



**Desenvolvimento de Placas Arrefecedoras de Alto Desempenho  
para Arrefecimento de Componentes Eletrónicos**

Pedro Dias Mata

Uminho | 2022



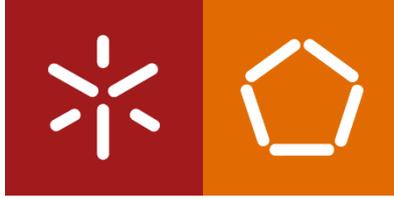
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Pedro Dias Mata

**Desenvolvimento de Placas Arrefecedoras de  
Alto Desempenho para Arrefecimento de  
Componentes Eletrónicos**

Fevereiro 2022





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Pedro Dias Mata

**Desenvolvimento de placas arrefecedoras  
de alto desempenho para arrefecimento de  
componentes eletrónicos**

Tese de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do(s)

**Professor Doutor Óscar Samuel Novais Carvalho**

**Professor Doutor Francisco Carrusca Pimenta Brito**

Fevereiro/2022

# **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

## **Licença concedida aos utilizadores deste trabalho**



**Atribuição-NãoComercial  
CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

# AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus orientadores, Profs. Óscar Carvalho e Francisco Brito pelo constante apoio, interesse e disponibilidade que demonstraram ao longo do desenvolvimento deste tema, disponibilizando os recursos dos laboratórios de CMEMS e do laboratório de motores para o que fosse necessário.

Ao meu colega Vipin Richhariya, pela disponibilidade e transmissão de conhecimentos na produção das placas texturadas, nomeadamente na utilização dos dispositivos necessários e nos vários procedimentos de operação dos mesmos, sempre com uma boa disposição contagiante.

Ao Eng. Filipe Marques, pela disponibilidade e ajuda não só na produção de peças nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, mas também pela troca de ideias e sugestões.

À minha família por todo o esforço que fizeram e incentivo que me deram para que chegasse a este ponto.

Um agradecimento especial ao meu amigo Carlos Daniel Ferreira, pelo apoio absolutamente sem igual ao longo não só da minha jornada académica, mas também pessoal.

Gostaria também de agradecer ao FCT Projecto PTDC/EME-TED/7801/2020 – COOLSPOT - Interfacial COOLing Strategies for high POver dissipation conversion Technologies e à equipa do IST – IN+ - Ana Moita e António Moreira que lidera o Projeto COOLSPOT e está a testar as placas desenvolvidas.

# **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# RESUMO

Considerando que a indústria dos processadores está em constante evolução, desenvolvendo transistores de dimensões cada vez mais pequenas, possibilitando a instalação de mais núcleos por processador e consequentemente aumentando as solicitações de potências de funcionamento, torna-se necessário desenvolver soluções de arrefecimento mais capazes, para responder às suas necessidades térmicas.

Este trabalho debruça-se sobre a produção de placas texturizadas, recorrendo a uma máquina laser Nd:YVO<sub>4</sub> para o efeito, estudando a capacidade de dissipação de calor das mesmas quando arrefecidas a água.

Relativamente à produção de superfícies texturizadas, numa primeira instância, foram produzidas amostras preliminares de superfícies, estudando o efeito da variação dos parâmetros da máquina de corte laser, tais como a frequência, a potência, o número de passagens e a velocidade de corte. A partir dos resultados obtidos, foram produzidas novas amostras preliminares de superfícies para testar a existência de limites de geometria por parte da máquina, usando os parâmetros de corte previamente definidos. Estas amostras preliminares produzidas revelaram ser satisfatórias, passando assim à produção das quatro placas a serem testadas.

Para testar a capacidade de dissipação de calor das placas, foi projetado e produzido um dispositivo de testes, capaz de monitorizar e controlar vários parâmetros pertinentes para os testes. Foram efetuados três testes a cada amostra de teste sempre com o mesmo conjunto de parâmetros.

Tendo em conta os parâmetros de teste e os resultados obtidos, é plausível considerar estas placas texturizadas como sendo de alto desempenho, apresentando 252W de potência dissipada na placa com as alhetas com maior aresta de topo e 167 W de potência dissipada, na placa com as alhetas com menor aresta de topo, comparativamente aos 77 W de potência dissipada, obtidos nos testes sem placa.

**Palavras chave:** Placas Texturizadas, Máquina Laser Nd:YVO<sub>4</sub>, Potência Dissipada, Arrefecimento de Componentes Eletrónicos, Arrefecimento Líquido

# ABSTRACT

Considering that the processor industry is constantly evolving, developing increasingly smaller transistors, enabling the installation of more cores per processor, and consequently increasing the demands for operating power, it becomes necessary to develop more capable cooling solutions to respond to the thermal needs.

This work focuses on the production of textured plates, using a Nd:YVO4 laser machine for this purpose, studying their heat dissipation capacity when cooled by water.

Regarding the production of textured surfaces, in a first instance, preliminary surface samples were produced, studying the effect of varying the parameters of the laser cutting machine, such as frequency, power, number of passes and cutting speed. From the results obtained, new preliminary surface samples were produced to test the existence of geometry limits on the part of the machine. These produced samples proved to be satisfactory, thus proceeding to the production of the four test samples to be latter tested.

To test the heat dissipation capacity of the test samples, a test device was designed and produced, capable of monitoring and controlling various parameters relevant to the tests. Three tests were performed on each test sample, always with the same set of parameters.

Considering the test parameters and the results obtained, it is plausible to consider these textured plates as being of high performance, with 252W of dissipated power on the plate with the fins with the largest top edge and 167 W of dissipated power on the plate with the fins with a smaller top edge, compared to the 77 W of dissipated power obtained in the tests without a plate.

**Keywords:** Textured Plates, Nd:YVO4 Laser Machine, Dissipated Power, Electric Components Cooling, Liquid Cooling

# ÍNDICE

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS .....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
INDICE DE TABELAS .....	xii
ACRÓNIMOS .....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiv
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do caso de estudo.....	1
1.2. Motivação .....	2
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado de Arte.....	5
2.1. Arrefecimento de processadores.....	5
2.1.1. Arrefecimento a ar .....	5
2.1.2. Arrefecimento a água ativo.....	7
2.1.3. Imersão.....	10
2.1.4. Arrefecimento abaixo da temperatura ambiente.....	10
2.2. Processos de fabrico de placas de dissipação de calor .....	13
2.2.1. Extrusão .....	13
2.2.2. Forjamento a frio .....	14

2.2.3.	Fundição em molde permanente.....	15
2.2.4.	<i>Skiving</i> .....	17
2.2.5.	Fresagem CNC.....	18
2.2.6.	Texturização com recurso a laser.....	19
3.	Amostras preliminares e placas texturizadas.....	21
3.1.	Produção de amostras preliminares para seleção de parâmetros de corte laser.....	22
3.1.1.	Organização dos parâmetros de corte nas placas.....	23
3.1.2.	Desenho parametrizado do corte.....	25
3.1.3.	Preparação das placas das amostras preliminares.....	27
3.1.4.	Procedimento de corte de amostras preliminares.....	27
3.1.5.	Limpeza das amostras preliminares.....	29
3.1.6.	Análise das amostras preliminares com microscópio eletrónico de varrimento.....	30
3.1.7.	Seleção dos parâmetros de corte.....	30
3.2.	Verificação do acabamento das amostras preliminares para diferentes dimensões de alheta	33
3.3.	Produção das placas texturizadas para testes de troca de calor.....	34
3.3.1.	Acabamento e limpeza das placas texturizadas de teste de dissipação de calor.....	35
3.3.2.	Testes de Molhabilidade.....	37
4.	Dispositivo de testes para troca de calor das placas texturizadas.....	39
4.1.	Apresentação do dispositivo de testes.....	40
4.1.1.	Controlo e monitorização.....	41
4.1.2.	Componentes do dispositivo de testes.....	43
4.2.	Avaliação do desempenho das placas.....	49
4.3.	Plano e procedimento dos testes.....	51
5.	Testes e resultados.....	53
6.	Conclusões e trabalhos futuros.....	59

6.1. Conclusões .....	59
6.2. Trabalhos futuros .....	61
Bibliografia e Referências.....	62
Anexo A.....	65
Anexo B.....	70
Anexo C.....	71

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Arrefecimento a água esquematizado de um CPU.....	7
Figura 2 – Sistema All-in-One Corsair Hydro Series™ H100i RGB PLATINUM .....	9
Figura 3 - Sistema de arrefecimento a água modular da Corsair .....	9
Figura 4 - Sistema de arrefecimento por imersão .....	10
Figura 5 – Esquema do processo de extrusão .....	13
Figura 6 - Sequência de operações de fabrico de uma placa com alhetas pelo processo de extrusão..	14
Figura 7 – Esquema do processo de forjamento a frio .....	15
Figura 8 – Molde para obtenção de peças por fundição.....	16
Figura 9 - Sequência de operações de fabrico de um dissipador de calor por fundição .....	16
Figura 10 - Máquina de corte a utilizar o método skiving.....	17
Figura 11 - placa com alhetas produzida pelo método skiving.....	17
Figura 12 - Sequência de operações de fabrico de um dissipador de calor pelo método skiving.....	18
Figura 13 - Esquema de funcionamento de uma fresa CNC.....	18
Figura 14 - Sequência de paços para obtenção de dissipadores de calor por fresagem CNC .....	19
Figura 15 - Texturização de uma superfície .....	19
Figura 16 – Laser de fibra ótica dopado com Nd:YVO <sub>4</sub> - 1. Diodo laser; 2. Cabo de fibra ótica; 3. Nd:YVO <sub>4</sub> Crystal 4. Q-Switch; 5. Cabeça laser; 6. Espelhos; 7. Lente F-Theta; 8. Peça de trabalho; .....	22
Figura 17 - Organização das amostras preliminares na placa.....	23
Figura 18 - Interface do software EZCAD e desenho da textura com parâmetros da amostra preliminar 1.5.....	25
Figura 19 - Máquina laser presente no CMEMS .....	26
Figura 20 – Wobble .....	27
Figura 21 - Câmara de corte laser.....	29
Figura 22 - Transdutor de ultrassons UP200St-T .....	29
Figura 23 – Gerador de ultrassons UP200St-G.....	29
Figura 24 - Placas texturizadas para seleção de parâmetros .....	30
Figura 25 - Amostras: a) 1.1 (1 passagem); b) 1.2 (2 passagens); c) 1.3 (4 passagens) .....	31
Figura 26 - Amostra: a) 1.4; b) 1.5.....	31
Figura 27 – Base das alhetas das amostras: a) 1.5; b) 2.5.....	32
Figura 28 - a) amostra 1.5; b) amostra 3.5; .....	33

Figura 29 - Vista em detalhe das amostras com: a) 150 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; b) 300 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; c) 550 $\mu\text{m}$ de aresta de topo;.....	34
Figura 30 - Placas texturizadas produzidas: a) Placa 1 - 300 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; b) Placa 2 - 600 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; c) Placa 3 - 900 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; d) Placa 4 - 1200 $\mu\text{m}$ de aresta de topo; .....	36
Figura 31 - Teste Sessile Drop das Placas 1, 3 e 4 com comportamento super hidrofílico .....	38
Figura 32 - Teste Sessile Drop da Placa 2 com comportamento hidrofóbico .....	38
Figura 33 - Dispositivo de testes.....	39
Figura 34 - Vista explodida dos componentes produzidos manualmente do dispositivo de testes .....	40
Figura 35 - Esquema de monitorização e controlo do dispositivo de testes .....	41
Figura 36 - Posicionamento do termopar da água de entrada .....	42
Figura 37 - Posicionamento do termopar da água de saída.....	42
Figura 38 - Posicionamento do termopar da placa e da resistência .....	43
Figura 39 - Resistência de cartucho instalada no bloco de aquecimento .....	44
Figura 40 - Peça em silicone .....	45
Figura 41 - Vista explodida do molde da peça de silicone.....	47
Figura 42 - Molde para obtenção da peça em silicone .....	48
Figura 43 - Monitorização do caudal volúmico .....	53
Figura 44 - Temperatura da placa .....	54
Figura 45 - Temperatura e estado da resistência de cartucho .....	54
Figura 46 - Diferença entre a temperatura da água da entrada e de saída.....	55
Figura 47 - Temperatura da água de entrada (azul) e da água de saída (laranja).....	55

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre motherboard B360M Mortar e ASUS STRIX B360-G Gaming .....	6
Tabela 2 - Intervalos de valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção característicos dos diferentes tipos de convecção .....	12
Tabela 3 - Parâmetros de corte das amostras.....	24
Tabela 4 - Características das placas .....	37
Tabela 5 - Média dos parâmetros de teste das placas.....	56
Tabela 6 - Média das medições efetuadas .....	57
Tabela 7 - Média das variáveis determinadas .....	58

# ACRÓNIMOS

*AiO – All-in-One*

*BIOS – Basic Input/Output System*

*CAD – Computer Aided Design*

*CAM – Computer Aided Manufacturing*

CNC - Controlo Numérico Computorizado

CPU – Central Processing Unit

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

*LED – Light-Emitting Diode*

MRV – Módulo Regulador de Voltagem

*SEM – Scanning Electron Microscope*

*TDP – Thermal Design Power*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_f$	Área das alhetas	$m^2$
$A_{Base}$	Área da superfície	$m^2$
$c_p$	Calor específico	$kJ/kg.K$
$\dot{m}$	Caudal mássico	$kg/s$
$\dot{V}$	Caudal volúmico	$m^3/s$
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2K$
$\Delta T_1$	Diferença de temperatura à entrada	$K$
$\Delta T_2$	Diferença de temperatura à saída	$K$
$\eta_f$	Eficiência de alheta individual	%
$\eta_0$	Eficiência do alhetado	%
$q$	Potência dissipada	$W$
$f$	Frequência	$kHz$
$\rho$	Massa volúmica	$kg/m^3$
$\Delta T_m$	Média logarítmica da diferença de temperaturas	$K$
$n$	Número de passagens	-
$p$	Potência	$W$
$Re$	Número de Reynolds	-
$Rt$	Resistência térmica	$^{\circ}C/W$
$T_{in}$	Temperatura da água de entrada	$K$
$T_{out}$	Temperatura da água de saída	$K$
$U$	Coefficiente de transferência de calor global	$W/m^2K$
$\mu$	Viscosidade dinâmica	$N.s/m^2$
$v$	Velocidade média do escoamento	$m/s$
$v_c$	Velocidade de corte	$mm/s$

# 1. Introdução

Neste capítulo, é contextualizado o projeto, nomeadamente os avanços na tecnologia que levaram à necessidade de desenvolver soluções na área do arrefecimento de componentes eletrónicos, especificamente dos processadores de computador pessoal. São também apresentados os objetivos deste trabalho e é descrita a estrutura do documento.

## 1.1. Enquadramento do caso de estudo

A evolução da tecnologia é de tal ordem rápida no mundo dos computadores, nomeadamente no desenvolvimento de CPUs, que entre os anos 2000 e 2020, foram lançados para o mercado mais de dois mil processadores entre a AMD e a Intel [1].

No ano 2000, a potência média dissipada por um processador a trabalhar à frequência de base máxima era de 66 W para o processador AMD Athlon 1200, atualmente, esta potência pode chegar aos 280 W para o processador AMD Ryzen Threadripper PRO 3990X. Estas diferenças de potência média dissipada, podem ser explicadas pela frequência de funcionamento e o número de núcleos dos processadores simultaneamente. Usando como exemplo os dois processadores referidos, o Athlon funciona a 1.1 GHz de frequência de base com 1 núcleo, ao passo que o Threadripper funciona a 2.9 GHz de frequência de base, com 64 núcleos.

As substanciais melhorias das especificações que se verificaram nos últimos vinte anos ao nível dos processadores e do seu desempenho, criaram uma necessidade cada vez maior de se desenvolverem soluções de dissipação de calor produzido pelo seu normal funcionamento [2].

Existem várias tecnologias de arrefecimento de processadores, desde a mais acessível, utilizada no arrefecimento de computadores pessoais, o arrefecimento a ar ativo, que consiste na instalação de uma placa sobre o processador com o intuito de aumentar a superfície de troca de calor, assistida por uma ventoinha, até métodos mais extremos, como o arrefecimento abaixo da temperatura ambiente usando azoto líquido, que foi o método de arrefecimento utilizado pelo atual detentor do recorde mundial de *Overclocking* para maior frequência do processador de computador pessoal [3].

## 1.2. Motivação

A constante evolução dos processadores, nomeadamente na litografia, que influencia o tamanho dos transistores dos núcleos e consequentemente a dimensão de cada núcleo, vem diminuindo ao longo do tempo tamanho destes componentes, atingindo em 2019 pela primeira vez pela AMD, uma dimensão de 7 nm, em simultâneo com o aumento da sua potência média dissipada, devida ao aumento da frequência de trabalho, tornam essencial a criação de soluções capazes e eficientes de os arrefecer, de modo a aumentarem os seus limites de funcionamento.

De acordo com a *AI Technology Inc* os problemas de origem térmica são responsáveis por aproximadamente 55% das falhas em componentes eletrónicos, ao passo que a humidade representa cerca 20%, as vibrações 19% e o pó 6% [4], evidenciando a necessidade do desenvolvimento de sistemas de arrefecimento mais capazes de responder às solicitações impostas.

Os dissipadores de calor a água, são nos dias de hoje, alvo de bastante atenção por parte dos consumidores, pela quantidade de benefícios associados ao seu uso, comparativamente aos dissipadores de calor a ar, como por exemplo, são sistemas mais silenciosos, são geralmente sistemas mais compactos, são mais indicados para climas quentes e são mais eficientes no arrefecimento, uma vez que a condutividade térmica da água é superior à condutividade térmica do ar [5] e o coeficiente de transferência de calor da água por convecção forçada, no caso de estudo, é substancialmente mais elevado do que o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada do ar.

Da mesma forma que é possível melhorar a dissipação de calor dos processadores, alterando o fluido de trabalho, também é possível melhorar a dissipação de calor melhorando a placa de contacto entre o CPU e o fluido de trabalho. Em 2018, Libin Lu et al. compararam a temperatura do dissipador de calor de origem de um LED, com um dissipador por eles produzido, com microestruturas na sua superfície, feitas com recurso a laser. Nessa comparação, verificaram que o dissipador por eles produzido apresentou uma temperatura máxima na sua superfície, cerca de 22,4% menor do que a do dissipador de origem para as mesmas condições de teste [6].

## 1.3. Objetivo

Como salientado anteriormente, a dissipação de calor do CPU é um ponto fundamental para o bom funcionamento dos processadores de computadores pessoais. Assim, a presente dissertação tem como objetivo principal, estudar experimentalmente a capacidade de dissipação de calor de placas

texturizadas de liga de alumínio AW 5083, produzidas com recurso a um laser de fibra ótica, dopado com Nd:YVO<sub>4</sub> (Ortovanadato de ítrio dopado com neodímio). Para possibilitar esse estudo, o projeto tem os seguintes objetivos:

- Definir os parâmetros de corte da máquina laser Nd:YVO<sub>4</sub>, para produção de superfícies texturizadas;
- Testar os limites de geometria possíveis de obter através da máquina laser Nd:YVO<sub>4</sub>;
- Desenvolver um dispositivo capaz de medir a diferença entre a temperatura da água de entrada e a água de saída, em que a água de saída é aquecida pela placa texturizada. O dispositivo deve ser capaz de monitorizar o caudal, regular e monitorizar a fonte de calor responsável pelo aquecimento das placas;
- Comparar o desempenho das placas produzidas em termos de capacidade de dissipação de calor.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

Considerando os objetivos mencionados anteriormente, organizou-se a presente dissertação em cinco capítulos.

No capítulo 1, o presente, é contextualizado o problema que deu origem a este estudo, apresentando os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, o estado de arte, é feito um levantamento das tecnologias existentes para arrefecimento de CPUs, assim como dos processos de fabrico das placas de apoio ao arrefecimento neles existentes.

No capítulo 3, relativo à produção das placas texturizadas, é apresentada a máquina laser utilizada na produção das amostras preliminares e das placas, fazendo variar os parâmetros de corte e a dimensão das alhetas, que levaram à seleção dos parâmetros e dimensão das alhetas utilizados para a realização dos testes de dissipação de calor.

No capítulo 4, referente à máquina de testes de dissipação de calor, é apresentado o dispositivo de teste, capaz de aquecer as placas e simultaneamente monitorizar o caudal e a temperatura do fluido de arrefecimento, neste caso água, antes e depois de passar sobre a placa. O dispositivo de testes monitoriza também a temperatura da resistência de cartucho e da placa. São apresentadas todas as etapas de produção do dispositivo e é descrito o procedimento para a realização dos testes e os seus parâmetros.

No capítulo 5, são referidos os testes realizados nas diferentes placas e os resultados obtidos para as diferentes dimensões das alhetas das referidas amostras. O desempenho das placas é avaliado exclusivamente pela potência dissipada das placas texturizadas para a água.

## **2. Estado de Arte**

Neste capítulo são introduzidos os vários sistemas de arrefecimento disponíveis para uso em computadores pessoais assim como os processos de fabrico de placas para uso nos ditos sistemas de arrefecimento.

### **2.1. Arrefecimento de processadores**

Neste ponto, são apresentadas várias soluções de arrefecimento de processadores frequentemente utilizadas em computadores pessoais.

