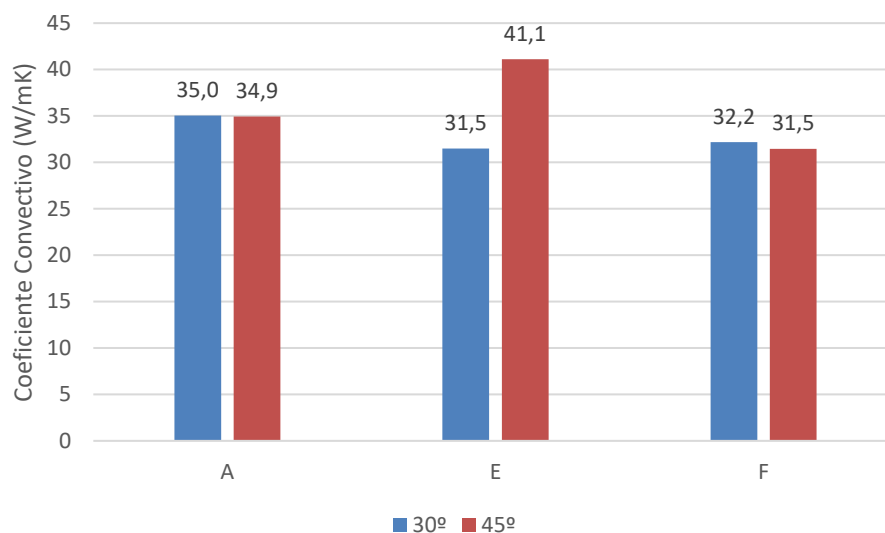


Figura 5.16- Comparação do coeficiente convectivo para situação com defletor (30°) e com defletor (45°).

De facto, em comparação com os defletores de 30°, não se verifica nenhuma vantagem na prática de uma maior inclinação, tanto na superfície A, como na superfície F.

Já na superfície E, caracterizada por uma razão S/H elevada, além da já verificada vantagem em aplicar defletores, estes demonstraram um acréscimo de 30% na variação do ângulo de ataque para 45°.

5.2.3. Caso F

Ao se verificar um acréscimo muito pouco notório na superfície F, desenvolveu-se um estudo mais aprofundado para se conseguir compreender o comportamento da superfície aos defletores. Pelo que, se realizaram mais quatro estudos: a uma velocidade menor (1,5 m/s), duas velocidades maiores (3 e 4 m/s) e com os defletores com maior área frontal.

Na Figura 5.17 observaram-se os três cenários físicos diferentes.

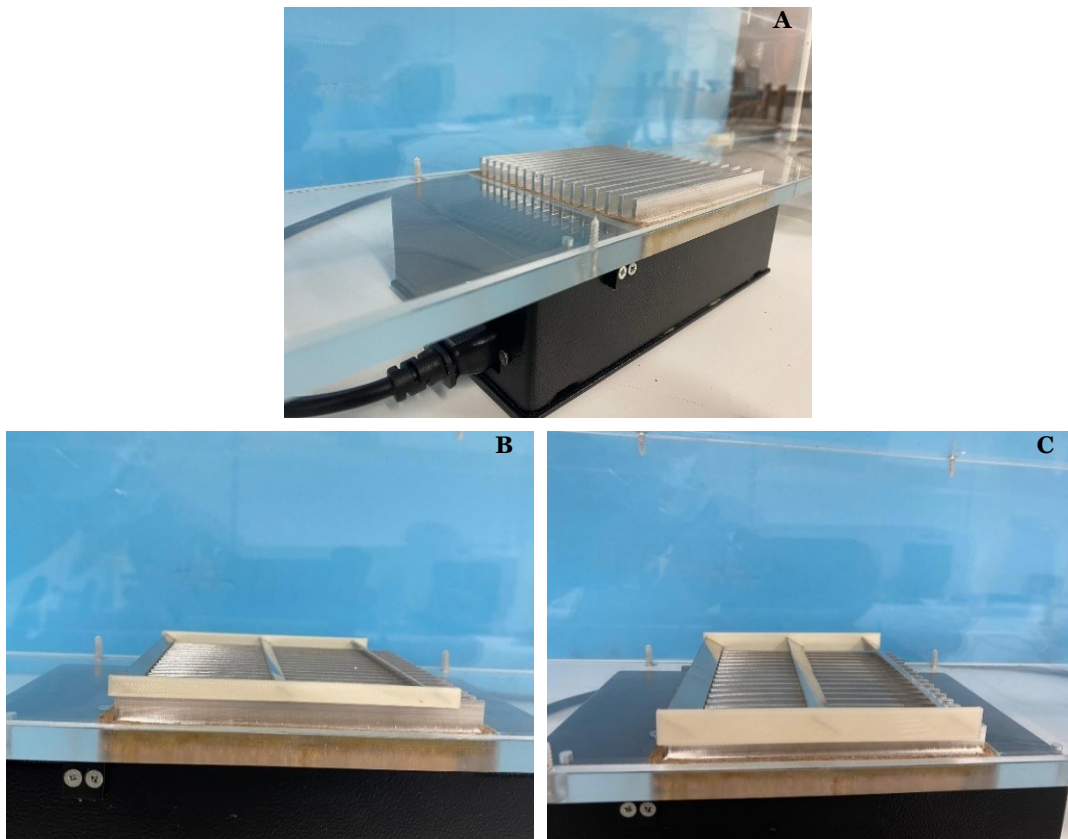


Figura 5.17- Sequência de ensaios da superfície F: (A) sem defletores, (B) com defletores de 6 mm e (C) com defletores de 12 mm.

Os defletores inicialmente utilizados tinham uma dada razão entre a área frontal projetada e a altura da alheta. Como para o caso da superfície F a altura da alheta era maior que as outras superfícies, em 2 vezes, então estudou-se o caso de um defletor com o dobro da área do até então estudado.

A Tabela 5.7 sintetiza os valores obtidos dos ensaios mencionados.

Tabela 5.7 - Síntese de ensaios, à superfície F, e respectivos resultados.

V (m/s)	Defletores	ΔT_i (°C)	ΔT_e (°C)	q (W)	h (W/m ² K)	Nu
1.5	-	2,5	54,7	74,9	23,4	117
	30	2,0	40,2	60,4	25,7	128
	45	2,7	53,75	81,4	25,9	129
	30*	2,5	51,72	72,9	24,1	119
2	-	2,3	51,23	91,1	30,4	151
	30	2,4	49,47	93,2	32,2	160
	45	2,4	52,09	96,0	31,2	157
	30*	2,0	44,74	84,1	32,1	159
3	-	2,7	97,12	161,0	41,0	204
	30	2,6	59,4	153,4	44,1	220
	45	2,5	57,37	146,7	43,7	218
	30*	2,4	53,09	139,5	45,9	223
4	-	2,4	60,0	187,2	53,3	264
	30	2,6	47,3	170,5	61,6	306

Observou-se na Tabela 5.7 o cuidado de trabalhar dentro de um intervalo próximo de ΔT_i , representativo de ambientes semelhantes, podendo existir uma comparação fiável.

Conduto, é de notar o crescimento da taxa de calor para o ar com o aumento da velocidade, como seria de esperar.

Transportando a informação dos valores obtidos do coeficiente convectivo para um gráfico de barras, Figura 5.18, pode-se verificar que o contributo dos defletores é diretamente proporcional ao aumento da velocidade.

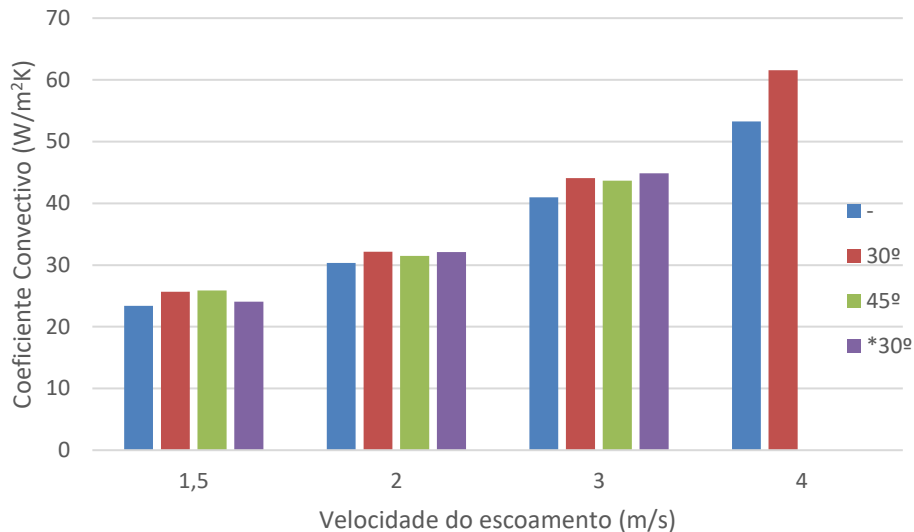


Figura 5.18- Comportamento da superfície F aos ensaios desenvolvidos.

Quando o escoamento se desenvolveu a 1,5 m/s os defletores registaram um efeito positivo com um aumento no coeficiente convectivo de 10%. A conclusão do efeito do ângulo de ataque de 45° ser pouco significativo é reforçada neste ensaio. Não se podendo afirmar que existe uma melhoria do coeficiente convectivo de um caso para o outro.