#### **2.1.1. Arrefecimento a ar**

É o método de arrefecimento mais simples e comum, utilizado nos computadores fixos e portáteis, em que o calor produzido no processador é dissipado por um fluxo de ar que atravessa o interior do computador e o calor é libertado ainda no interior da caixa. Este método pode ser de dois tipos, arrefecimento a ar passivo ou arrefecimento a ar ativo.

##### **Arrefecimento a ar passivo**

O arrefecimento passivo é o processo no qual as trocas de calor acontecem sem que se utilize energia para auxiliar no processo, ou seja, de forma natural. Estas trocas de calor ocorrem por condução do calor do componente que se quer arrefecer para a placa instalada sobre o CPU e sequentemente por convecção natural da placa para o ambiente. Neste tipo de arrefecimento, é comum utilizar-se placas com alhetas, de forma a aumentar a área de troca de calor, produzidas em alumínio ou cobre devido à elevada condutividade térmica que estes materiais apresentam.

Este tipo de arrefecimento não é utilizado no arrefecimento de processadores de computadores, devido à sua baixa capacidade de dissipação de calor (TDP inferior a 10 W). Contudo, é possível encontrar dissipadores passivos em algumas motherboards para o arrefecimento de certos componentes como por exemplo a MSI fez na sua motherboard B360M Mortar, ao implementar um dissipador de calor passivo nos MRV, aumentando a sua área de arrefecimento em 26%, o que se traduz numa redução de até 12°C para um processador de 95 W quando comparado com a motherboard ASUS STRIX B360-G Gaming, obtendo desempenhos 12% melhores [7]. As melhorias mencionadas anteriormente não se devem

apenas ao facto de a motherboard ter instalada sobre os MRV um dissipador de calor, pode observar-se na tabela 1 [7] que a motherboard da ASUS tem apenas seis fases de potência enquanto a da MSI tem sete.

Tabela 1 - Comparação entre motherboard B360M Mortar e ASUS STRIX B360-G Gaming

	<b>B360M MORTAR</b>	<b>ASUS STRIX B360-G GAMING</b>
<b>Chipset</b>		Intel B360 Chipset
<b>Formato</b>		Micro-ATX
<b>Fases de Potência</b>	7 Fases	6 Fases
<b>Dissipador</b>	Dissipador Estendido	Dissipador Convencional

Essa diferença de fases de potência traduz-se numa utilização de cada fase 16,67% do tempo no caso das seis fases, e 14,28% do tempo no caso das sete fases, sendo esta última menos solicitada em cada uma das suas fases e sendo então expectável que uma parte da melhoria seja devido a este aumento do número de fases.

### **Arrefecimento a ar ativo**

No arrefecimento a ar ativo, similarmente ao arrefecimento a ar passivo, o calor é transferido do processador para a placa instalada sobre a *Central Processing Unit* (CPU) por condução, e posteriormente dissipado para o ambiente através das alhetas presentes na placa, com o detalhe de neste tipo de arrefecimento essa dissipação ser auxiliada por uma ventoinha instalada sobre o dissipador.

As gamas superiores destes equipamentos anunciam uma capacidade de 100 W de TDP, valor que já permite responder às necessidades de dissipação de calor de muitos processadores de baixa e média gama existentes atualmente no mercado.

Porém, este método de arrefecimento de processadores provou ser nocivo para outros componentes da motherboard que apresentam um decréscimo de performance com o aumento da temperatura, com é o caso dos condensadores e dos Módulos Reguladores de Voltagem (MRV) [8].

## Arrefecimento a ar ativo de alto desempenho

Os dissipadores a ar ativos de alto desempenho, diferem dos dissipadores a ar ativos no detalhe de todo o processo de troca de calor entre a placa em contacto com o processador e as alhetas ser auxiliado por um a cinco *heatpipes*. Estes *heatpipes* estão normalmente em contacto direto com o processador de forma a maximizar a transferência de calor do processador para o dissipador.

Os *heatpipes* são selados em vácuo, com uma pequena quantidade prescrita de fluido de trabalho no seu interior. No caso de arrefecimento de componentes eletrónicos, o mais recomendado é a água. Quando um componente fornece calor ao *heatpipe*, o fluido dentro do tubo evapora na chamada zona de evaporação e espalha-se rapidamente até às extremidades devido à pressão gerada pelas diferenças de temperatura. Nessas extremidades, chamadas zona de condensação, o fluido dissipa o seu calor latente para as alhetas. Após este processo, o fluido condensa e retorna para a zona de evaporação.

Este tipo de dissipadores apresentam um TDP tão elevado como 220 W, representando assim o expoente máximo do arrefecimento a ar.

### 2.1.2. Arrefecimento a água ativo

Os sistemas de arrefecimento a água ativos funcionam em circuito fechado e são compostos por cinco componentes, nomeadamente o bloco de água, o reservatório, a bomba, o radiador e as ventoinhas. Na Figura 1 é apresentado um esquema deste tipo de sistemas para uma melhor compreensão.

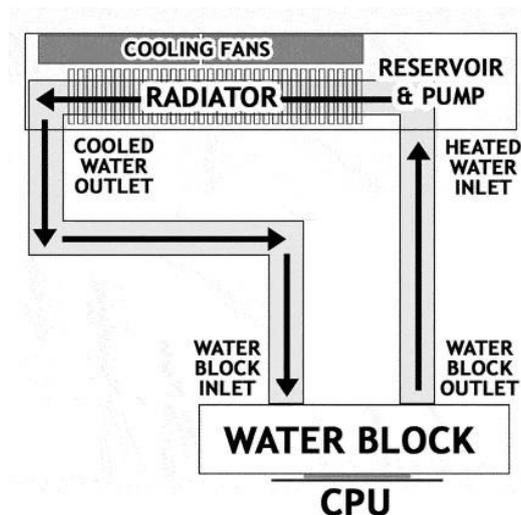


Figura 1 - Arrefecimento a água esquematizado de um CPU

Como já foi abordado, existem no mercado processadores com TDP muito elevado, ao ponto de não ser possível responder às suas necessidades de dissipação de calor com dissipadores a ar. A água revelou-se uma alternativa apelativa, com uma condutibilidade térmica de  $0,61 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , aproximadamente vinte vezes superior à do ar e um coeficiente de transferência de calor para convecção forçada de até  $20000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , aproximadamente oitenta vezes superior coeficiente de transferência de calor para convecção forçada do ar.

Estes sistemas funcionam em regime fechado, havendo admissão de energia no bloco de água e a sua dissipação posteriormente no radiador, sendo este auxiliado por ventoinhas.

Uma das grandes vantagens que os sistemas de arrefecimento a água apresentam face aos sistemas de arrefecimento a ar, é a capacidade de retirar o calor do processador através da passagem de água e dissipá-lo apenas no radiador, permitindo assim manter a temperatura dentro da caixa mais baixa do que num sistema a ar, em que o calor produzido pelo processador é irremediavelmente dissipado para o interior da caixa. Esta diminuição de temperatura dentro da caixa é benéfica na dissipação de calor passiva de alguns componentes da motherboard, tais como os MRV e os condensadores.

### **All-in-One (AiO)**

Os sistemas de arrefecimento *AiO* são uma das variantes do arrefecimento a água. Estes sistemas são os mais utilizados dentro do arrefecimento a água, por se tratar de sistemas de água em circuito fechado de fábrica, serem fáceis de instalar e apresentarem bom desempenho no arrefecimento do CPU, tudo a um preço acessível quando comparado aos sistemas modulares analisados no ponto seguinte.

Nestes sistemas a bomba de circulação é instalada no bloco de arrefecimento diretamente por cima do processador. Mesmo os modelos mais básicos incluem de fábrica pelo menos uma ventoinha instalada sobre o radiador de 120mm. Esta ventoinha pode ser instalada no topo ou na parte traseira da caixa do computador, auxiliando assim o processo de circulação do ar dentro da caixa. De acordo com a Corsair [9] no processo de instalação do *AiO* deve garantir-se dentro do possível que o lado do radiador onde os tubos são ligados não fique no topo do circuito, pois quando o ar é coletado na parte mais elevada do radiador, ter o radiador montado com os tubos para baixo garante que o ar não seja bombeado para o bloco. Na Figura 2 é apresentado um exemplo de um sistema de arrefecimento *AiO* da Corsair instalado corretamente.



Figura 2 – Sistema All-in-One Corsair Hydro Series™ H100i RGB PLATINUM

### Arrefecimento a água modular

Nos sistemas de arrefecimento a água modulares cada componente pode ser escolhido individualmente o que permite a otimização da seleção de cada componente face aos constrangimentos que se queiram impor, como por exemplo espaço dentro da caixa, níveis de ruído, capacidade de arrefecimento ou componentes a arrefecer. Na Figura 3 é apresentado mais detalhadamente um exemplo deste sistema e dos componentes que se podem alterar.

Neste tipo de solução, a maior limitação verifica-se no bloco de água, em que a capacidade de troca de calor entre o dissipador de calor e o fluido é limitada, mesmo com as constantes melhorias e estudos realizados sobre os microcanais existentes neste tipo de placas [10].



Figura 3 - Sistema de arrefecimento a água modular da Corsair

### 2.1.3. Imersão

Nos sistemas de arrefecimento por imersão todos os componentes (exceto os discos rígidos pois têm partes móveis) são submersos num líquido dielétrico capaz de conduzir calor, mas não eletricidade. Estes líquidos usados tem uma capacidade térmica cerca de 1200 vezes superior à capacidade térmica do ar para o mesmo volume [11].

Os sistemas arrefecidos por este processo não precisam de ventoinhas, porém, são utilizadas bombas para escoar o líquido aquecido para um permutador de calor onde é arrefecido e sequentemente levado de volta para o tanque [12].

Estas soluções são mais utilizadas em centros de dados do que em computadores pessoais, por exemplo o Fluido 3M™ Novec™ 7500 que apresenta um intervalo do ponto de ebulição entre os 100 e os 149 °C, temperaturas que não são possíveis de atingir nos CPUs domésticos sem alterar as configurações da BIOS. Na Figura 4 é apresentada um sistema de arrefecimento por imersão.



*Figura 4 - Sistema de arrefecimento por imersão*

### 2.1.4. Arrefecimento abaixo da temperatura ambiente

Neste tipo de arrefecimento, como o nome indica, o objetivo é fazer com que o processador funcione a temperaturas inferiores à temperatura ambiente. A utilização de processos de arrefecimento que operam abaixo da temperatura ambiente e o seu potencial de melhoria na performance dos computadores há muito que é reconhecida, reportando velocidades quase duas vezes superiores para processadores mantidos abaixo dos -183,15 °C quando comparados com processadores a funcionarem

acima da temperatura ambiente [13], pois com a redução da temperatura, aumenta a velocidade de comutação e diminuem os constrangimentos impostos pela temperatura.

As grandes desvantagens destes sistemas são a condensação da água existente na atmosfera que ocorre dentro da caixa ou em torno do local de arrefecimento como nos casos em que se usa azoto líquido e o tempo de vida dos processadores, uma vez que estes componentes não foram produzidos para funcionarem a temperaturas tão baixas.

É de salientar que o atual recorde do mundo de maior frequência de processador pertence a *The Stilt* e foi obtido utilizando o processador *FX-8370* da *AMD*, um processador com uma frequência de base de 4000 MHz, que alcançou os 8722,8 MHz utilizando azoto líquido no seu arrefecimento [3].

### **Azoto líquido**

Os sistemas de arrefecimento por azoto líquido são sistemas completamente manuais, em que o utilizador é responsável pela adição ou remoção de azoto no contentor montado em contacto com o CPU conforme a necessidade. A base do contentor em contacto com o CPU é normalmente de cobre sólido e texturada.

O objetivo do arrefecimento de processadores com azoto líquido é obter temperaturas de funcionamento muito inferiores às temperaturas possíveis de se obter com o arrefecimento a água ou ar. Com este decréscimo de temperatura, os componentes como o CPU, a *motherboard* e a placa gráfica podem ser solicitadas até ao seu limite, salientando que estes testes são apenas efetuados nos componentes topo de gama.

Estes sistemas tem a maior capacidade de dissipação calor de todos os sistemas apresentados neste capítulo, não só pelas temperaturas extremamente baixas do fluido, pois o azoto entra em ebulição a  $-195,8\text{ °C}$  à pressão atmosférica, o que significa que tem que ser manuseado abaixo dessa temperatura para estar no estado líquido, como pelo tipo de convecção do processo, a evaporação que ocorre quando o calor do CPU é transferido para o azoto, fazendo-o evaporar, que potencia o coeficiente de transferência de calor como se pode observar na Tabela 2 [14].

Tabela 2 - Intervalos de valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção característicos dos diferentes tipos de convecção

Tipo de convecção	h [W/m <sup>2</sup> K]
Convecção natural em gases	2 - 25
Convecção natural em líquidos	10 – 1000
Convecção forçada em gases	25 – 250
Convecção forçada em líquidos	50 – 20000
Evaporação e condensação	2500 - 100000

### Arrefecimento por mudança de fase

Os dissipadores de calor por mudança de fase, funcionam similarmente aos sistemas de refrigeração de máquinas frigoríficas em que o fluido de refrigeração na fase gasosa é bombeado a alta pressão pelo compressor até chegar ao condensador onde retorna ao estado líquido devido à elevada pressão e dissipação de calor para o ambiente que nele ocorre. De seguida, já com o fluido completamente em fase líquida, este passa por um tubo capilar até chegar ao evaporador sofrendo uma queda de pressão. Esta redução de pressão permite que o líquido refrigerante evapore quando chega ao bloco do CPU, absorvendo o calor do CPU para que o processo de mudança de fase ocorra.

Nestes sistemas o ponto de ebulição à pressão atmosférica do fluido de refrigeração escolhido, representa o expoente máximo da refrigeração do sistema, podendo variar entre os -21°C para o fluido R12 (diclorodifluorometano) e -150°C para o fluido R14 (criofluorano) [15].

Em meados de 2018, “DerBauer” apresentou na *Computex* um protótipo de uma solução de refrigeração por mudança de fase que não necessitava de bomba para transportar o fluido de refrigeração entre o bloco de arrefecimento do CPU e o condensador. Neste sistema, um bloco com cerca de 40 ml de líquido de refrigeração no seu interior estava montado sobre o CPU, estando o líquido em contacto direto com o CPU. Este bloco encontra-se ligado por uma mangueira a um condensador e um tanque. Com o CPU em funcionamento, o líquido dentro do bloco começa a ferver e é encaminhado através da mangueira até ao condensador, onde com a ajuda de placas de cobre alhetadas e ventoinhas, dissipa calor e volta ao estado líquido, escorrendo lentamente pela mangueira de volta para o bloco.

## 2.2. Processos de fabrico de placas de dissipação de calor

Neste ponto são apresentadas sequências de processos de fabrico a partir dos quais é possível obter placas com alhetas, salientando a operação que dá a forma às alhetas. Os processos variam conforme a geometria pretendida ou o material que se pretende utilizar.

### 2.2.1. Extrusão

A extrusão é utilizada para produzir dissipadores normalmente em alumínio, com perfil cruzado, ou seja, dissipadores em que as alhetas são obtidas através de cortes paralelamente a dois eixos, considerando o terceiro eixo a altura do dissipador.

Na Figura 5 é apresentado um esquema do processo de extrusão descrito.

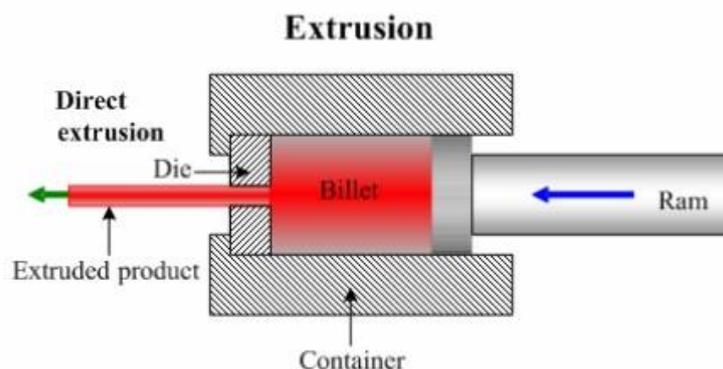
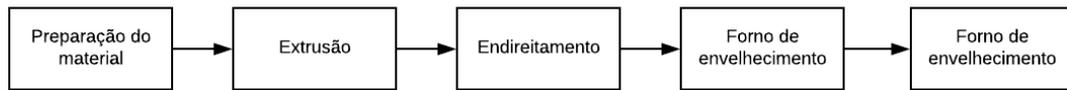


Figura 5 – Esquema do processo de extrusão

A sequência de operações começa pela preparação da liga de alumínio, que é inserida num forno a 500 °C para remover as impurezas presentes no material. Após sair do forno, o tarugo é cortado com as dimensões apropriadas para ser extrudido. De seguida, os lingotes são inseridos no extrusor, estando este a uma temperatura superior à temperatura de recristalização do material de forma a prevenir que haja endurecimento do alumínio, e assim facilitando a sua passagem no molde de extrusão. Este processo ocorre a baixa velocidade para minimizar a ocorrência de deformação. O perfil extrudido é cortado quando atinge um comprimento predefinido pelo fabricante e posteriormente endireitado, uma vez que depois de ser extrudido se encontra ligeiramente deformado. O endireitamento dos dissipadores extrudidos é essencial para conferir a forma final às placas. No passo final as placas estagiam num forno de envelhecimento a 180 °C durante seis a oito horas, para adquirirem as suas propriedades finais. Na Figura 6 é apresentado um diagrama com os passos de uma forma mais sumária.



*Figura 6 - Sequência de operações de fabrico de uma placa com alhetas pelo processo de extrusão*

Este método de fabrico de dissipadores é o método mais utilizado no fabrico de soluções para gestão térmica, pois embora existam melhores dissipadores disponíveis no mercado, a relação qualidade preço torna este processo muito apelativo para grandes quantidades.

É um método que apresenta uma elevada precisão dimensional e boa qualidade das superfícies extrudidas.

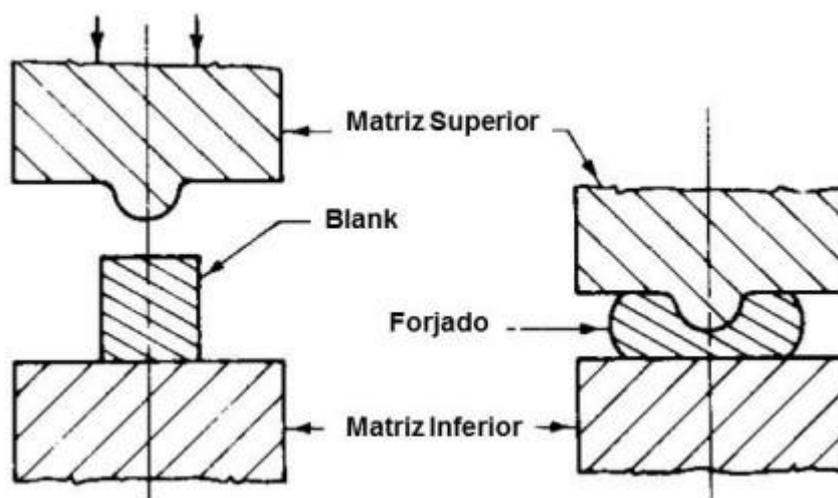
Consegue-se produzir uma vasta variedade peças, com diferentes geometrias, tamanhos e especificações, com uma única máquina, bastando trocar o molde para alterar a peça. É um processo simples e relativamente barato, quando comparado a outros processos de fabrico.

Porém, este método apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, o diferente desempenho das peças produzidas por um certo perfil extrudido. Como o fluxo de material não é uniforme durante a extrusão, a camada superficial, o centro, a cabeça e a cauda dos produtos extrudidos não são uniformes.

As condições de trabalho do molde de extrusão são bastante severas e propicias a que haja desgaste do molde, uma vez que o molde é sujeito a elevadas temperaturas e atrito, fatores que afetam a resistência e a vida útil do molde. [16]

### **2.2.2. Forjamento a frio**

O forjamento é uma operação de conformação que ocorre à temperatura ambiente onde é aplicada uma grande pressão no bloco de material que se está a trabalhar, sobre um molde, obrigando-o desta forma a adquirir a geometria do molde. Na Figura 7 é apresentado um esquema do processo de forjamento a frio.



*Figura 7 – Esquema do processo de forjamento a frio*

Para se obter uma placa com alhetas por forjamento, começa-se por limpar o molde para que a peça final não tenha imperfeições, é aplicada uma fina camada de lubrificante no molde, o bloco de material a ser conformado é colocado no molde onde posteriormente é prensado, adquirindo o formato do molde. Por fim, a altura das alhetas é retificada, uma vez que concluído o processo de forjamento, nem todas as alhetas tem o mesmo tamanho [17].

Este processo apresenta algumas vantagens, tais como o baixo desperdício de material, podendo mesmo não existir desperdício, um tempo de produção bastante baixo e o aumento da dureza e resistência da peça devido ao trabalho a frio, uma elevada precisão dimensional e bom acabamento superficial.

Por outro lado, para executar este processo, é necessário produzir um molde para conformar uma peça de modo a obter a geometria desejada. Cada molde serve apenas para produzir uma única geometria de peça, o que significa que para produzir uma nova geometria, é necessário produzir um novo molde e ajustar o equipamento de produção ao molde o que aumenta os custos e torna o processo pouco atrativo para pequenas quantidades [18].

### **2.2.3. Fundição em molde permanente**

A fundição é um método de obtenção de peças que consiste na colocação do metal no estado líquido dentro de um molde com a forma desejada, esperando que o metal arrefeça e solidifique, obtendo dessa forma a peça fundida.

Na Figura 8 é apresentado um exemplo de um molde para obtenção de peças por fundição.

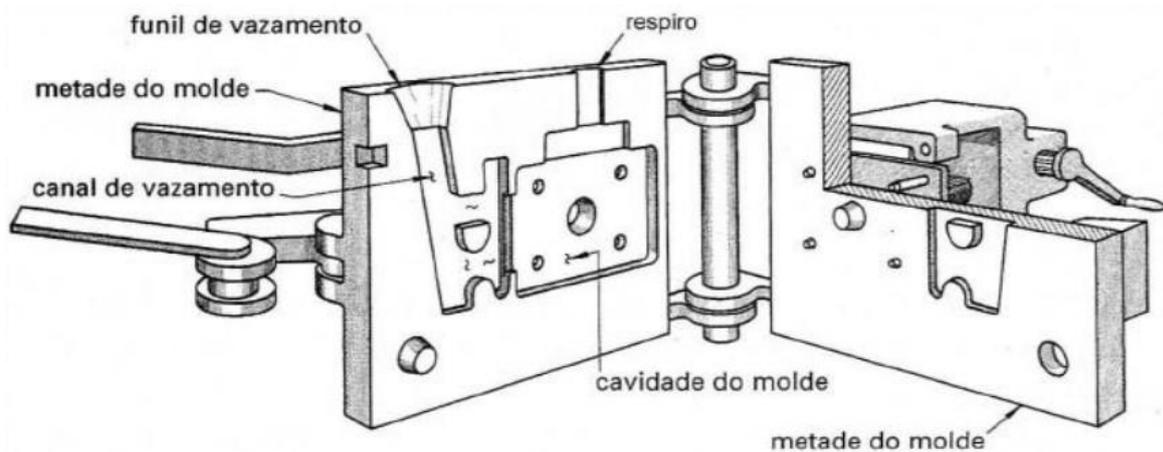


Figura 8 – Molde para obtenção de peças por fundição

O primeiro passo para obtenção de placas de dissipação de calor por este processo, é a preparação do equipamento, lubrificando as cavidades do molde. Esta lubrificação ajuda no controle da temperatura do molde e a remover a peça fundida.

Para placas em liga de alumínio, usa-se o molde à temperatura ambiente, sendo a liga de alumínio fundida e vertida para dentro do molde, onde escoar apenas sujeito à força da gravidade.

Assim que a peça solidifica, os moldes são abertos e a peça é retirada, passando para o último passo do processo, o polimento, onde se remove o excesso de material proveniente do processo de fundição. Na Figura 9 é apresentada a sequência de passos resumida para obtenção de dissipadores de calor pelo processo de fundição [19].

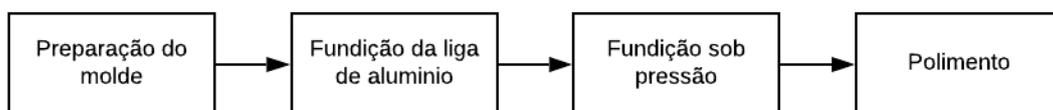


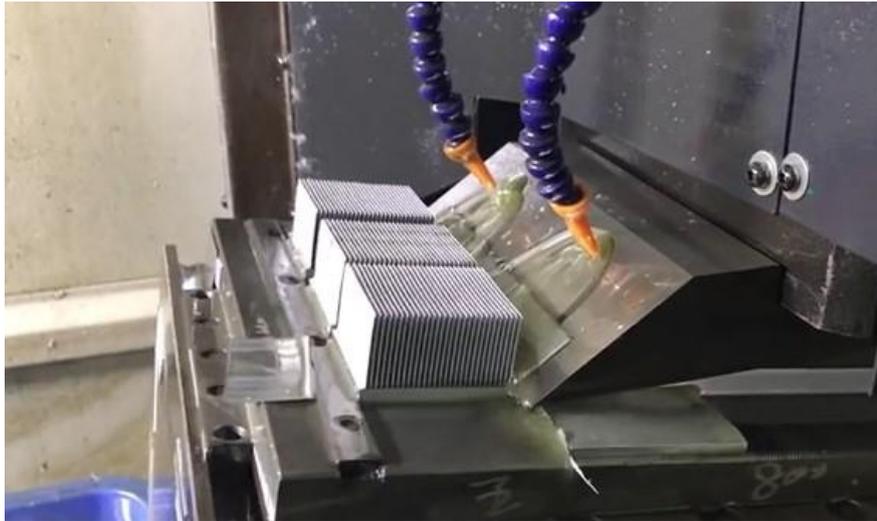
Figura 9 - Sequência de operações de fabricação de um dissipador de calor por fundição

Este processo apresenta algumas vantagens, tais como custos razoáveis, provenientes da elevada capacidade de produção, principalmente em moldes refrigerados a água e a capacidade de produzir geometrias complexas. Por outro lado, o molde é caro, o que torna o processo pouco indicado para produzir um número de peças reduzido.

#### **2.2.4. Skiving**

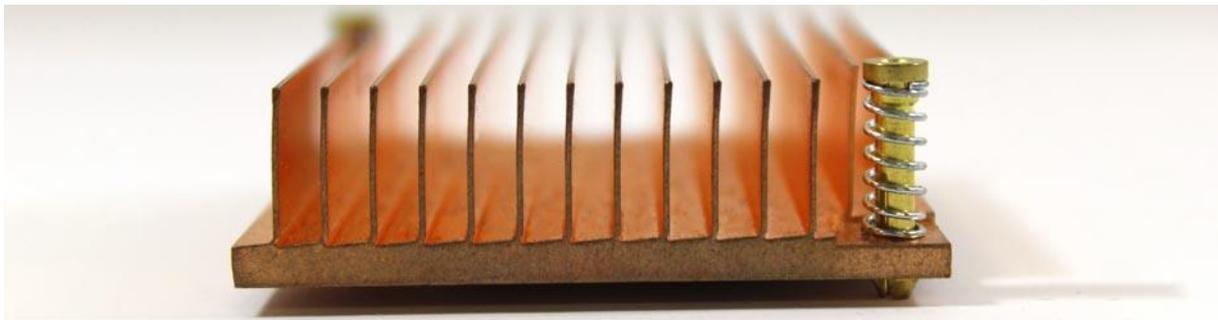
O método de obtenção de placas com alhetas por *skiving* consiste em cortar o bloco de material conferindo uma certa inclinação à lamina de corte, levantando a lamina de corte e consequentemente a aparta, sem que esta última seja removida do bloco de material.

Na Figura 10 é apresentada uma máquina de corte que utiliza o método skiving.



*Figura 10 - Máquina de corte a utilizar o método skiving*

Na Figura 11 é apresentado um exemplo de peça produzido por este método.



*Figura 11 - placa com alhetas produzida pelo método skiving*

Para obtenção de dissipadores de calor pelo processo de skiving, o processo é principiado colocando uma barra do material a utilizar, normalmente liga de alumínio ou cobre, na mesa de trabalho e aplicando lubrificante no topo. De seguida são definidos os parâmetros de corte, como a espessura que se pretende conferir às alhetas, a sua altura e o espaçamento entre as mesmas.

Definidos os parâmetros, o corte é iniciado, conferindo às alhetas a espessura predefinida. Após o corte da alheta, esta é levantada e levada para a sua posição final ao mesmo tempo que a alheta

seguinte é cortada, repetindo-se este processo ao longo de toda a barra. Na imagem 11, é possível ver a inclinação do corte na base das alhetas. [20]

Após o processo de corte das alhetas, os dissipadores são cortados com o comprimento desejado e levados para uma fresadora, onde os topos das alhetas, ainda afiados e com rebarbas, são cortados até adquirirem a altura pretendida. Na Figura 12 pode-se ver um diagrama com os passos resumidos de dissipadores obtidos por este processo.

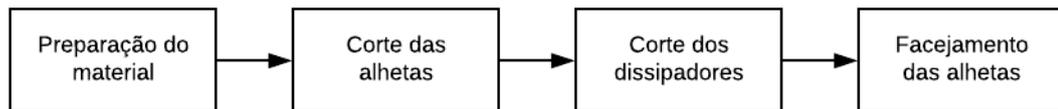


Figura 12 - Sequência de operações de fabrico de um dissipador de calor pelo método skiving

Este método de obtenção dissipadores de calor é o método mais utilizado para sistemas de arrefecimento a água de processadores, devido à possibilidade de se obter uma elevada densidade de alhetas no reduzido espaço existente na placa por cima dos processadores, no entanto, as alhetas produzidas são facilmente deformadas [21].

### 2.2.5. Fresagem CNC

O processo de fresagem CNC para obtenção de placas de dissipação de calor, começa com o desenho de um modelo CAD do dissipador, que é posteriormente convertido por um software CAM num programa CNC que determina as ações da máquina e os movimentos das ferramentas em torno da peça.

Na Figura 13 é apresentado o esquema de uma máquina de fresagem CNC.

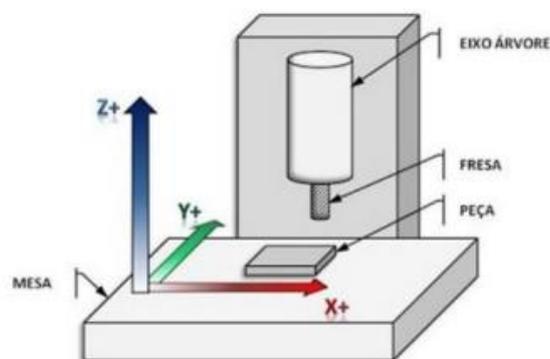
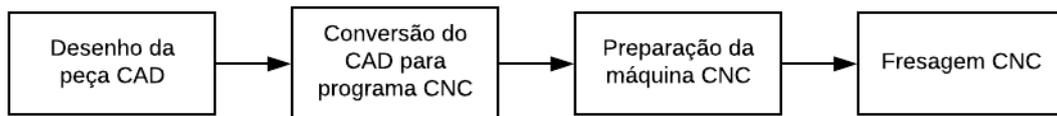


Figura 13 - Esquema de funcionamento de uma fresa CNC

Antes do programa CNC ser executado, o bloco é fixado na área de trabalho e as ferramentas de corte são instaladas no porta-ferramentas da máquina CNC. Concluído o processo de preparação da máquina, o programa CNC é executado através da interface da máquina, dando início ao processo de fresagem. Na primeira fase deste processo, é removido gradualmente material do bloco até se obter uma forma aproximada à sua forma final. Na segunda fase, o acabamento, a precisão e a exatidão com que se executa cada passagem da ferramenta de corte na peça aumenta substancialmente, de forma a respeitar as tolerâncias impostas. São apresentadas na Figura 14 as etapas para obtenção de placas com alhetas por Fresagem CNC [22].



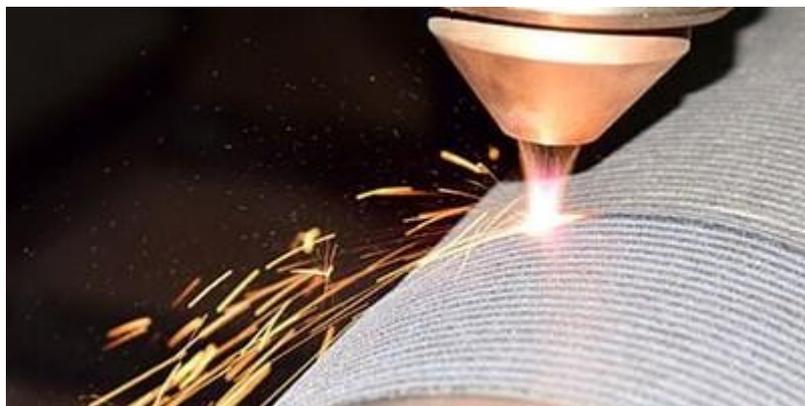
*Figura 14 - Sequência de paços para obtenção de dissipadores de calor por fresagem CNC*

O fabrico de peças por fresagem CNC apresenta várias vantagens, como por exemplo a capacidade de obter peças complexas, tolerâncias dimensionais bastante reduzidas, bom acabamento superficial e a repetibilidade na produção das peças, o investimento inicial nestes equipamentos é bastante elevado, necessita de manutenção e operadores especializados e demora algum tempo a desenhar a peça e programar o corte da mesma na máquina, pelo que não é economicamente atrativa para pequenas quantidades de peças [23].

### **2.2.6. Texturização com recurso a laser**

O processo de texturização de superfícies com recurso a laser, baseia-se na remoção de material da superfície de uma determinada peça ou bloco de material através de um laser, conferindo-lhe a geometria desejada [24].

Na Figura 15 é apresentado um exemplo de uma superfície a ser texturizada.



*Figura 15 - Texturização de uma superfície*

Trata-se de um processo de alta precisão, através do qual é possível obter geometrias com dimensão extremamente reduzida, na ordem dos  $\mu\text{m}$ , difíceis de produzir por métodos convencionais de maquinagem.

Este tipo de superfícies, com texturas na ordem dos  $\mu\text{m}$  tem cada vez maior demanda, devido à sua elevada capacidade de dissipar calor comparada a uma superfície idêntica, não texturizada.

A investigação de Garbas [25], reporta valores para o coeficiente de transferência de calor de placas texturizadas, quatro vezes superiores ao das placas lisas, referindo ainda um aumento da capacidade de transferir fluxos de calor nas placas texturizadas, obtendo uma potência dissipada de  $317 \text{ kW/m}^2$  para a placa com texturas de maior dimensão, comparado a  $176 \text{ kW/m}^2$  para a placa lisa

Misyura investigou a molhabilidade, a transferência de calor e de massa na evaporação de uma gota de água depositada numa parede horizontal aquecida. Na sua investigação, verificaram que na superfície texturizada com um comportamento hidrofóbico, houve um aumento da transferência de calor, na ordem dos 30 – 35% [26]. Embora as superfícies produzidas por Misyura difiram substancialmente tanto na geometria como na dimensão, comparativamente às superfícies produzidas ao longo da presente dissertação, são um bom indicativo das vantagens do uso de superfícies hidrofóbicas em processos de troca de calor.

Na investigação de Serdyukov verificou-se que ao texturizar uma superfície em silício, conferindo-lhe crateras que variavam entre os  $10 \times 10$  e os  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  com uma profundidade de 3 a 4  $\mu\text{m}$  foi possível melhorar até 49,5% a transferência de calor, quando comparado com uma superfície sem textura, e 234% quando comparado com a superfície polida, em testes de ebulição de água estacionária. A superfície texturizada apresentou um comportamento super hidrofílico. A melhoria verificada foi possível, devido à produção de texturas nas superfícies das amostras de silício, que auxiliaram no processo de ebulição, promovendo dessa forma o processo de troca de calor. [27]

### **3. Amostras preliminares e placas texturizadas**

O presente capítulo começa por abordar a produção de oito placas com cinco amostras preliminares de textura por placa, sendo estas amostras de pequena dimensão, (1 cm x 1 cm), e tendo como objetivo afinar os parâmetros do laser para posteriormente produzir texturas adequadas a serem testadas. Para tal, fez-se variar os seguintes quatro parâmetros na máquina de corte laser: velocidade, potência, frequência e o número de passagens.

Todas as operações de texturização das placas, foram executadas através da remoção de material a placas de liga de alumínio AW 5083 por um laser de fibra ótica, dopado com Nd:YVO<sub>4</sub>. Foi selecionada esta liga devido ao seu amplo uso tanto na indústria naval, como em sistemas de arrefecimento, cumprindo os requisitos a que as placas texturizadas para testar são sujeitas, nomeadamente o constante contacto com a água sem degradação significativa ao longo do tempo e a capacidade de dissipar calor de uma fonte quente.

Numa segunda etapa, após selecionados os parâmetros de corte desejados, fez-se variar o afastamento entre as linhas de corte do laser, obtendo diferentes dimensões de alheta. Nesta etapa o objetivo foi verificar a existência de limitações quanto ao tamanho das alhetas por parte da máquina laser.

Por último, tendo conseguido otimizar os parâmetros de corte do laser e verificando a existência de restrições geométricas, produziram-se quatro placas para posteriormente serem testadas.

### 3.1. Produção de amostras preliminares para seleção de parâmetros de corte laser.

Como referido anteriormente, as amostras preliminares e as placas foram produzidas através da remoção de material por um laser de fibra ótica, dopado com  $\text{Nd:YVO}_4$ , representado esquematicamente na Figura 16.

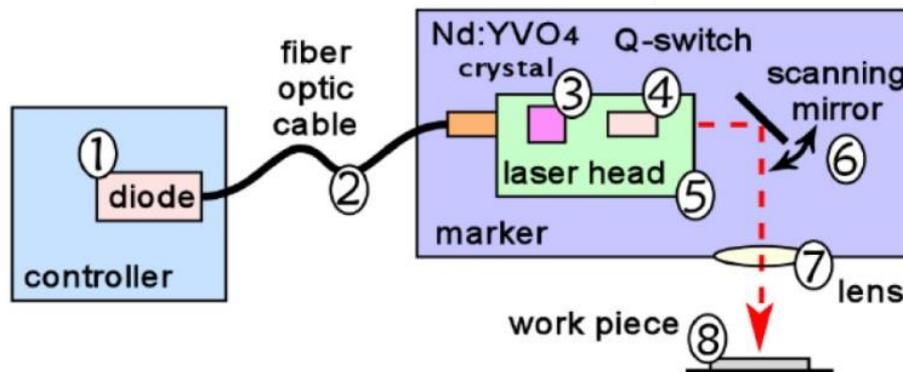


Figura 16 – Laser de fibra ótica dopado com  $\text{Nd:YVO}_4$  - 1. Diodo laser; 2. Cabo de fibra ótica; 3.  $\text{Nd:YVO}_4$  Crystal 4. Q-Switch; 5. Cabeça laser; 6. Espelhos; 7. Lente F-Theta; 8. Peça de trabalho;

Os lasers de fibra ótica usam díodos laser para gera a luz que é utilizada para produzir o feixe laser. A luz produzida por estes díodos é conduzida através de um cabo de fibra ótica, para que seja focada numa única direção e seja possível produzir o feixe laser. O núcleo dos cabos de fibra ótica, onde a luz viaja, é feito de vidro de sílica e revestido por um material com um índice de refração mais baixo do que o núcleo, de forma que quando a luz atinge o revestimento, esta seja refletida de volta para o núcleo, podendo dessa forma continuar o seu percurso até chegar à cabeça laser.

Na cabeça do laser, a luz é convertida num feixe com um comprimento de onda bem definido, neste caso de 1064 nm, através de uma grade de Bragg de fibra. É nesta região também, que a luz passa por um elemento de terra raro, neodímio neste caso, fazendo aumentar o nível de energia dos seus eletrões, que quando voltam ao estado normal, libertam energia sobre a forma de fotões ou luz. [28]

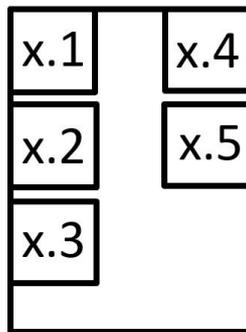
O feixe laser emergente da cabeça de laser é direcionado a um par de espelhos de varredura, aonde esses espelhos são inclinados rapidamente usando *scanners* galvo. O software, como por exemplo o *EZCAD*, executado num computador controla o movimento dos espelhos, direcionando-os para o local pretendido na peça de trabalho.

O feixe laser refletido pelos espelhos de varredura passam por uma lente chamada lente F-Theta, que é responsável por focar o feixe que a atravessa num ponto da peça de trabalho, normalmente com

menos de 40 µm de diâmetro. Quanto melhor focado estiver o laser, maior é a resolução obtida e maior é a capacidade de remover material a cada passagem.

### 3.1.1. Organização dos parâmetros de corte nas placas

Para se selecionarem os parâmetros de corte das placas, procedeu-se à texturização de oito placas, com cinco amostras preliminares por placa, com o intuito de se verificar como é que estes diferentes parâmetros influenciariam o acabamento superficial das alhetas e a sua profundidade. As cinco texturas de cada placa diferem entre elas apenas no número de passagens, sendo realizadas 1, 2, 4, 8 e 16 passagens da textura 1 até à textura 5 respetivamente. As amostras preliminares das oito placas foram organizadas como se pode ver na Figura 17, onde “x” é substituído pelo número da placa de teste em causa.



*Figura 17 - Organização das amostras preliminares na placa*

Definida a organização das texturas por placa, foram atribuídos parâmetros de corte às oito placas, sendo estes apresentados de seguida na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de corte das amostras

	Amostra	Potência (%)	Velocidade (mm/s)	Frequência (kHz)	Nº de Passagens
Placa 1	1.1	100	1500	50	1
	1.2	100	1500	50	2
	1.3	100	1500	50	4
	1.4	100	1500	50	8
	1.5	100	1500	50	16
Placa 2	2.1	50	1500	50	1
	2.2	50	1500	50	2
	2.3	50	1500	50	4
	2.4	50	1500	50	8
	2.5	50	1500	50	16
Placa 3	3.1	100	1000	50	1
	3.2	100	1000	50	2
	3.3	100	1000	50	4
	3.4	100	1000	50	8
	3.5	100	1000	50	16
Placa 4	4.1	50	1000	50	1
	4.2	50	1000	50	2
	4.3	50	1000	50	4
	4.4	50	1000	50	8
	4.5	50	1000	50	16
Placa 5	5.1	100	1500	20	1
	5.2	100	1500	20	2
	5.3	100	1500	20	4
	5.4	100	1500	20	8
	5.5	100	1500	20	16
Placa 6	6.1	50	1500	20	1
	6.2	50	1500	20	2
	6.3	50	1500	20	4
	6.4	50	1500	20	8
	6.5	50	1500	20	16
Placa 7	7.1	100	1000	20	1
	7.2	100	1000	20	2
	7.3	100	1000	20	4
	7.4	100	1000	20	8
	7.5	100	1000	20	16
Placa 8	8.1	50	1000	20	1
	8.2	50	1000	20	2
	8.3	50	1000	20	4
	8.4	50	1000	20	8
	8.5	50	1000	20	16

Analisando a tabela, pode verificar-se que o número de passagens é o único dos quatro parâmetros que se repete de forma sistemática para todas as placas.