No regime de velocidade de 2 m/s, verifica-se que também o defletor criado especificamente para estas alhetas, como referido, com a mesma razão de área para altura de alheta igual às restantes superfícies, demonstrou-se sem um efeito relevante, quando comparado com o defletor de 30° menor.

Para velocidades mais elevadas, os defletores demonstraram-se cada vez mais benéficos, sendo que para 3 m/s traduz-se num aumento de 8%. Não se trata de um aumento considerável, mas sim da indicação de que tem uma maior percentagem que na velocidade anterior.

Avaliando num escoamento com uma velocidade de 4 m/s o acréscimo na taxa de transmissão é de 16%. Valor já preponderante para se afirmar que existe uma efetiva vantagem.

Para a superfície F, devido ao estudo mais extensivo obteve-se informação suficiente para relacionar o comportamento do número de *Nusselt* em função do número de *Reynolds* (Figura 5.19). Podendo concluir-se que os defletores terão um efeito mais significativo com o aumento da velocidade.

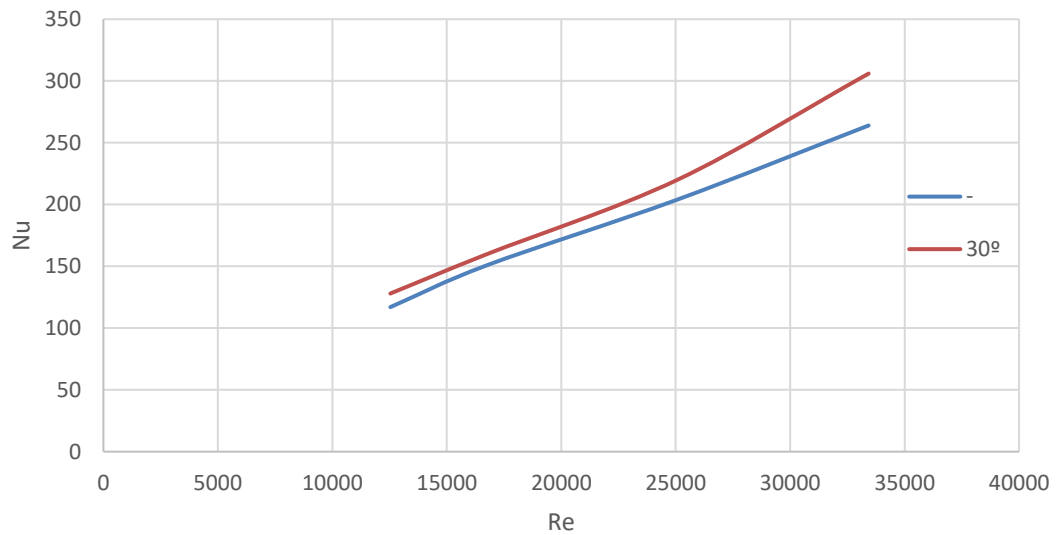


Figura 5.19- Relação do número de *Nusselt* com o número de *Reynolds*.

6. Conclusão

6.1. Recapitulação

Para a realização da presente dissertação elaborou-se uma unidade experimental, constituída por uma conduta de ar recriando um ambiente de convecção forçada e 6 superfícies alhetadas alvos de estudo. Após se definirem as características das superfícies foram delineadas as condições de velocidade e temperatura da placa a ser estudadas.

A condição de referência foi avaliada antecipadamente e consistiu no ensaio da superfície sem defletores. Esta condição serve de referência para comparação das restantes condições com defletores. Retirando-se conclusões do desempenho térmico de cada superfície para uma situação de redireccionamento do escoamento.

Os ensaios decorreram sobre 6 superfícies que se diferenciavam numa das características fundamentais: altura, espaçamento ou espessura. Dos resultados obtidos foi possível concluir que para maiores espaçamentos (S/H na ordem de 4), os defletores destacaram-se na melhoria do desempenho da superfície. Para uma entrada em que haja um bloqueio maior, ou seja, uma maior razão da espessura pela altura, verifica-se um efeito menos pronunciado do defletor.

Quando o defletor possui uma maior inclinação, neste caso de 45° , verificou-se um impacto significativo para o afastamento entre alhetas, superior a 4. Nos restantes casos não se revelou um acréscimo suficientemente grande para compensar a maior perda de carga que existe, embora não tenha sido contabilizada.

A avaliação mais extensiva da superfície F permitiu concluir que a velocidade é um fator muito influente na diferença entre a situação de com e sem defletor. Por outro lado, defletores maiores não correspondem a um valor maior do coeficiente convectivo.