Para os três restantes parâmetros, foram selecionados dois valores a serem testados, nomeadamente, para a potência, selecionou-se 100% e 50%, para a velocidade, 1500 mm/s e 1000 mm/s, e para a frequência, 50 kHz e 20kHz.

Utilizando os valores anteriormente apresentados, foram produzidas texturas com todas as combinações de parâmetros possíveis, resultando em oito placas e quarenta texturas no total.

### 3.1.2. Desenho parametrizado do corte

O desenho dos padrões a serem conferidos às placas foi efetuado no *software EZCAD*, este *software* é responsável pelo controlo do laser de forma a obter-se a textura desejada.

Na Figura 18 é apresentado um exemplo da interface do *software* com o desenho da geometria conferida às amostras preliminares e os parâmetros da amostra 1.5.

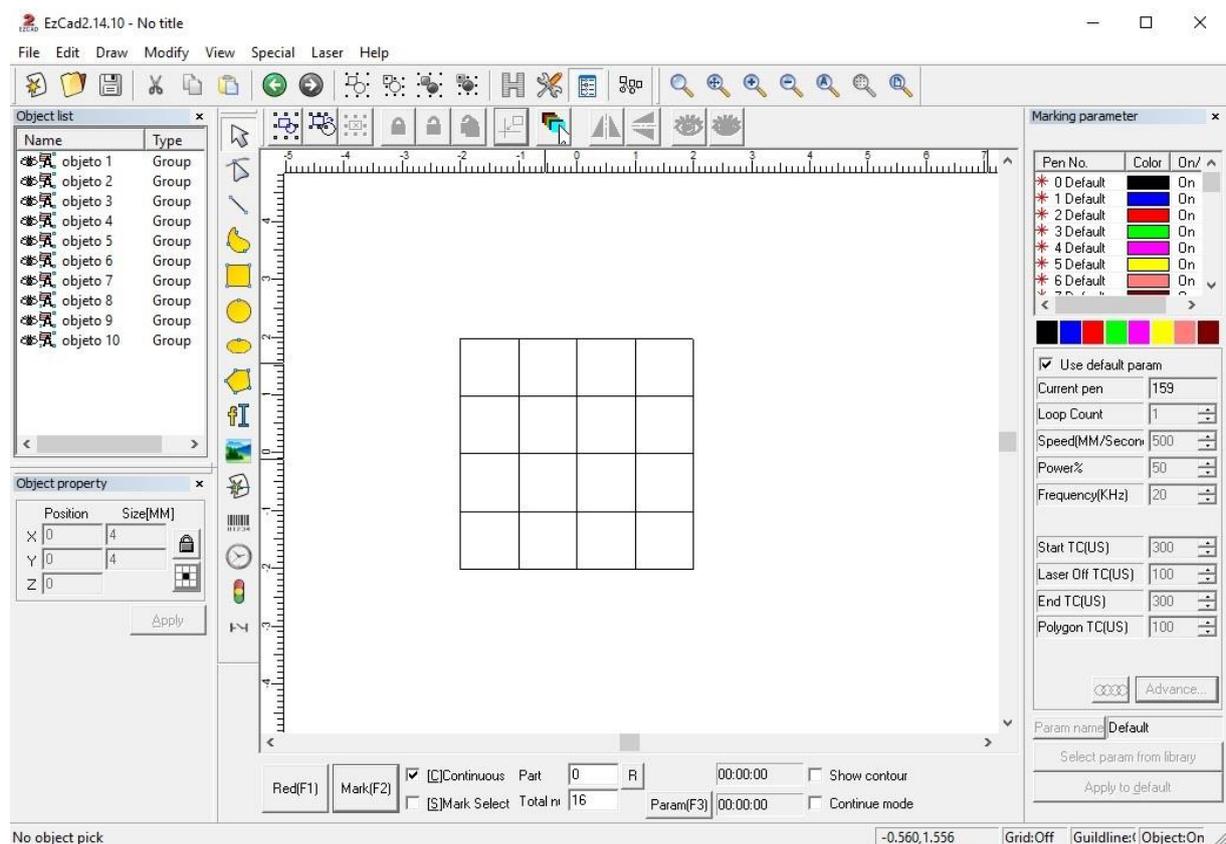


Figura 18 - Interface do *software* EZCAD e desenho da textura com parâmetros da amostra preliminar 1.5

O desenho apresentado na Figura 18 é conseguido criando linhas com a orientação, dimensão e espaçamento pretendido, e agrupando-as quando a geometria estiver concluída, formando um novo

objeto. O desenho apresentado é composto por dez objetos geometricamente iguais e sobrepostos, mas com diferentes parâmetros. Esses parâmetros são definidos na janela “*Mark parameter*” selecionando a *pen* que se pretende configurar e aplicando-a ao respectivo objeto.

É importante salientar que o programa procede à marcação do objeto de acordo com a ordem das *pens*, começando com a primeira *pen* da lista, até à última, completando uma passagem quando o laser marcar todos os objetos.

Para o desenho e produção das amostras preliminares e das placas, foi utilizada a máquina laser Nd:YVO<sub>4</sub>, presente no CMEMS, apresentada na Figura 19.

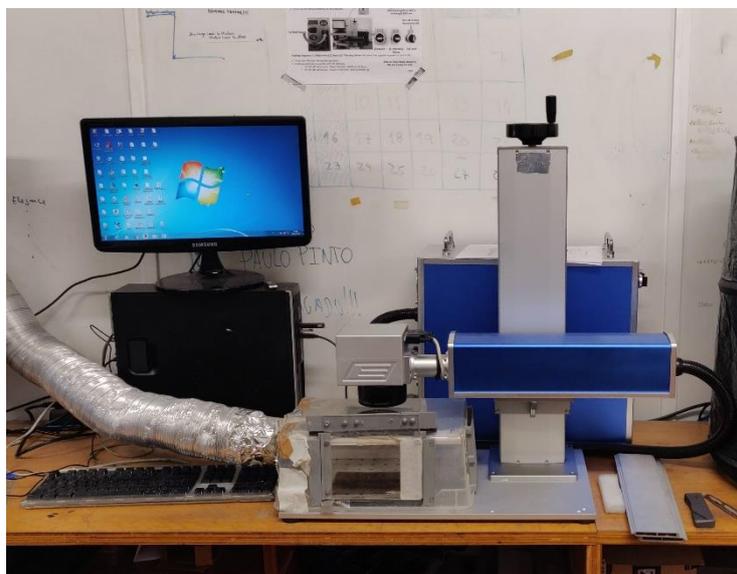


Figura 19 - Máquina laser presente no CMEMS

### 3.1.2.1. Wobble

O *wobble* representa oscilação da linha de corte, e serve para aumentar a sua espessura, passando a remover material segundo um movimento circular. Quando o *wobble* não é definido, o corte é linear com a espessura do ponto laser que pode ser tão pequena quanto 1  $\mu\text{m}$ .

No *software EZCAD* é possível aceder às configurações do *wobble*, podendo variar o diâmetro de corte e a distância entre circunferências. Na Figura 20 é apresentado um esquema representativo do *wobble*, para ajudar a entender o processo.

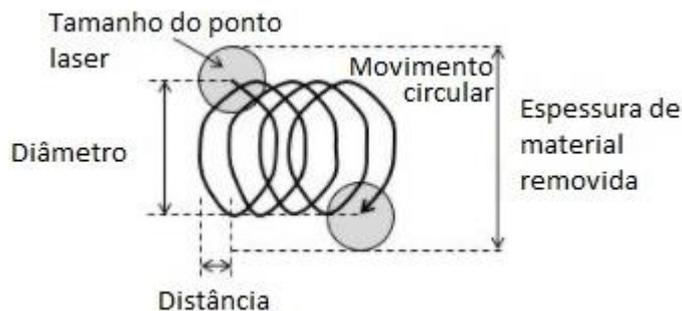


Figura 20 – Wobble

Cada um dos objetos apresentados na Figura 18 tem parâmetros diferentes para o *wobble*. Tendo em conta que a distância entre alhetas desejada é de 500  $\mu\text{m}$ , iniciou-se a passagem no objeto, “objeto 1”, definindo-se um diâmetro 50  $\mu\text{m}$  e uma distância de 12,5  $\mu\text{m}$ . A estes valores são feitos incrementos de 50  $\mu\text{m}$  ao valor do diâmetro e 12,5  $\mu\text{m}$  ao valor da distância, até se atingir um diâmetro de 500  $\mu\text{m}$  e uma distância de 125  $\mu\text{m}$  no objeto, “objeto 10”.

### 3.1.3. Preparação das placas das amostras preliminares

Antes de se proceder à texturização das placas lisas para obtenção das amostras preliminares, estas placas são cortadas com a geometria desejada, de modo a facilitar o manuseamento das mesmas e possibilitar a futura análise no microscópio eletrónico de varrimento (SEM). Depois de cortadas, as placas são polidas com uma lixa de água com uma granulação de 2000, de forma a ficarem espelhadas e uniformes na superfície a ser texturada. Com este acabamento superficial, pretende-se obter uma superfície tão uniforme quanto possível, de forma que o comportamento do laser no processo de corte, seja idêntico em todas as superfícies das placas lisas. O tempo médio de polimento de cada superfície rondou os cinco minutos.

### 3.1.4. Procedimento de corte de amostras preliminares

Concluído o desenho, parametrizados todos os seus objetos e preparadas as placas, passou-se ao processo de texturização das placas.

O processo para obtenção de uma textura segue as seguintes etapas:

1. Ligar o Computador;
2. Ligar o interruptor de energia da máquina de corte laser;
3. Ligar a placa;
4. Ligar os espelhos vibratórios;

- 5.** Ligar o laser;
- 6.** Ligar o sistema de exaustão;
- 7.** Abrir o software *EZCAD*;
- 8.** Abrir o desenho das texturas;
- 9.** Utilizando a função “*Red*” do *software*, inserir uma placa devidamente polida na câmara de corte laser, alinhando-a para que a zona de corte esteja totalmente abrangida pela placa;
- 10.** Uma vez alinhada usar a função “*Mark*”, para iniciar uma sequência de corte, de forma a, manualmente, se ajustar a distância de foco do laser;
- 11.** Uma vez ajustado o foco, interrompe-se a sequência de corte, retira-se a placa que foi utilizada, coloca-se uma nova placa, voltando a centrar a placa usando as instruções da etapa 9;
- 12.** Fecha-se a câmara de corte laser;
- 13.** Inicia-se novamente a sequência de corte, e espera-se até todas as passagens serem efetuadas;
- 14.** Abre-se a câmara de corte e ajusta-se a posição da placa para corte de nova amostra preliminar;
- 15.** Repetir passos 9, 12 13 e 14 até todas as amostras preliminares da placa serem produzidas;
- 16.** Concluído o corte te todas as amostras preliminares da placa, remove-se a placa e limpa-se a câmara de corte;
- 17.** Repetir passos 9, 12, 13 e 14 para as placas subsequentes à primeira.

Para calibrar a distância de foco da máquina, insere-se uma das placas previamente preparada dentro da câmara de corte laser, inicia-se uma sequência de corte, e ajusta-se a altura da cabeça do laser. Quanto mais brilhante for a luz proveniente do corte mais focado está o laser.

Na produção das amostras preliminares (tabela 3) a distância de foco foi de 11,2 cm.

As placas preparadas são inseridas na câmara de corte laser, apresentada na Figura 21, e alinhadas usando a função “*Red*” do *software* que assinala a área de corte. No alinhamento do contorno de corte com a placa, posiciona-se uma das arestas do contorno de corte ligeiramente fora placa para posteriormente facilitar a análise da textura no SEM.

A câmara é fechada e o ventilador é ligado para que as partículas de liga de alumínio que são removidas da placa, sejam extraídas do ambiente de trabalho em segurança.



Figura 21 - Câmara de corte laser

### 3.1.5. Limpeza das amostras preliminares

Após a operação de corte a laser, não só as placas ficam cobertas de pó de alumínio por toda a sua superfície, como ocorre a formação de óxidos na zona de corte, de modo que necessitam de ser limpas, usando-se para o efeito um transdutor de ultrassons *UP200St-T* e um gerador de ultrassons *UP200St-G* ambos da marca Hielscher apresentados na Figura 22 e Figura 23 respectivamente.



Figura 22 - Transdutor de ultrassons *UP200St-T*



Figura 23 – Gerador de ultrassons *UP200St-G*

O gerador de ultrassons foi parametrizado para uma potência de 30W, a 20% da amplitude e pulso a 100%. Definidos os parâmetros, as placas são submersas em acetona dentro de um gobelé e a ponta do sonotrodo é aproximada da placa, ficando a menos de cinco milímetros de distância da mesma e garantindo sempre que a ponta do sonotrodo se encontra submersa pelo menos um centímetro.

Concluída a preparação descrita anteriormente, a placa é sujeita ao ultrassom durante sessenta segundos, sendo no final removida do gobelé com uma pinça para não contaminar a amostra, seca com ar comprimido e envolvida em folha de alumínio de forma a preservar a superfície limpa.

Este processo de limpeza revelou ser bastante eficaz a remover as partículas de pó das amostras, porém, embora o seu efeito não tenha sido nulo nas partículas de óxido, verificou-se que muitas dessas partículas continuavam na placa. Na Figura 24 são apresentadas as oito placas produzidas com cinco amostras por placa, para seleção de parâmetros de corte.

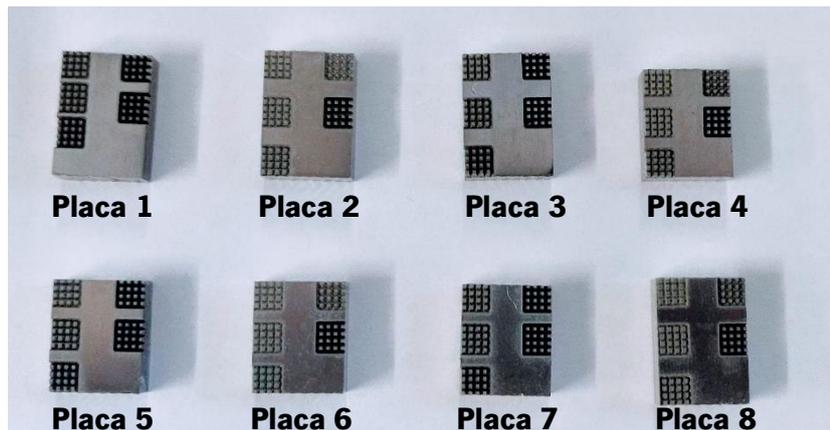


Figura 24 - Placas texturizadas para seleção de parâmetros

### 3.1.6. Análise das amostras preliminares com microscópio eletrônico de varrimento

Após a limpeza e acondicionamento adequado das placas texturizadas, estas são levadas até um SEM e fotografadas para análise das superfícies.

Remetendo novamente à Figura 17 e ao Anexo A para as amostras preliminares “x.1, x.2 e x.3” foram capturadas duas fotografias por amostra. A primeira mostrando uma vista geral de toda a textura produzida com uma escala representada de 500  $\mu\text{m}$  e uma ampliação trinta vezes superior relativamente ao tamanho real da peça. A segunda mostrando com maior detalhe o espaço entre quatro alhetas, com uma escala representada de 100  $\mu\text{m}$  e uma ampliação de cem vezes o tamanho real.

Para as amostras preliminares “x.4 e x.5”, foram capturadas três fotografias, duas delas iguais às amostras anteriores e uma terceira ao perfil das alhetas, com uma escala representada de 500  $\mu\text{m}$  e uma ampliação da imagem em quarenta vezes comparada ao tamanho real.

### 3.1.7. Seleção dos parâmetros de corte

Procedendo à seleção dos parâmetros de corte, recorrendo às imagens das amostras preliminares, no Anexo A são apresentadas as vistas gerais das quarenta amostras preliminares. Analisando as

imagens apresentadas na Figura 25, das amostras 1.1, 1.2, e 1.3 em que se usou 1, 2 e 4 passagens respectivamente, torna-se fácil de verificar que o espaço entre as alhetas fica altamente irregular, o que se torna um problema ao replicar a sua geometria posteriormente nas placas de teste.

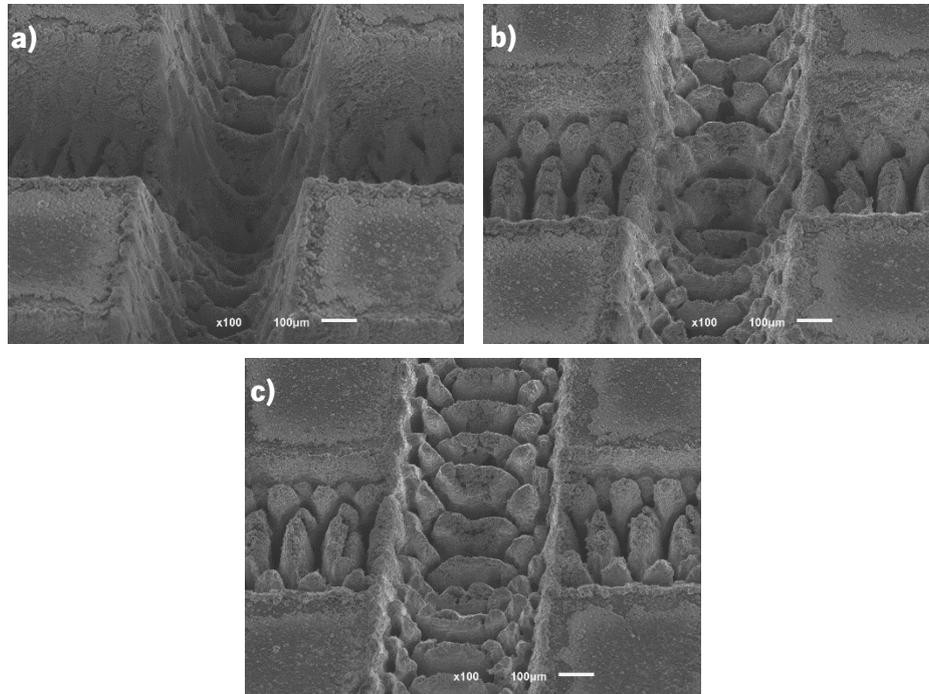


Figura 25 - Amostras: a) 1.1 (1 passagem); b) 1.2 (2 passagens); c) 1.3 (4 passagens)

A altura das alhetas para estas amostras, revelou ser também insuficiente, sendo desta forma excluídas todas as combinações de parâmetros de corte usados em “x.1, x.2 e x.3”.

Das amostras preliminares restantes, “x.4 e x.5”, constatou-se que as amostras preliminares “x.4” apresentam uma superfície mais irregular comparativamente às amostras preliminares “x.5” da mesma placa e tem uma menor altura das alhetas, ainda que a discrepância dessa altura não seja muito acentuada. Por estes motivos descartou-se os parâmetros usados em “x.4”. Na Figura 26 são apresentadas as amostras 1.4 e 1.5, para possibilitar a visualização das diferenças observadas.

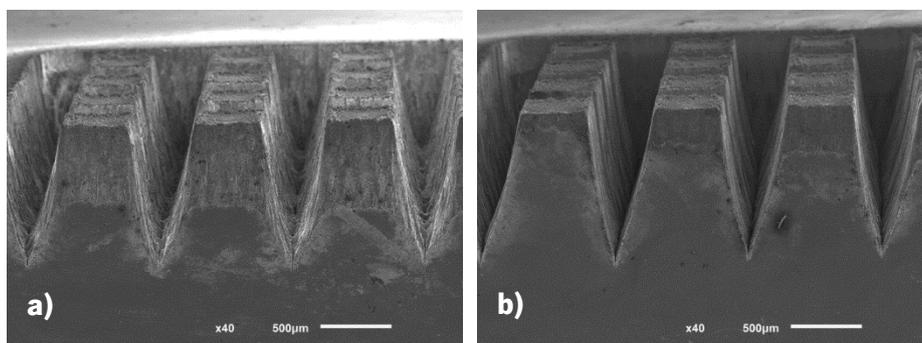
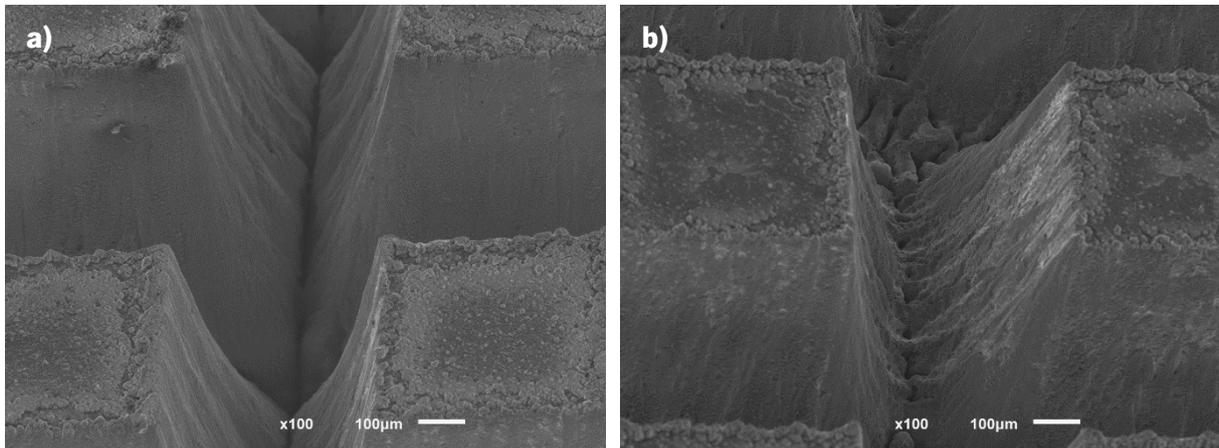


Figura 26 - Amostra: a) 1.4; b) 1.5

Restando apenas as amostras preliminares “x.5”, foram excluídos os parâmetros de corte com a potência a 50%, uma vez que nas amostras preliminares produzidas com a potência a 100% se verificou um melhor acabamento do perfil das alhetas. Na Figura 27 são apresentadas as amostras 1.5 e 2.5, que diferem entre elas apenas na potência de corte, em que se usou 100% da potência na amostra 1.5 e 50% na amostra 2.5.



*Figura 27 – Base das alhetas das amostras: a) 1.5; b) 2.5*

Como se pode verificar, a base das alhetas da amostra 2.5, são bastante irregulares, ao passo que a base da amostra 1.5, está razoavelmente bem definida.

Após toda esta seleção, restaram as amostras preliminares 1.5, 3.5, 5.5, e 7.5. As amostras mencionadas apresentam um acabamento satisfatório por toda a alheta, porém foi necessário selecionar um conjunto de parâmetros relativos a uma das amostras preliminares para se dar continuidade aos testes. Como tal, as amostras preliminares 5.5 e 7.5, parametrizadas com uma frequência de 20kHz foram excluídas, uma vez que as amostras preliminares 1.5 e 3.5, parametrizadas com uma frequência de 50kHz, apresentavam uma superfície lateral das alhetas marginalmente mais uniforme.

Entre as amostras preliminares 1.5 e 3.5, selecionou-se a amostra 1.5 ( $P = 100\%$ ,  $f = 50\text{kHz}$ ,  $v = 1500\text{ mm/s}$ ,  $n = 16$ ), pois comparando a vista em detalhe das duas, apresentada na Figura 28, verifica-se que a base das alhetas da amostra 1.5 apresenta uma geometria mais próxima de uma linha reta do que a base das alhetas da amostra 3.5.

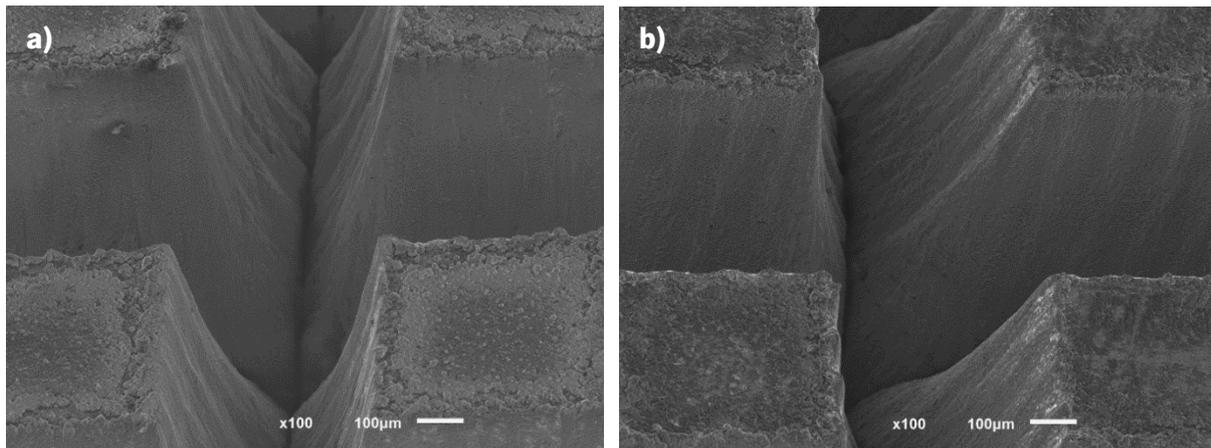


Figura 28 - a) amostra 1.5; b) amostra 3.5;

De acordo com a análise de imagem efetuada à amostra 1.5 no *software Imagej*, verificou-se:

- Altura média das alhetas - 1000  $\mu\text{m}$
- Distância média entre alhetas - 500  $\mu\text{m}$
- Comprimento médio das arestas de topo das alhetas – 450  $\mu\text{m}$
- Comprimento médio das arestas da base das alhetas – 950  $\mu\text{m}$

Com estes valores, foi calculada a área por alheta que se verificou ser aproximadamente 3,1  $\text{mm}^2$ .

### 3.2. Verificação do acabamento das amostras preliminares para diferentes dimensões de alheta

Utilizando os parâmetros de corte da amostra 1.5, foram produzidas três novas amostras preliminares com um comprimento de aresta do topo das alhetas de 550, 300 e 150  $\mu\text{m}$ .

O objetivo da produção deste segundo grupo de amostras preliminares foi avaliar a capacidade da máquina laser manter a qualidade do acabamento conseguido na amostra 1.5 nas novas amostras preliminares com diferentes dimensões das alhetas.

Na Figura 29 são apresentadas as vistas em detalhe das amostras preliminares produzidas e como se pode verificar, a amostra com alhetas de 550  $\mu\text{m}$  de aresta de topo manteve um acabamento aceitável para as faces laterais das alhetas, ao passo que as amostras com 150 e 300  $\mu\text{m}$  de aresta de topo das alhetas apresentaram um deterioramento aparentemente mais severo das mesmas.

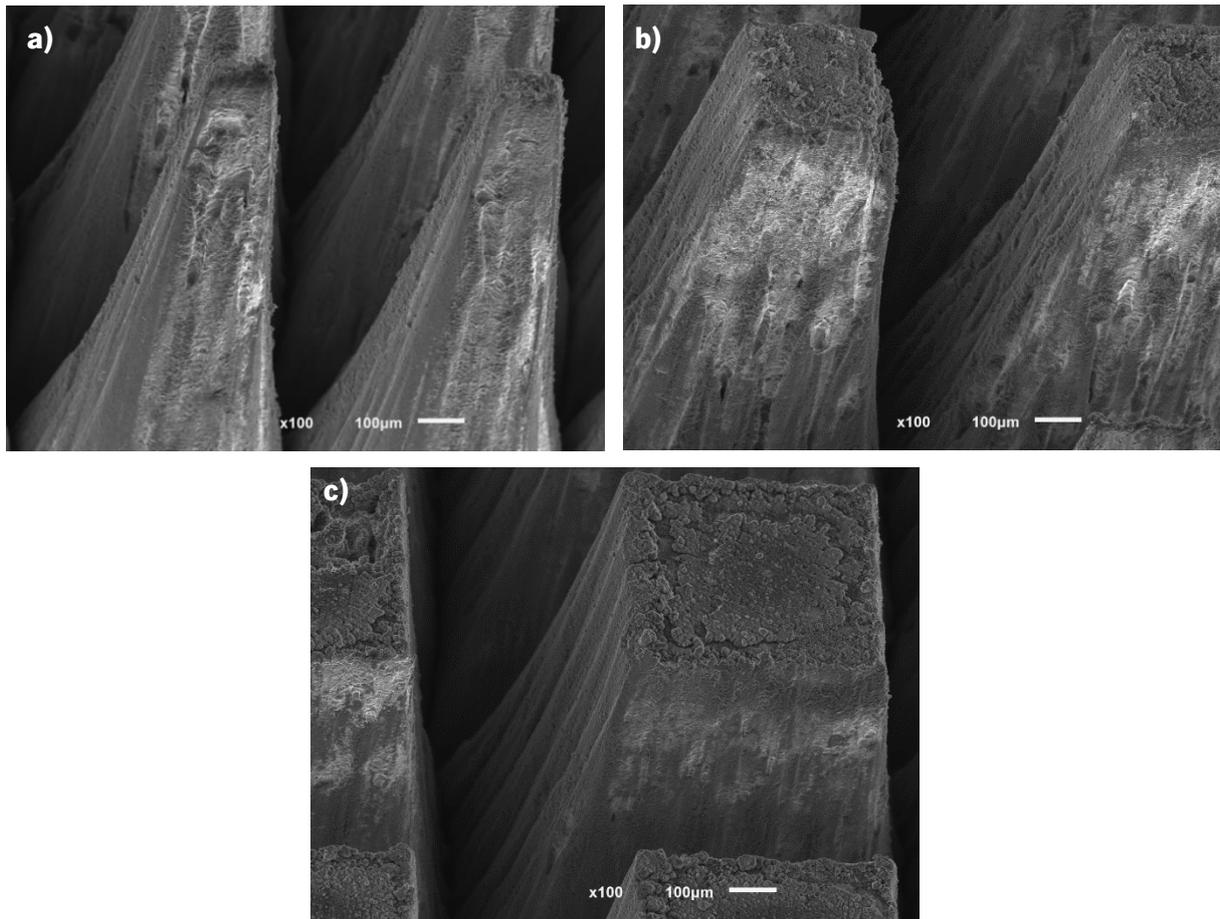


Figura 29 - Vista em detalhe das amostras com: a) 150 µm de aresta de topo; b) 300 µm de aresta de topo; c) 550 µm de aresta de topo;

### 3.3. Produção das placas texturizadas para testes de troca de calor

As amostras preliminares produzidas até este ponto tiveram como objetivo a avaliação e seleção dos parâmetros de corte e a verificação de restrições geométricas na produção das placas texturizadas a serem testadas.

Considerando as amostras preliminares produzidas, é possível verificar que com o aumento do número de passagens aumenta a profundidade das alhetas e o acabamento superficial das mesmas tende a melhorar. Como tal, na produção das placas texturizadas a serem testadas, aumentou-se o número de passagens de forma a aumentar a altura das alhetas de 1000 µm para 2000 µm.

As dimensões escolhidas para as placas foram 40 mm de largura, 40 mm de comprimento e 5 mm de espessura, simulado uma placa de dissipação de calor de um CPU.

Considerando os resultados obtidos, definiu-se que a dimensão das arestas de topo das alhetas a serem testadas seria de 300, 600, 900 e 1200 µm, nomeadas de Placa 1 a 4 respetivamente, com os seguintes parâmetros de corte:

- Potência (P) = 100 %
- Velocidade de corte ( $v_c$ ) = 1500 mm/s
- Frequência (f) = 50kHz
- Número de passagens (n) = 16

Utilizaram-se estes novos valores de aresta, maiores, pois é de todo vantajoso, no que respeita à troca de calor, maximizar este parâmetro. É de salientar também, que embora o número de passagens se mantenha 16 nos parâmetros de corte, os objetos foram sucessivamente incrementados em uma unidade na função “*Loop Count*”, começando com o valor um para o “objeto 1”, o valor dois para o “objeto 2” e assim sucessivamente até ao “objeto 10”, conseguindo assim aumentar a altura da alheta de 1000  $\mu\text{m}$  para 2000  $\mu\text{m}$ .

### **3.3.1. Acabamento e limpeza das placas texturizadas de teste de dissipação de calor**

O método de acabamento utilizado para obtenção das placas texturizadas, foi por ataque químico com ácido clorídrico. Utilizou-se este processo numa tentativa de eliminar os óxidos resultantes do corte laser. A contrapartida da utilização desta técnica, foi o aparecimento de alguns pontos de penetração do ácido nas faces laterais e na base das alhetas.

Foram acrescentados 50  $\mu\text{m}$  à distância entre linhas no desenho em EZCAD das placas texturizadas finais, de modo a compensar o material que é removido quando as placas são sujeitas ao ataque químico. Utilizou-se este método de limpeza por ataque químico, seguido da limpeza por ultrassons, numa tentativa de remover os óxidos formados, durante o corte laser. Esta limpeza foi feita em cinco etapas:

- 1.** As placas foram submersas em ácido fluorídrico com uma concentração de 40% durante 20 segundos sendo movimentadas durante todo esse período.
- 2.** As placas foram submersas numa mistura de 20 ml de ácido fluorídrico de concentração 40 % com 300 ml de água destilada, ficando a mistura com uma concentração de 2,5%, durante sessenta segundos, movimentando as placas durante todo o período.
- 3.** As placas foram limpas no dispositivo de ultrassons parametrizado com a potência a 100 W, enquanto submersas em acetona durante 60 segundos, sendo a placa movimentada durante todo esse período.
- 4.** As placas foram limpas no dispositivo de ultrassons parametrizado com a potência a 100 W, enquanto submersas em água da rede durante 60 segundos, sendo a placa movimentada durante todo esse período.

5. As placas foram limpas no dispositivo de ultrassons parametrizado com a potência a 60 W, enquanto submersas em acetona durante 60 segundos, estando a placa em repouso durante todo esse período.

Após o processo de limpeza, a produção das placas encontra-se concluída. As placas produzidas, apresentam uma aresta de topo de 300, 600, 900 e 1200  $\mu\text{m}$  de acordo com o pretendido, sendo nomeadas Placa 1, 2, 3 e 4 respetivamente. As placas são apresentadas na Figura 30.

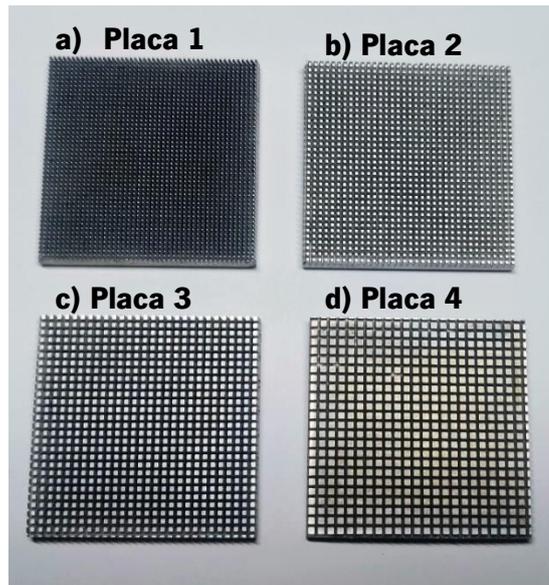


Figura 30 - Placas texturizadas produzidas: a) Placa 1 - 300  $\mu\text{m}$  de aresta de topo; b) Placa 2 - 600  $\mu\text{m}$  de aresta de topo; c) Placa 3 - 900  $\mu\text{m}$  de aresta de topo; d) Placa 4 - 1200  $\mu\text{m}$  de aresta de topo;

Na tabela 4 são apresentadas as propriedades do material das placas, as características geométricas possíveis de determinar, e os tempos de produção de cada uma delas.

Tabela 4 - Características das placas

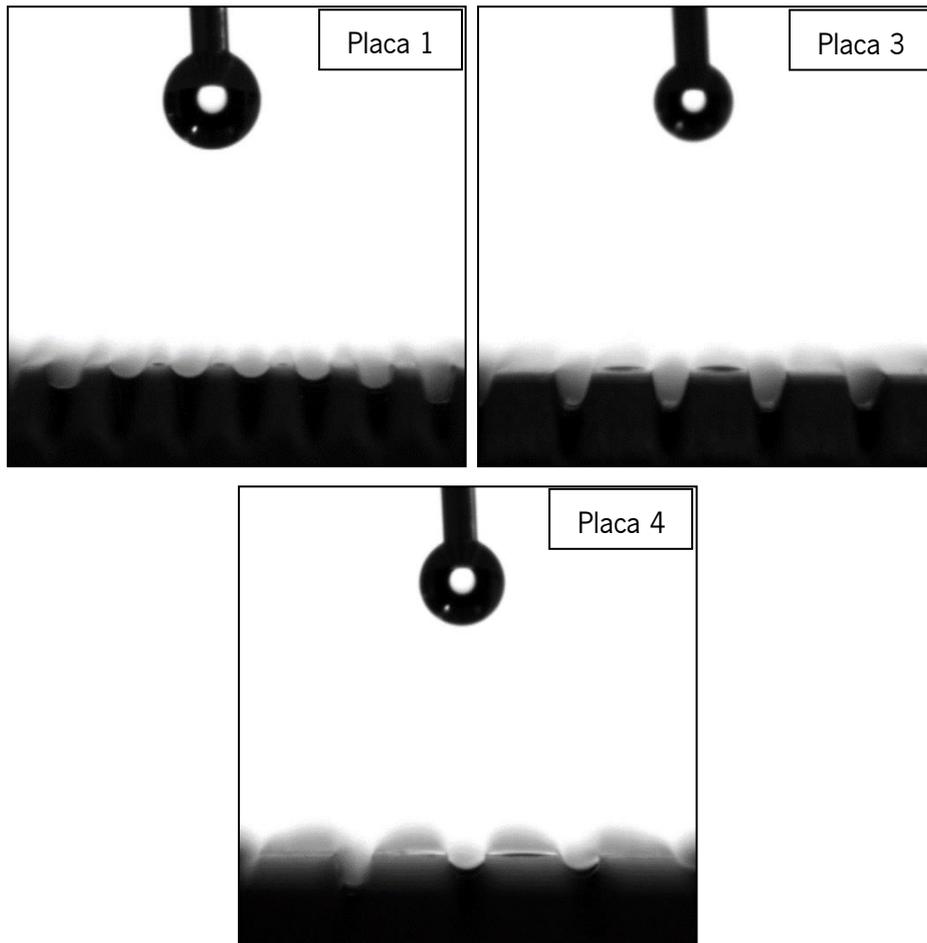
	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>	<b>Placa 3</b>	<b>Placa 4</b>
Material	Liga de Alumínio AW 5083			
Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2660			
Calor específico (J/kg.K)	900			
Altura (µm)	2000			
Distância entre alhetas (µm)	500			
Aresta superior (µm)	300	600	900	1200
Aresta da base (µm)	850	1150	1450	1750
Número de alhetas	2209	1225	784	529
Área por alheta (mm <sup>2</sup> )	4,73	7,43	10,30	13,35
Área total (mm <sup>2</sup> )	10456	9097	8074	7063
Volume por alheta (mm <sup>3</sup> )	0,71	1,58	2,81	4,40
Volume total das alhetas (mm <sup>3</sup> )	1572	1939	2204	2328
Volume da placa original (mm <sup>3</sup> )	8000			
Volume da placa texturizada (mm <sup>3</sup> )	6372	6738	7004	7128
Tempo de produção	14h 14min 12s	10h 1min 36s	7h 51min 28s	6h 37min 36s

### 3.3.2. Testes de Molhabilidade

Concluída a limpeza das placas, foram realizados testes de molhabilidade a todas as superfícies texturizadas, com o objetivo de averiguar o comportamento da superfície em contacto com a água.

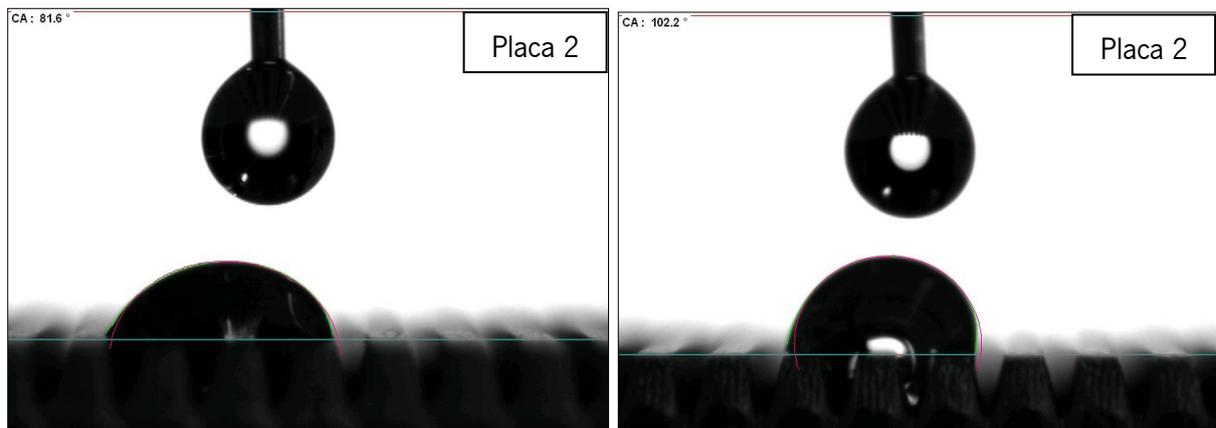
Para o efeito, sabe-se que uma superfície é super hidrofílica quando o ângulo de contacto entre a gota depositada e a superfície é menor do que 10°, hidrofílica quando o ângulo de contacto está entre os 10 e os 90°, hidrofóbica quando o ângulo está entre os 90 e os 150° e super hidrofóbica quando o ângulo é superior a 150°.