6.2. Sugestão para trabalho futuro

Atendendo ao facto de existir uma unidade experimental desenvolvida e se comprovar o efeito positivo do novo conceito de defletores abordado no presente trabalho, é importante continuar a desenvolver mais estudos, no sentido de conhecer onde esta solução tem mais impacto. Para isso existem alguns pontos interessantes a serem estudados:

- Ensaaios para regimes de velocidades superiores;
- Estudar o comportamento dos defletores conjugados com outras configurações;
- Avaliar a influência de outros ângulos de ataque, bem como outras dimensões das placas defletoras.

Bibliografia

- Aziz, A., & Fang, T. (2010). Alternative solutions for longitudinal fins of rectangular, trapezoidal, and concave parabolic profiles. *Energy conversion and Management*, 51(11), 2188-2194.
- Aziz, A., Kraus, A. D. (1995). Transient heat transfer in extended surfaces. *Applied Mechanics Reviews*, 48(7), 317-350.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. *John Wiley & Sons*.
- Bouchenafa, R., Mohammed, H. A., & Saim, R. (2019). Numerical study of the thermal and hydraulic performances of heat sink made of wavy fins. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 23(1), 150-161.
- Cai, H., Su, L., Liao, Y., & Weng, Z. (2019). Numerical and experimental study on the influence of top bypass flow on the performance of plate fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 146, 356-363.
- Cheng, K. C., & Fujii, T. (1998). Heat in history Isaac Newton and heat transfer. *Heat transfer engineering*, 19(4), 9-21.
- Elsayed, M. L., & Mesalhy, O. (2015). Effect of a slotted shield on thermal and hydraulic performance of a heat sink. *Journal of Electronic Packaging*, 137(1), 13-1140.
- Herring, N. R., & Heister, S. D. (2006). Review of the development of compact, high performance heat exchangers for gas turbine applications. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 47853, pp. 467-476).
- Kellermann, H., Habermann, A. L., & Hornung, M. (2020). Assessment of Aircraft Surface Heat Exchanger Potential. *Aerospace*, 7(1), 1-19.
- Kim, S., Min, J. K., Ha, M. Y., & Son, C. (2014). Investigation of high-speed bypass effect on the performance of the surface air–oil heat exchanger for an aero engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 321-334.
- Kim, M., Ha, M. Y., & Min, J. K. (2018). A numerical study on the aero-thermal performance of a slanted-pin-fin cooler under a high-speed-bypass condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 791-812.
- Kou, H. S., Lee, J. J., & Lai, C. Y. (2003). Thermal analysis and optimum fin length of a heat sink. *Heat transfer engineering*, 24(2), 18-29.
- Lienhard, I. V., & John, H. (2017). A heat transfer textbook. phlogiston press, fourth edition.

- Liu, J., Peck, J., Yazawa, K., Fisher, T. S., & Shih, T. I. (2019). Bypass, Loss, and Heat Transfer in Aircraft Surface Coolers. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 46.
- Moraes, C. (2003). Anemómetro a Fio Quente. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, 1-8.
- Sakuma, Y., Saito, H., Watanabe, T., Himeno, T., Inoue, C., Tomida, S., & Takahashi, N. (2017). Conjugate Heat Transfer Analysis on Plate Fin Surface Air Cooled Oil Cooler. *Proceedings of the Shanghai*, 1-7.
- Shalan, M. R., Saleh, M. A., Mesalhy, O., & Elsayed, M. L. (2012). Thermo/fluid performance of a shielded heat sink. *International journal of thermal sciences*, 60, 171-181.
- Shademan, M., & Naghib-Lahouti, A. (2020). Effects of aspect ratio and inclination angle on aerodynamic loads of a flat plate. *Advances in Aerodynamics*, 2(1), 1-23.
- Silva, P. D. (2017). Apontamentos de Transmissão de Calor.
- Sousa, J., Villafañe, L., & Paniagua, G. (2014). Thermal analysis and modeling of surface heat exchangers operating in the transonic regime. *Energy*, 64, 961-969.
- Tecchio, C., Paiva, K. V., Oliveira, J. L. G., Mantelli, M. B. H., Gandolfi, R., & Ribeiro, L. G. S. (2017). Passive cooling concept for onboard heat sources in aircrafts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 402-413.
- Torabi, M., Aziz, A., & Zhang, K. (2013). A comparative study of longitudinal fins of rectangular, trapezoidal and concave parabolic profiles with multiple nonlinearities. *Energy*, 51, 243-256.
- Wang, T., Britcher, C., & Martin, P. (1999). Surface heat exchangers for aircraft applications-A technical review and historical survey. In *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 119).
- Wu, H. H., Hsiao, Y. Y., Huang, H. S., Tang, P. H., & Chen, S. L. (2011). A practical plate-fin heat sink model. *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 984-992.