Foi então utilizado o método da gota sessil [29] parametrizado para um volume de água de 15 µL, depositado a uma velocidade de 2,5 µL/s e uma altura de aproximadamente 5 mm. Os testes foram realizados a uma temperatura ambiente de 27,3 °C. Observou-se que as placas 1, 3 e 4 apresentavam um comportamento super hidrofílico, sendo a gota absorvida instantaneamente pelas alhetas. Na Figura 31 é apresentado o resultado dos testes das placas 1, 3 e 4 respetivamente.



*Figura 31 - Teste Sessile Drop das Placas 1, 3 e 4 com comportamento super hidrofílico*

Contrariamente às restantes placas, a placa 2 apresentou um comportamento hidrofóbico tendo a gota de teste um ângulo de contacto de com a superfície de  $102,2^\circ$  no primeiro teste e  $81,6^\circ$  no segundo. Na Figura 32 é apresentado o resultado dos testes para a Placa 2.



*Figura 32 - Teste Sessile Drop da Placa 2 com comportamento hidrofóbico*

## 4. Dispositivo de testes para troca de calor das placas texturizadas

Neste capítulo é descrito o dispositivo que foi desenvolvido para realizar os testes de dissipação de calor, usando água como fluido de arrefecimento para arrefecer as placas texturizadas apresentadas no capítulo anterior (Capítulo 3). Enquanto a água circula pela face texturizada das placas, um bloco aquecido por uma resistência de cartucho aquece as placas. O objetivo dos testes realizados foi monitorizar através de um programa de aquisição de dados, a temperatura da placa, a temperatura da água de saída, a temperatura da água de entrada, a temperatura da resistência de cartucho e o caudal, durante aproximadamente quinze minutos por teste, havendo a possibilidade de controlar a temperatura da resistência de cartucho através do programa e o caudal manualmente, para posteriormente determinar a potência dissipada, utilizada para fazer uma análise comparativa entre as placas, e o coeficiente de transferência de calor global de cada uma delas por uma questão de caracterização das mesmas. O culminar do trabalho realizado neste capítulo é apresentado posteriormente na Figura 33 e descrito em maior detalhe nos subcapítulos posteriores.



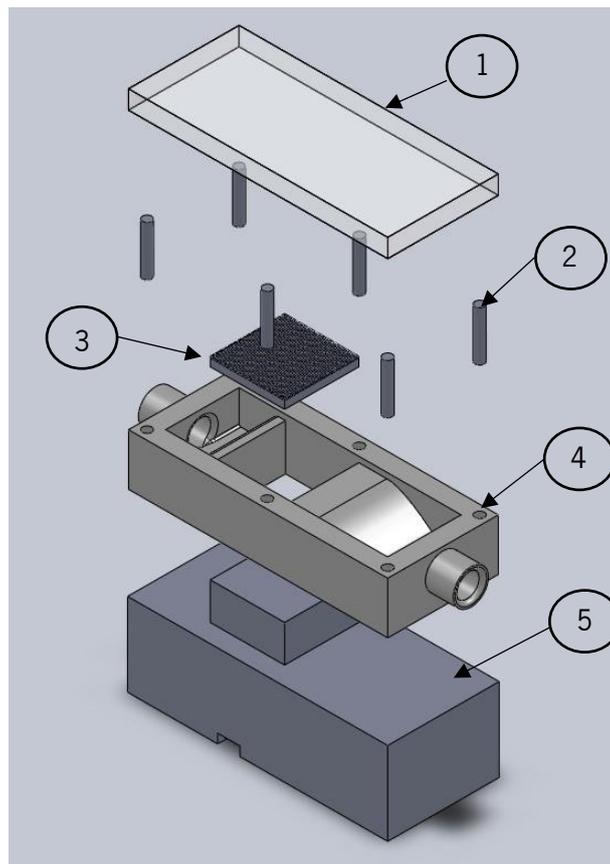
*Figura 33 - Dispositivo de testes*

Findo este resumo teórico, concluiu-se que é necessário monitorizar as seguintes variáveis durante as experiências:

- Caudal volúmico (L/min)
- Temperatura da água de entrada (°C)
- Temperatura da água de saída (°C)
- Temperatura da placa (°C)

#### 4.1. Apresentação do dispositivo de testes

Determinadas as variáveis necessárias a controlar, a etapa seguinte foi a concepção de um dispositivo capaz de monitorizar as variáveis previamente mencionadas no capítulo 4.1, com uma geometria capaz de albergar as placas produzidas, assim como de as aquecer por um lado e arrefecer por outro com recurso a água. Destes constrangimentos resultou o modelo apresentado em vista explodida na Figura 34



*Figura 34 - Vista explodida dos componentes produzidos manualmente do dispositivo de testes*

Os componentes numerados na Figura 34, foram produzidos manualmente e são eles:

- 1- Tampa de vidro (140 x 60 x 10 mm)
- 2- (x6) Batentes (  $\varnothing$  5 mm; Altura = 27 mm)
- 3- Placa texturizada
- 4- Peça em silicone
- 5- Bloco de aquecimento

#### 4.1.1. Controlo e monitorização

Principiando pelo funcionamento, o objetivo foi desenvolver um dispositivo capaz de aquecer as placas pela face oposta à face texturizada e de as arrefecer, usando água na face texturizada, medindo a temperatura da água de entrada, da água de saída, da placa texturizada e monitorizando o caudal.

Assim sendo, esquematizou-se o sistema de monitorização e controlo do dispositivo apresentado na Figura 35.

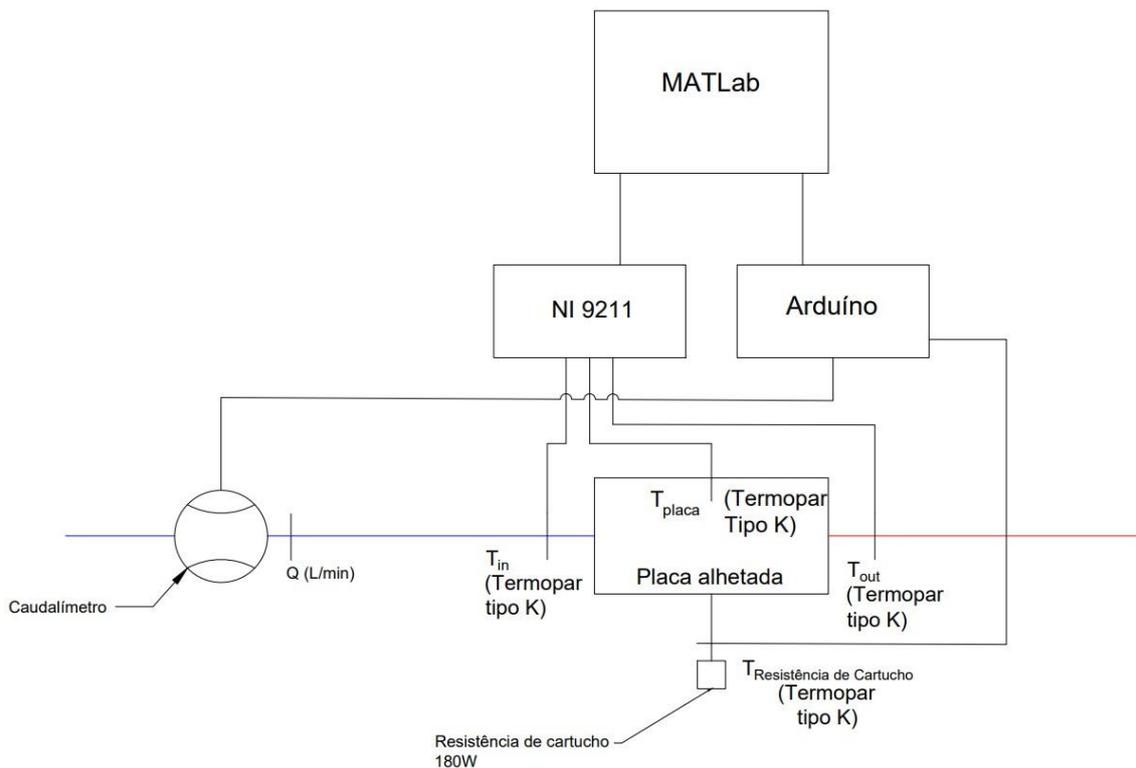
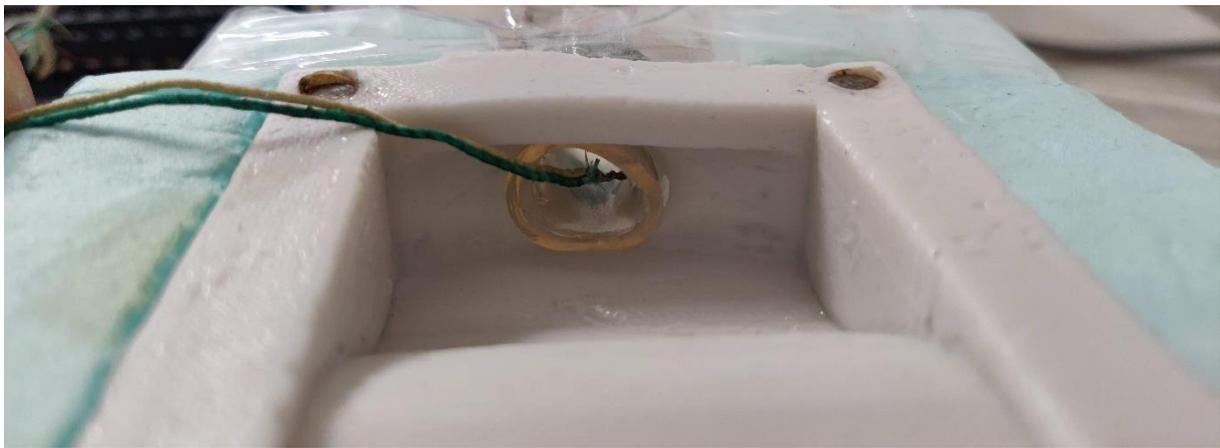


Figura 35 - Esquema de monitorização e controlo do dispositivo de testes

Começou por se realizar um código em Arduino, usando linguagem de programação C, para que fosse possível fazer a aquisição de dados da temperatura do termopar da resistência de cartucho, e do número de pulsos por unidade de tempo medido pelo caudalímetro.

Posteriormente, elaborou-se um código para o programa de aquisição de dados que permitia definir uma temperatura de trabalho para a resistência de cartucho controlando o seu acionamento. Através deste código, foram adquiridas as temperaturas da placa, água de entrada e água de saída, e apresentadas as medições de todas temperaturas, assim como do caudal, de uma forma gráfica, facilitando a monitorização das medições.

Para monitorização das temperaturas da água de entrada, da água de saída, da placa texturizada e da resistência, utilizaram-se quatro termopares tipo K instalados como apresentado na Figura 36, 37 e 38 respetivamente.



*Figura 36 - Posicionamento do termopar da água de entrada*



*Figura 37 - Posicionamento do termopar da água de saída*

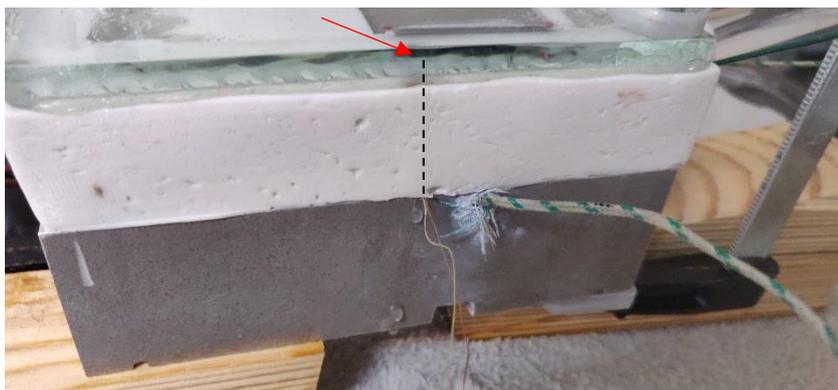


Figura 38 - Posicionamento do termopar da placa e da resistência

O termopar da água de entrada foi instalado dentro do tubo da água de entrada, o termopar da água de saída foi instalado imediatamente a seguir à placa e antes da rampa de saída. O termopar da placa foi encostado à superfície lateral da placa e o termopar responsável pela monitorização e controlo da resistência, foi instalado no topo da resistência de cartucho. Todos estes termopares são do tipo K, apresentando como tal uma incerteza de 2,2 °C entre os 0 e os 277 °C e 0,75 % do valor da medição, para valores entre os 277 e os 1260 °C.

Estes termopares encontram-se ligados a uma placa de aquisição de dados *NI-9211* [30] que faz a comunicação dos valores de temperatura medidos para o computador via *cDAQ-9171* [31].

Para monitorização do caudal, utilizou-se um caudalímetro por deslocamento positivo *FPD3002* [32], indicado para temperaturas de líquido entre os -40 °C e os 80 °C e para caudais entre os 2 e os 100 litros por hora, com uma precisão de  $\pm 0,5\%$  da leitura. Este caudalímetro foi instalado antes da zona de testes e ligado a uma placa de circuito impresso conectada ao *Arduíno*. Ao contrário da placa de aquisição de dados que envia para o programa de aquisição de dados os valores da temperatura, fazendo a conversão da diferença de tensão medida pelos termopares no próprio equipamento, o caudalímetro envia para o programa o número de pulsos, correspondente a um volume de água que por ele passa por uma determinada unidade de tempo, sendo necessário converter esse número de pulsos num caudal volúmico posteriormente.

Na placa de circuito impresso mencionada, estava também ligada a resistência de cartucho e o termopar responsável pela monitorização da mesma.

#### **4.1.2. Componentes do dispositivo de testes**

De acordo com as variáveis que se pretende monitorizar, concebeu-se um dispositivo de testes para arrefecer as placas texturizadas, usando água da rede como fluido de arrefecimento em circuito

aberto. Usou-se água da rede em circuito aberto, de forma minimizar as variações de temperatura para a água de entrada.

Definiu-se que método de aquecimento das placas texturizadas seria por intermédio de um bloco de aquecimento também ele em liga de alumínio AW 5083. O bloco de aquecimento foi maquinado nas oficinas do DEM, conferindo-lhe a geometria apresentada no desenho técnico no Anexo B. Foi removido material ao bloco, usando para o efeito uma fresadora, até se formar um paralelepípedo no seu topo com 40 mm de largura, 40 mm de comprimento e 20 mm de altura, aonde a placa de teste é colocada em contacto com o bloco e se encaixa a peça em silicone. É de salientar que nesta zona de contacto entre a placa de testes e o bloco de aquecimento, durante os testes, foi utilizada uma manta térmica com uma condutibilidade térmica de  $62,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , de forma a reduzir a resistência de contacto. Fez-se um furo na base do bloco, com um diâmetro de 12 mm e uma profundidade de 42 mm e removeu-se material à volta do furo até uma profundidade de 5 mm para conseguir passar os fios elétricos da resistência. Posteriormente, fez-se um furo com 3 mm de diâmetro na superfície lateral do bloco, coincidente com o topo da resistência de cartucho, para instalação do termopar responsável pela monitorização da sua temperatura.

Utilizou-se uma resistência de cartucho com 180 W de potência, apresentada na Figura 39. Esta resistência é ligada à rede e controlada através do código do *Arduino* usando um termopar tipo K encostado à mesma para monitorização da temperatura. Caso a temperatura exceda a temperatura definida, o relé é fechado, impedindo a passagem de corrente elétrica, voltando a abrir caso a temperatura seja inferior à temperatura definida.

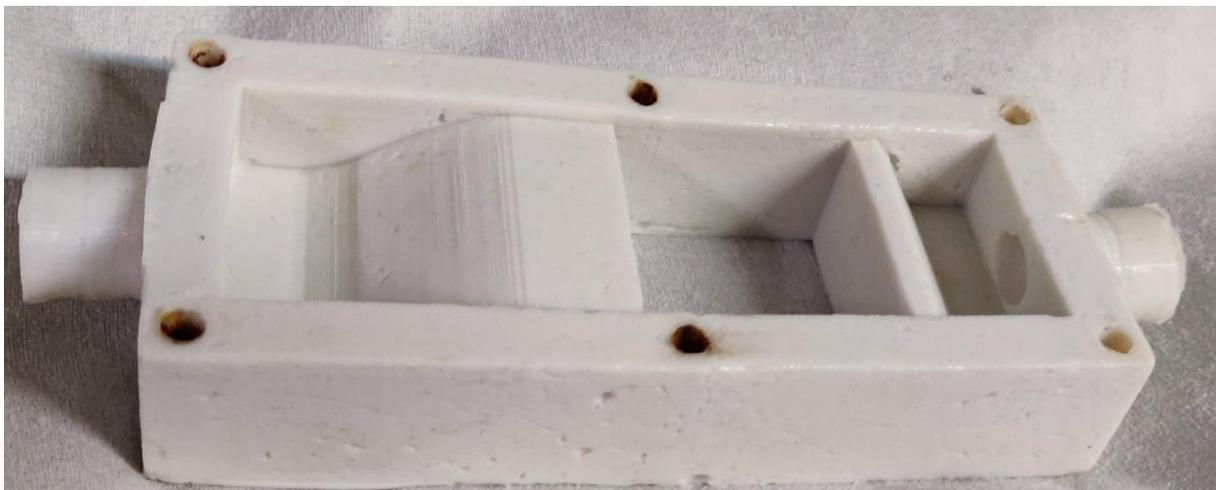


*Figura 39 - Resistência de cartucho instalada no bloco de aquecimento*

Neste ponto foi necessário produzir uma peça que mantivesse o bloco de aquecimento e a placa alinhados, que permitisse a entrada e a saída de água, antes e depois da zona de testes respetivamente e que fosse estanque. O material escolhido para produzir a peça deveria funcionar como isolante para evitar que o calor do bloco aquecesse a água antes desta chegar à placa texturizada.

Tendo em conta os constrangimentos mencionados, definiu-se que o material da peça seria de silicone, devido à sua baixa capacidade de transferir calor por condução, à sua elasticidade, que lhe permite conformar-se ao bloco de aquecimento servindo como vedante, e a facilidade de obtenção de peças usando este material. Para esta peça foi usada uma mistura de 186 g de silicone e aproximadamente 6 g de catalisador.

A peça produzida é apresentada na Figura 40, seguida da análise da sua geometria.



*Figura 40 - Peça em silicone*

Trata-se de um paralelepípedo com uma entrada de água do lado esquerdo da figura e uma saída de água pelo lado direito. Na entrada e saída de água é instalado um tubo de silicone de 13 mm de diâmetro, fixado por abraçadeiras plásticas, evitando fugas e escoando o fluido para um local adequado à saída.

A secção quadrada sem material, é a secção onde o bloco de aquecimento, a manta de carbono e as placas texturizadas são instaladas. Esta secção tem 39,5 mm de comprimento e de largura ao passo que tanto o bloco como as placas têm aproximadamente 40 mm. Dimensionou-se esta secção ligeiramente mais pequena que a secção das placas e do bloco, mais uma vez para ajudar com a estanquicidade do sistema e utilizou-se a manta de carbono para minimizar a resistência de contacto entre as placas e o bloco, e desse modo melhorar a condução do calor.

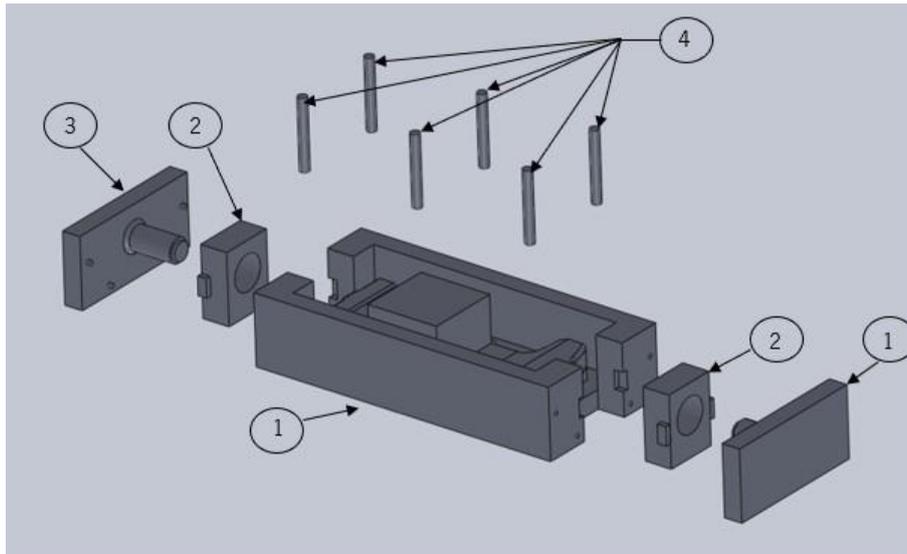
A peça em silicone tem uma rampa na zona de admissão de água, para permitir o escoamento de entrada na placa seja laminar e o mais uniforme possível. Na zona de saída também existe uma rampa, mas com um declive mais acentuado, pois nesse ponto, já não é necessário que o escoamento seja laminar.

Por fim, é possível reparar que a peça tem seis furos, quatro deles nos cantos e dois a meio das paredes paralelas ao escoamento. O seu propósito foi a instalação de batentes, previamente retificados nas oficinas do DEM conferindo-lhes uma altura de 27 mm, sendo estes batentes responsáveis por garantir não só que a distância entre o topo das placas texturizadas e a tampa de vidro fosse sempre constante (2 mm), mas também que a peça em silicone não fosse mais deformada do que o necessário, quando a tampa de vidro fosse colocada e apertada por via de dois grampos de fuso colocados em vértices opostos do dispositivo.

Na tampa de vidro foi aplicado um vedante a toda a sua volta na superfície em contacto com a peça de silicone e colados dois batentes paralelos ao escoamento numa posição que coincidia com as extremidades das placas texturizadas quando a tampa de vidro era montada, com o objetivo de garantir que as placas texturizadas estavam sempre em contacto com o bloco de aquecimento, mesmo com o escoamento a passar sobre elas.

O dispositivo de testes foi isolado termicamente com uma placa de poliestireno extrudido nas paredes laterais. Este isolamento previne trocas de calor com o meio ambiente, obrigando a que todo o calor gerado pela resistência atravessasse a placa e os resultados sejam fiáveis.

Para o fabrico da peça de silicone, foi necessário projetar um molde com o negativo da geometria desejada, de forma a poder verter a solução de borracha de silicone com o catalisador no molde e obter a peça desejada. O molde produzido é apresentado na vista explodida na Figura 41



*Figura 41 - Vista explodida do molde da peça de silicone*

Como é possível verificar, o molde é constituído por onze peças, sendo as peças 1, 2 e 3 produzidas por impressão 3D e as peças 4, por corte de um varão de alumínio retificado de 5 mm de diâmetro.

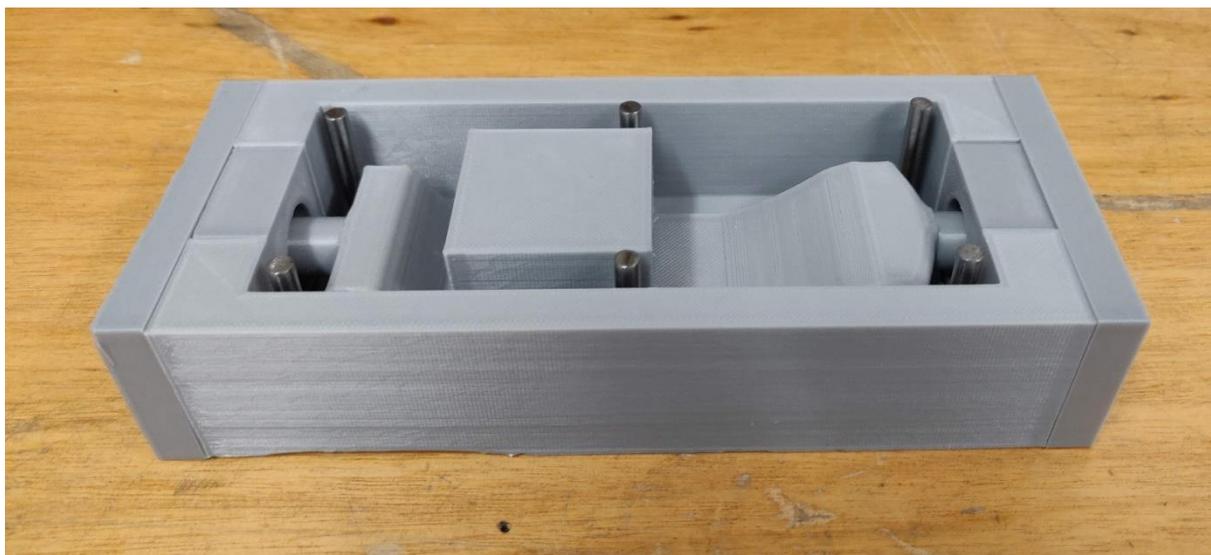
A peça 1, a fêmea do molde, é a peça do molde onde todas as restantes peças encaixam. É responsável por conferir a maior parte das geometrias à peça em silicone, nomeadamente a sua forma, as rampas e a secção de encaixe do bloco e das placas.

As peças 2 são implementadas para criar o contorno da secção de encaixe dos tubos. Usaram-se duas peças separadas da fêmea do molde para não danificar os encaixes quando a peça for removida do molde.

As peças 3 são responsáveis por conferir à secção de encaixe dos tubos o diâmetro apropriado e facilitar o processo de extração da peça do interior do molde.

As peças 4 são as hastes de alumínio e o seu propósito é conferir à peça de silicone os furos, onde os batentes de alumínio vão ser instalados.

Após a montagem das peças, é obtido o molde apresentado na Figura 42, a partir do qual foi produzida a peça em silicone.



*Figura 42 - Molde para obtenção da peça em silicone*

Por fim procedeu-se à montagem do dispositivo de testes, apresentado na Figura 33.

Começou por se instalar a peça de silicone no bloco de aquecimento, seguida pela colocação dos tubos da água de entrada e saída. O tubo da água de entrada foi ligado ao caudalímetro, sendo este último ligado à água da rede.

Posteriormente aplicou-se o isolamento em torno do bloco de aquecimento e da peça em silicone, instalando de seguida os termopares e a resistência de cartucho. Conectou-se o caudalímetro, a resistência de cartucho e o seu termopar, à placa de circuito impressa instalada no *Arduíno* e conectaram-se os termopares à placa de aquisição de dados *NI-9211*.

Conectou-se o *Arduíno* e a placa de aquisição de dados *NI-9211*, e exportou-se o código do *Arduíno* para o programa de aquisição de dados, ficando assim o dispositivo de testes preparado para instalar e testar as placas texturizadas.

Tendo em conta que a resistência de cartucho do dispositivo de testes (Figura 39) funciona com tensões de 220 V e existe circulação de água junto à mesma, por uma questão de prudência, instalaram-se dois mecanismos de segurança, sendo o primeiro o uso de uma tomada tripla com interruptor, posicionada longe da resistência, para cortar a energia em caso de perigo e o segundo, foi o posicionamento do encaixe entre mangueiras junto ao dispositivo e dentro de uma banca, para possibilitar o corte da água.

Após a montagem, todos os componentes foram testados para verificar anomalias. Foram encontradas algumas, como por exemplo, falhas nas medições, fugas de água e instabilidade no funcionamento da resistência funcionando acima de 70 °C.

As falhas nas medições, resultaram do posicionamento incorreto da resistência de cartucho e do seu termopar e só se verificavam para temperaturas de funcionamento acima dos 150 °C. Quando os fios de alimentação da resistência estavam em contacto com o termopar, as medições da temperatura não eram apresentadas no seu gráfico. Este problema foi resolvido, separando os fios dos componentes.

As fugas de água foram solucionadas, aplicando um vedante nas zonas de fuga.

Já para a instabilidade de funcionamento da resistência de cartucho acima dos 70 °C, não se conseguiu solucionar. Acima dessa temperatura, nas simulações de teste, com água a escoar sobre a placa texturizada, a resistência de cartucho atingia a temperatura definida em intervalos de tempo diferentes, chegando mesmo em algumas situações a não conseguir atingir a temperatura pretendida. Como tal, concluiu-se que com a resistência instalada, não era possível obter resultados fiáveis acima dos 70 °C.

## 4.2. Avaliação do desempenho das placas

Para se projetar o dispositivo de testes, foi necessário averiguar as variáveis que se pretendiam monitorizar e quais as que seriam possíveis e úteis de controlar. Considerando que todos os processadores disponíveis no mercado vêm associados a um TDP, definiu-se a potência dissipada como principal parâmetro para avaliar o desempenho das placas, definida pela equação (1).

$$q = \dot{m} \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot C_p \quad (1)$$

Na equação (1),  $\dot{m}$  representa o caudal mássico,  $(T_{out} - T_{in})$  é a diferença de temperatura do fluido antes da entrada na zona de teste (placa texturizada) e depois da mesma e  $C_p$  é a capacidade térmica específica do fluido calculada por interpolação dos valores tabelados [33] para a temperatura de  $\Delta T_{ml}$ .

É também possível calcular a potência dissipada a partir da equação (2), caso o valor do coeficiente de transferência de calor global  $U$  seja conhecido:

$$q = U \cdot A_{Base} \cdot \Delta T_{ml} \quad (2)$$

Em que  $\Delta T_{ml}$  representa a diferença média logarítmica entre a temperatura da água à entrada da placa, à saída da placa equacionando a temperatura da própria placa,  $A_{Base}$  refere-se a toda a área da placa em contacto com o bloco de aquecimento e  $U$  ao coeficiente de transferência de calor global.

No caso em estudo não se sabe à partida o coeficiente de transferência de calor global  $U$ , mas é possível calcular a potência dissipada através da equação 1. Com a determinação dessa variável, rearranjou-se a equação 2 em ordem a  $U$ , obtendo:

$$U = \frac{q}{\Delta T_{ml} \cdot A_{Base}} \quad (3)$$

Usando para o cálculo de  $\Delta T_{ml}$ :

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4)$$

Na equação (4),  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  representam a diferença de temperatura entre a superfície texturizada e o fluido à entrada e à saída da placa respetivamente. Salienta-se neste ponto, que o termopar usado nas medições da temperatura da superfície texturizada, foi instalado na parede lateral da placa, com a ponta de medição do termopar coincidente com base das alhetas (3 mm de altura em relação à base da placa). Isto significa que os cálculos do coeficiente de transferência de calor global, não contabilizam a componente de condução de calor no alumínio, acima da ponta do termopar.

É importante salientar que o rendimento do grupo alhetado é superior a 99% de acordo com o trabalho desenvolvido por Dupuis [34], no qual se utilizou uma geometria de alhetas similar às desenvolvidas no presente trabalho. Este valor deve-se ao rácio elevado entre a área secção transversal da placa por altura das alhetas, que faz com que a eficiência de uma alheta tome valores perto da unidade.

Para o cálculo do número de Reynolds,  $Re$ , na superfície texturizada, usou-se a equação:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (5)$$

Na equação 5,  $\rho$  representa a massa volúmica,  $v$  é a velocidade média do escoamento,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico e  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica. A equação 5 é igual à equação usada no

cálculo de  $Re$  em escoamentos internos de secção circular, com o detalhe de se usar o diâmetro hidráulico, em vez do diâmetro de uma circunferência, pois a secção do escoamento não é circular.

Assim sendo, calculou-se o diâmetro hidráulico recorrendo à seguinte equação:

$$D_h = \frac{4 * A_{secção}}{P_{secção}} \quad (6)$$

Na equação 6,  $A_{secção}$  refere-se à área da secção perpendicular ao escoamento e  $P_{secção}$ , é o respetivo perímetro da secção do escoamento.

A resistência térmica das placas,  $Rt$  foi calculada através da equação:

$$Rt = \frac{\Delta T_{ml}}{q} \quad (7)$$

### 4.3. Plano e procedimento dos testes

Considerando as restrições verificadas, relativas à resistência de cartucho, foram realizados três testes por placa e três testes sem placa, definindo que a temperatura de funcionamento da resistência seria de 70 °C, o caudal volúmico de aproximadamente 1 L/min e o tempo de teste de 15 minutos para todos os testes.

Selecionou-se a temperatura de 70 °C para a resistência, sendo esta a temperatura mais elevada para a qual a resistência apresenta um comportamento estável.

Utilizou-se um caudal volúmico de 1L/min, baixo quando comparado ao caudal de sistemas de arrefecimento de processadores, com caudais normalmente compreendidos entre os 4 L/min e os 13 L/min. Este caudal baixo foi escolhido de forma a maximizar a diferença entre as temperaturas da água de entrada e de saída, facilitando a comparação entre as placas.

Relativamente ao procedimento, é apresentada de seguida, uma lista de passos seguidos para a realização de um teste:

1. Instalar a placa texturizada no dispositivo de testes, colocando a manta de carbono entre a face lisa da placa texturizada e o bloco de aquecimento;

2. Inserir tampa no topo da peça de silicone e apertar com os grampos de fuso entre o vidro e o bloco;
3. Definir o nome do teste, tempo de teste e temperatura pretendida para a resistência de cartucho no código do programa de aquisição de dados;
4. Correr o código;
5. Ligar a água e regular o seu caudal através do seu gráfico;
6. Ligar a resistência de cartucho e aguardar até que a sua temperatura apresente um comportamento estável;
7. Reiniciar o código;
8. Esperar até o código ser finalizado;
9. Definir o nome para o novo teste;
10. Correr novamente o código;
11. Executar etapas 8, 9 e 10 até completar todos os testes da placa;

Para trocar a placa, é recomendado deixar a água a correr sobre a mesma aproximadamente 5 minutos, desligando a resistência, para garantir que a placa se encontra a uma temperatura própria para ser manuseada.

Assim que concluídos todos os testes de uma placa, a mesma deve ser seca e armazenada, de forma a prevenir danos na sua superfície texturizada.

## 5. Testes e resultados

De acordo com o plano de testes apresentado no capítulo 4.3., as quatro placas foram comparadas em função da potência dissipada média dos três testes de cada placa. Da mesma forma, foram também executados três teste sem placa, que serviram de termo de comparação para os restantes.

Para isso são apresentados os parâmetros usados, as medições obtidas em cada teste e o valor das variáveis necessárias para o cálculo da potência dissipada e do coeficiente de transferência de calor por convecção e o resultado das mesmas. No anexo C, são apresentados todos os gráficos produzidos pelo programa de aquisição de dados, usados para monitorização durante as experiências, no entanto, a título ilustrativo, é apresentado de seguida na Figura 43 até à Figura 47, o conjunto de gráficos gerados ao longo de um teste, correspondendo respetivamente ao caudal volúmico, à temperatura na superfície lateral da placa texturada, à temperatura da resistência de cartuxo e o estado da mesma (se está ligada ou desligada), a temperatura da água de entrada e de saída e por fim, a diferença entre estas duas últimas.

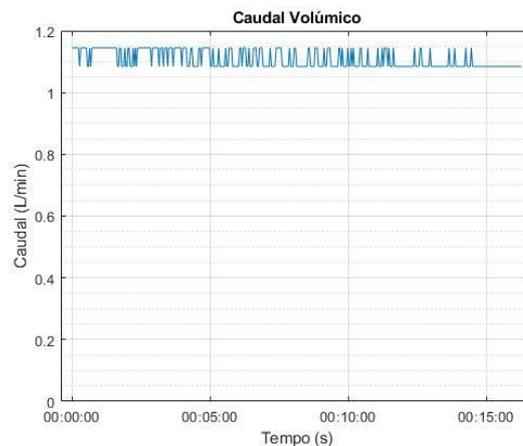


Figura 43 - Monitorização do caudal volúmico

Este gráfico serviu, não só para monitorizar o caudal ao longo dos testes, como também para ajudar na regulação da torneira, uma vez que essa regulação era manual.

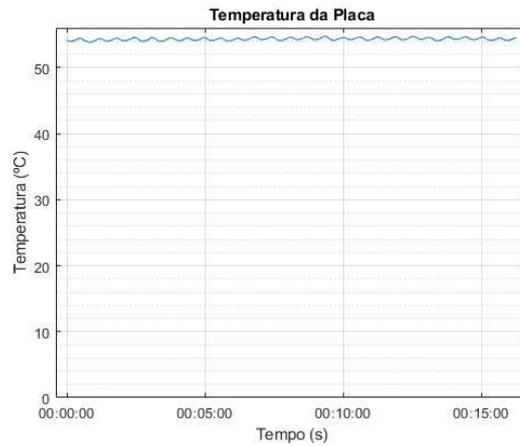


Figura 45 - Temperatura da placa

Este gráfico serviu para monitorizar a temperatura da placa ao longo dos testes, verificando se por algum motivo havia variações rápidas da temperatura, que seriam sinónimo de funcionamento impróprio do dispositivo.

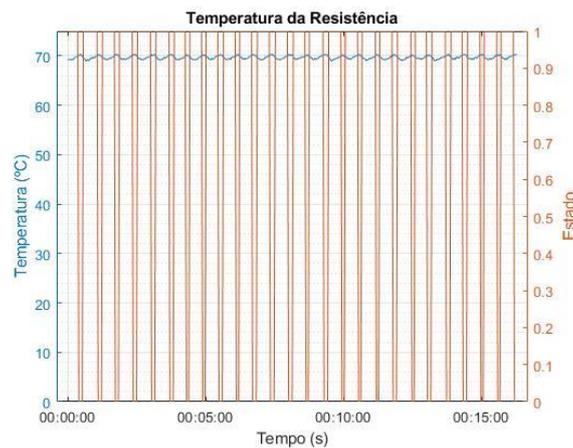


Figura 44 - Temperatura e estado da resistência de cartucho

Tal como com o gráfico anterior, também este foi usado não só para monitorizar os valores adquiridos, mas também como verificação do bom funcionamento do dispositivo de testes.

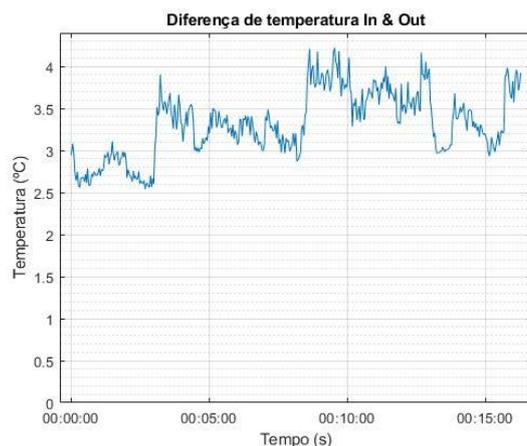


Figura 46 - Diferença entre a temperatura da água da entrada e de saída

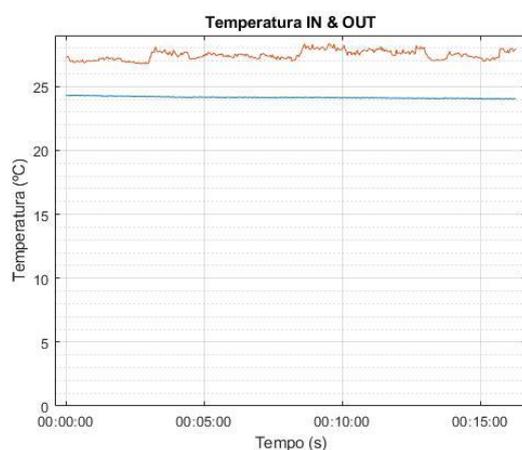


Figura 47 - Temperatura da água de entrada (azul) e da água de saída (laranja)

O gráfico apresentado na Figura 46, apresentava a diferença entre a temperatura da água de entrada e de saída, de modo ser possível avaliar durante os testes, de uma forma superficial, a performance da placa e gráfico apresentado na Figura 47, apresentava as medições efetuadas pelos termopares na água à entrada e à saída da placa, mostrando o aspeto global do teste ao longo do tempo.

Na Tabelas 5, são apresentados os parâmetros de teste médios para as quatro placas. Utilizam-se os parâmetros de teste médios, pois embora fossem definidos e iguais para todas as placas em todos os testes, verificaram-se algumas diferenças nos mesmos entre testes.

Tabela 5 - Média dos parâmetros de teste das placas

	<b>Média dos parâmetros de teste</b>				
	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>	<b>Placa 3</b>	<b>Placa 4</b>	<b>Sem placa</b>
<b>Temperatura da resistência (°C)</b>			70		
<b>Tempo de teste (min:s)</b>	15:52	15:48	15:58	16:15	15:41
<b>Caudal volúmico (L/min)</b>	1,0801	1,0715	1,0810	1,0894	1,0466
<b>Caudal mássico (g/s)</b>	18	17,9	18	18,2	17,4
<b>Temperatura Ambiente (°C)</b>	22,4	22,4	22,5	22,5	22,1
<b>Altura do escoamento sobre a placa (mm)</b>			2		
<b>Largura da placa (mm)</b>			40		
<b>Comprimento da placa (mm)</b>			40		
<b>Velocidade média do escoamento sobre a placa (cm/s)</b>	17,3	18,4	19,2	19,7	6,5
<b>Número de Reynolds</b>	314	375	433	468	840
<b>Número de Reynolds crítico</b>			2300		
<b>Tipo de escoamento</b>	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar

Pode-se verificar que a variação máxima entre os valores dos caudais volúmicos não ultrapassara os 18 mL/min e conseqüentemente as 0,3 g/s para os caudais mássicos.

A variação máxima do tempo de testes foi de aproximadamente 34 segundos, o que não é significativo para os testes, considerando que o tempo de teste é suficientemente longo para mitigar esta diferença.

Verificados os parâmetros, são de seguida apresentados na Tabela 6, os valores médios das medições dos três testes.

Tabela 6 - Média das medições efetuadas

	<b>Média das medições efetuadas</b>				
	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>	<b>Placa 3</b>	<b>Placa 4</b>	<b>Sem placa</b>
<b>Média da resistência (°C)</b>	69,65	69,65	69,58	69,72	70,18
<b>Média da placa texturizada (°C)</b>	53,69	54,92	55,84	54,49	62,13
<b>Média T<sub>in</sub> (°C)</b>	23,97	24,03	24,07	24,09	23,10
<b>Média T<sub>out</sub> (°C)</b>	26,19	26,80	26,56	27,42	24,15
<b>Média T<sub>out</sub> – T<sub>in</sub> (°C)</b>	2,22	2,77	2,49	3,33	1,05

Começando por analisar o valor médio da temperatura da resistência em todas as placas, verifica-se que a diferença máxima é aproximadamente 0,13 °C, sendo uma diferença aceitável.

Da mesma forma, as variações da temperatura da água de entrada (T<sub>in</sub>), não apresentaram diferenças superiores a 0,125 °C.

Passando agora para a análise da diferença da temperatura entre a água de saída (T<sub>out</sub>) e a água de entrada, é possível verificar que a placa 4 foi a placa na qual se obteve maior diferença de temperaturas, sendo a diferença entre a água de saída e de entrada, em média de 3,3°C. A placa com pior desempenho foi a placa 1, com uma diferença de temperatura de 2,2 °C entre a água de saída e de entrada.

São apresentados na Tabela 7 os valores da potência dissipada média de cada placa, calculados de acordo com a equação 1, o seu coeficiente de transferência de calor global calculado de acordo com a equação 3, e as variáveis calculadas para obtenção destes valores. São também apresentadas estas mesmas médias das variáveis para os ensaios realizados sem placas, que são posteriormente usados para fazer a comparação com os valores das placas texturadas produzidas.

Tabela 7 - Média das variáveis determinadas

	<b>Média das variáveis determinadas</b>				
	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>	<b>Placa 3</b>	<b>Placa 4</b>	<b>Sem placa</b>
<b>Potência dissipada (W)</b>	167,6	206,1	187,8	252,8	77
<b>Coefficiente de transferência de calor global (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	3671	4371	3847	5511	1252
<b>Área da base (cm<sup>2</sup>)</b>	16	16	16	16	16
<b>Área do escoamento (cm<sup>2</sup>)</b>	105	91	81	71	16
<b>Diferença média logarítmica da temperatura (K)</b>	28,6	29,5	30,5	28,7	38,5
<b>Resistência térmica (°C/W)</b>	0,17	0,14	0,16	0,11	0,5

Como é possível verificar, o valor máximo da potência dissipada por uma placa foi conseguido na Placa 4 obtendo-se uma potência dissipada média de 252,8 W, um valor 3,3 vezes superior ao valor médio dissipado nos testes sem placa. O menor valor de potência média dissipada obtido por uma placa, foi registado na Placa 1, com um valor de 167,4 W, que, ainda assim é 2,2 vezes superior ao valor da potência dissipada média dos testes sem placa.

Os baixos valores de dissipação de calor verificados para os testes sem placa, devem-se ao aumento da área de secção, comparativamente aos testes com placa. Este aumento da área de secção, faz com que a velocidade média do escoamento seja menor e consequentemente tenha um coeficiente de transferência de calor muito menor.

Verificou-se que o valor da potência dissipada aumentou na Placa 2, tomando valores superiores à placa 1 e 3. Uma possível explicação, embora seja necessária uma maior investigação do assunto seria atribuir este aumento ao facto de a superfície ser hidrofóbica, que faz com que exista algum grau de slip na superfície, ou seja, que a condição de não escorregamento não se cumpra estritamente. Este fenómeno faria com que a velocidade média junto à parede fosse mais elevada, aumentando o coeficiente de transferência de calor por convecção. Porém é necessário realizar mais testes para confirmar estes resultados.

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo, são tiradas algumas conclusões e são sugeridas propostas de trabalho a realizar no futuro, que complementaríamos este.

### 6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento e teste de placas texturizadas para o arrefecimento líquido de componentes eletrônicos, produzidas através da remoção de material por uma máquina laser Nd:YVO<sub>4</sub>, com o objetivo de responder às necessidades mais severas de dissipação de calor em processadores de computadores pessoais.

Foi feito um levantamento das tecnologias existentes no mercado de arrefecimento de processadores assim como dos processos de fabrico utilizados para produzir placas texturizadas, onde se verificou que os sistemas de arrefecimento a água estão entre os sistemas mais comuns, juntamente aos de arrefecimento a ar, mas que apresentam melhores resultados, sendo por isso o fluido selecionado. Verificou-se também que os processos de fabrico para produzir placas texturizadas não conseguiam obter geometrias de alheta tão reduzidas como as obtidas por laser com grande facilidade.

Dessa forma, utilizando a máquina de corte laser, produziram-se quarenta amostras preliminares, fazendo-se variar os seus parâmetros de corte e concluindo que os que têm maior influência sobre a superfície das alhetas são o número de passagens e a potência.

Foram testados os limites geométricos das alhetas fazendo variar a distância entre linhas de corte, reduzindo dessa forma as dimensões das alhetas, concluindo-se através da análise à superfície das placas produzidas que as suas alhetas conservavam a qualidade da superfície e a sua definição geométrica.

Foi também projetado e construído de raiz, um dispositivo capaz de testar as placas, auxiliado por um programa de aquisição de dados, para efetuar medições de temperatura e caudal dos testes, assim como um sistema de controlo da resistência de aquecimento.

Foram testadas quatro placas com diferente dimensão de alhetas, mantendo o espaçamento entre as alhetas e a sua altura constante.

As texturas de melhor desempenho revelaram ser as texturas com maior dimensão de alheta, relativas à placa 4, com uma aresta de topo de 1200 µm, uma aresta de base de 1750 µm e uma altura de 2000 µm. Possivelmente, o aumento da área do grupo alhetado fez com que a condição de não

escorregamento fosse exponenciada, fazendo com que a velocidade média do escoamento junto à superfície texturizada fosse mais baixa, o que se traduz numa redução do coeficiente de transferência de calor por convecção.

Feitas estas considerações, a placa 4 foi a placa que apresentou melhor desempenho na dissipação de calor, com uma potência dissipada de 253 W, um coeficiente de transferência de calor global de 5511 W/m<sup>2</sup>.K e uma resistência térmica de 0,11 °C/W. Esta placa apresenta uma aresta de topo de 1200 µm, uma aresta de base de 1700 µm e uma altura de 2000 µm.

Foi produzida utilizando os seguintes parâmetros de corte:

- Potência: 100%
- Velocidade de corte: 1500 mm/s
- Frequência: 50 kHz
- Número de passagens: 16

Considerando a potência máxima dissipada de um CPU anunciada pelos fabricantes neste momento, 280 W, e considerando esse valor como o limite inferior do alto desempenho, pode-se assumir que esta seja uma placa de alto desempenho, pois embora o valor máximo de potência dissipada na placa não tenha atingido o valor a partir do qual consideramos uma placa de alto desempenho, não o fez por uma margem inferior a 10% do valor. Aliando isso ao facto de os testes terem sido feitos a 70 °C, comparativamente aos 90 a 100 °C usados pelos fabricantes, e tendo em conta que o caudal dos testes foi pelo menos três vezes inferior aos caudais utilizados nos dissipadores existentes no mercado, podemos afirmar com algum grau de segurança que a placa 4 é de alta performance.

Não é clara a razão pela qual a placa com alhetas de maior dimensão (placa 4) apresenta o melhor desempenho e a placa com alhetas de menor dimensão (placa 1) apresenta o pior desempenho. Seria de esperar que a maior área de superfície da placa 1 apresentasse uma vantagem relativamente à placa 4, mas tal não se verificou. A escala reduzida das texturas poderá fazer com que este aumento de área não tenha efeitos práticos semelhantes aos que se verificam a uma escala superior, de acordo com a teoria das alhetas. De facto, estamos em regime laminar e é sabido da teoria da mecânica dos fluidos que a rugosidade superficial não é muito relevante no que toca a perdas de carga quando se trata de escoamentos laminares ou, no caso de escoamento turbulentos, quando a rugosidade superficial está confinada à subcamada laminar. Como o aumento de perda de carga está frequentemente associada ao aumento da convecção, é possível que o aumento da área de superfície por texturização também não tenha uma influência relevante a escalas reduzidas e regimes localmente laminares. Resta saber porque é que a diminuição do número de texturas por unidade de área não foi prejudicial, mas foi inclusivamente

benéfica. Os rasgos entre texturas tinham sensivelmente a mesma dimensão (largura, profundidade) pelo que hidraulicamente não se esperaria uma diferença significativa nas velocidades de escoamento dentro desses rasgos entre a placa 1 e a placa 4 e, portanto, seria de esperar coeficientes de convecção semelhantes para ambos os casos. A realização de simulações CFD poderia ajudar a compreender melhor o efeito da geometria de textura na convecção, sendo possível que se descubra um distanciamento ótimo entre texturas que otimize este coeficiente. No entanto, remete-se este estudo para trabalhos futuros.

## **6.2. Trabalhos futuros**

No desenvolvimento da presente dissertação, surgiram certos detalhes que não foram abordados, mas que seriam interessantes de explorar, nomeadamente:

- o efeito da variação da geometria das alhetas e da espessura da placa texturizada no processo de dissipação de calor;
- o aprimoramento do dispositivo de teste de dissipação de calor, capaz de suportar solicitações mais severas, tanto de caudal como de temperatura, posicionando os sensores de medição de temperatura em locais mais convenientes e usando mais destes últimos, de forma que fosse possível criar um mapa de temperaturas da placa;
- realizar estudo para as mesmas placas, usando diferentes métodos de arrefecimento, como por exemplo a mudança de fase e fazer o estudo comparativo relativamente aos testes realizados;
- comparação dos resultados com estudos CFD, para se compreender melhor os fenómenos em jogo;
- estudo de diversas orientações das texturas relativamente ao escoamento, usando amostras circulares para o efeito;
- comparação dos resultados obtidos, com placa lisa;
- estudar o arrefecimento de placas texturizadas, em condições de temperatura transientes;

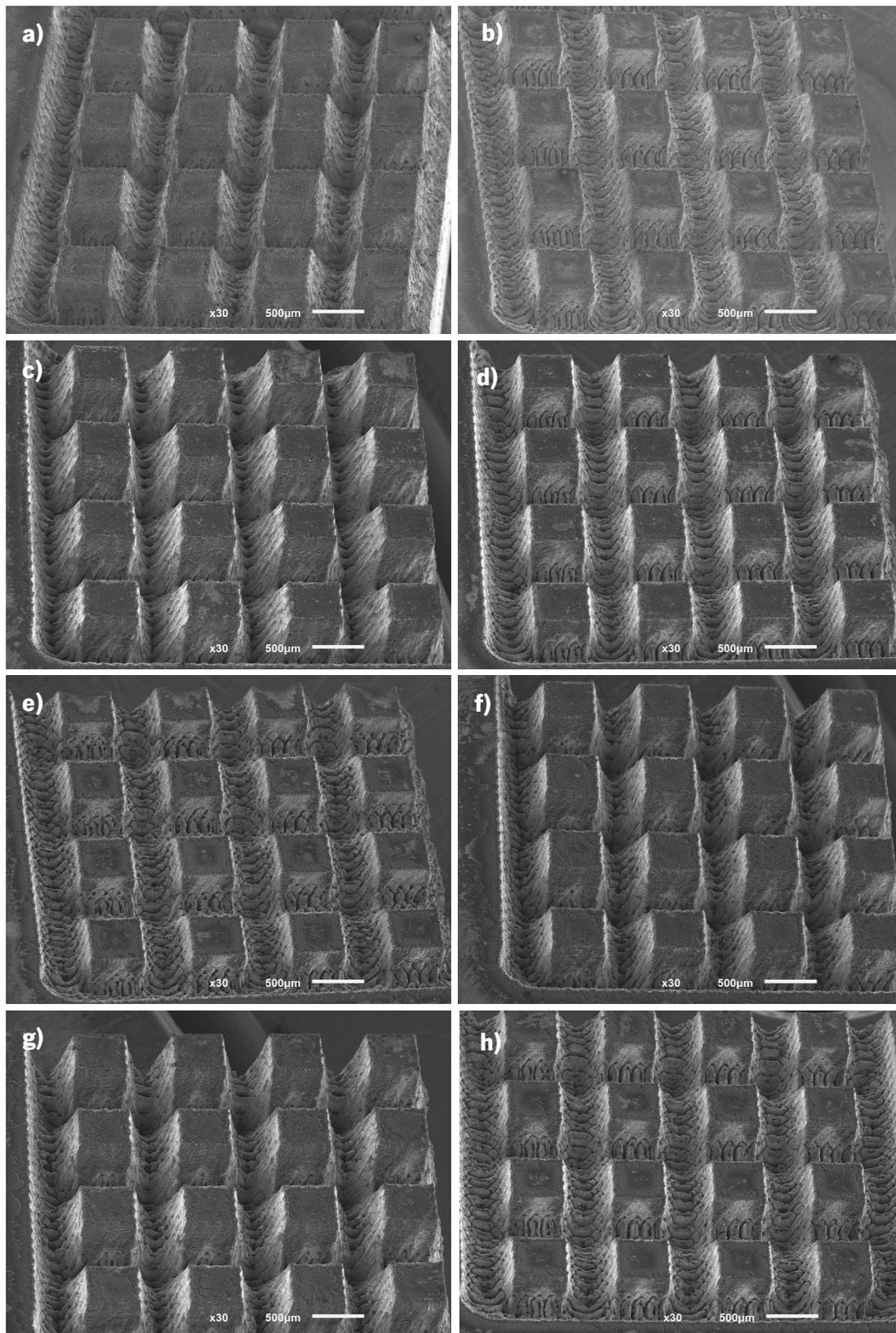
## Referências

- [1] “<https://www.techpowerup.com>,” 6 Janeiro 2021. [Online]. Available: <https://www.techpowerup.com/cpu-specs/?sort=name>.
- [2] T. Dbouk, “A new technology for CPU chip cooling by concentrated suspension flow of non-colloidal particles,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 146, pp. 664-673, 2019.
- [3] HWBot, “hwbot.org,” [Online]. Available: [https://hwbot.org/benchmark/cpu\\_frequency/halloffame](https://hwbot.org/benchmark/cpu_frequency/halloffame). [Acedido em 28 junho 2021].
- [4] M. Z. M. Hanafi, F. S. Ismail e R. Rosli, “Radial Plate Fins Heat Sink Model Design and optimization,” em *10th Asian Control Conference (ASCC)*, 2015.
- [5] “hp.com,” 9 novembro 2020. [Online]. Available: <https://www.hp.com/sg-en/shop/tech-takes/post/10-reasons-use-liquid-cooling-vs-air-cooling-gaming-pc>. [Acedido em 10 dezembro 2021].
- [6] L. Lu, Z. Zhang, Y. Guan e H. Zheng, “Enhancement of Heat Dissipation by Laser Micro Structuring for LED Module,” *Polymers*, 2018.
- [7] H. Mujtaba, “wccfttech.com,” 22 Julho 2018. [Online]. Available: <https://wccfttech.com/msi-mocks-asus-motherboard-vrm-heatsink-design/>. [Acedido em 5 Março 2021].
- [8] B. Dehoff, C.-S. Wang e D. Fast, “Thermal Optimization of a Radial Folded Fin Heat Sink for Desktop Computer Applications,” em *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006. IThERM '06*.
- [9] “Corsair,” [Online]. Available: <https://help.corsair.com/hc/en-us/articles/360049358271-How-should-I-mount-the-radiator-of-my-AIO-cooler->. [Acedido em 27 junho 2021].
- [10] H. S. Shamsuddin e e. al., “Effects of surfactant and nanofluid on the performance and optimization of a microchannel heat sink,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 175, 2021.
- [11] A. Haywood e e. al., “Investigating a Relationship among CPU and System Temperatures, Thermal Power, and CPU Tasking Levels,” em *13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, San Diego, CA, USA, 2012.
- [12] 3M, “3m.com.pt,” [Online]. Available: [https://www.3m.com.pt/3M/pt\\_PT/novec-pt/como-utilizar/arrefecimento-imersao/](https://www.3m.com.pt/3M/pt_PT/novec-pt/como-utilizar/arrefecimento-imersao/). [Acedido em 2021 junho 28].

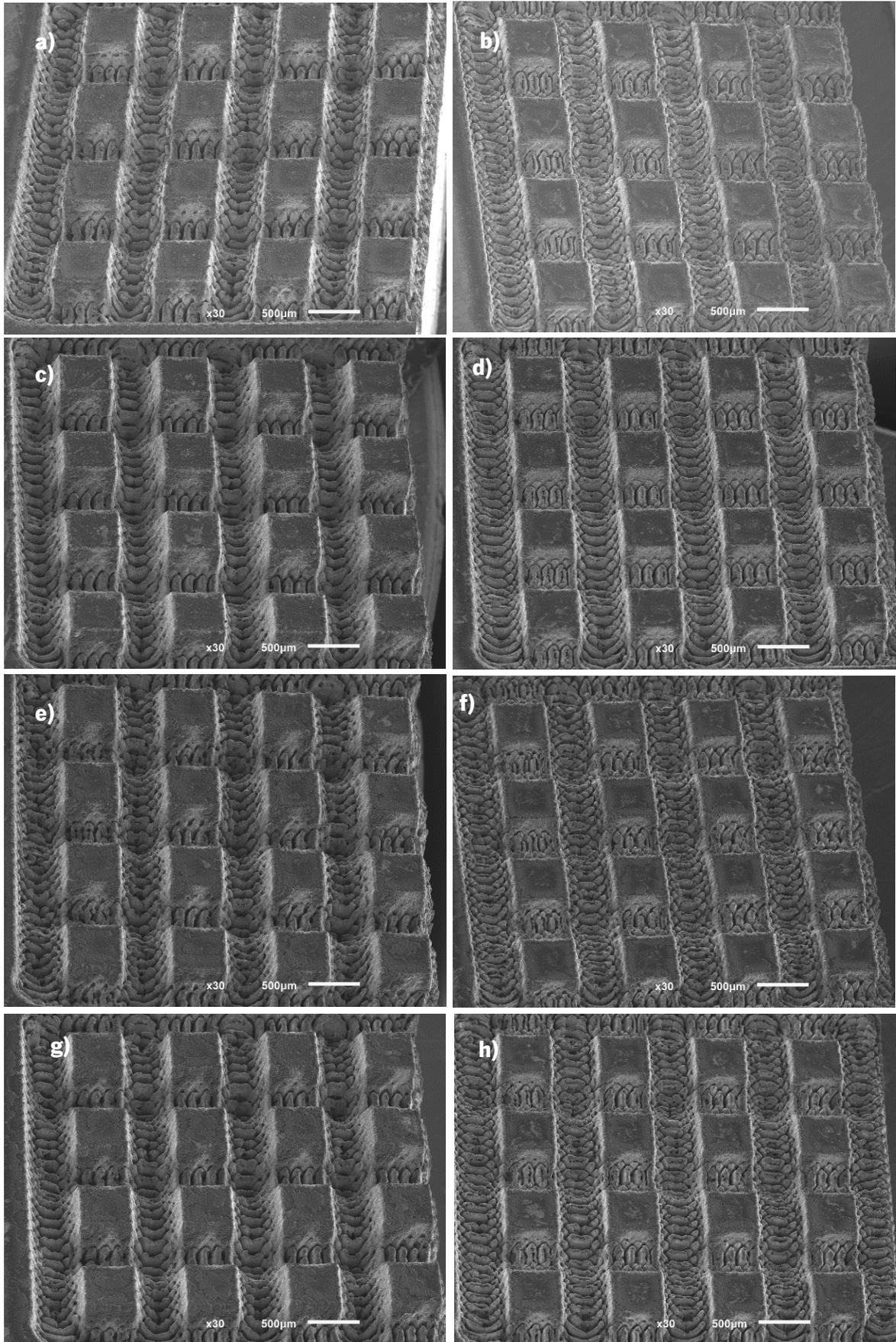
- [13] R. C. Chu, R. E. Simons, M. J. Ellsworth, R. R. Schmidt e V. Cozzolino, "Review of Cooling Technologies for Computer Products," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 4, dezembro 2004.
- [14] Y. Çengel, R. Turner e J. Cimbala, *Fundamentals Of Thermal-Fluid Sciences*, McGraw-Hill Education, 2016.
- [15] M. Matthews, "Overclockers.com," [Online]. Available: <https://www.overclockers.com/how-to-build-a-refrigerator-cpu-cooler/>. [Acedido em 30 junho 2021].
- [16] "<https://haluminium.com/>," [Online]. Available: <https://haluminium.com/Product/aluminum-extrusion-molding/>. [Acedido em 20 dezembro 2021].
- [17] "<https://www.iqsdirectory.com/>," [Online]. Available: <https://www.iqsdirectory.com/articles/forging/cold-forging.html>. [Acedido em 24 dezembro 2021].
- [18] "<https://www.byora.com/>," [Online]. Available: [https://www.byora.com/cold-forming/index.html?gclid=CjwKCAiAiKuOBhBQEiwAld\\_sK5B7Nh\\_aLOM7sv-gUaEt8lQN9YyBOO\\_of0L6QCywVLBDBzRIP772nBoCkCwQAvD\\_BwE](https://www.byora.com/cold-forming/index.html?gclid=CjwKCAiAiKuOBhBQEiwAld_sK5B7Nh_aLOM7sv-gUaEt8lQN9YyBOO_of0L6QCywVLBDBzRIP772nBoCkCwQAvD_BwE). [Acedido em 24 dezembro 2021].
- [19] W. Butler, G. Timelli, E. Battaglia e F. Bonollo, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [20] "<https://www.metalworkmasters.com/>," [Online]. Available: [https://www.metalworkmasters.com/cnc-machining/skiving-heat-sink/#Production\\_of\\_Skived\\_Heat\\_Sinks](https://www.metalworkmasters.com/cnc-machining/skiving-heat-sink/#Production_of_Skived_Heat_Sinks). [Acedido em 27 dezembro 2021].
- [21] "<https://www.finskiving.com/pt/>," [Online]. Available: <https://www.finskiving.com/pt/>. [Acedido em 26 dezembro 2021].
- [22] "<https://www.uti.edu/blog/>," [Online]. Available: <https://www.uti.edu/blog/cnc/milling>. [Acedido em 27 dezembro 2021].
- [23] "<https://www.cnclathing.com/>," [Online]. Available: <https://www.cnclathing.com/guide/cnc-milling-guide-cnc-milling-advantages-disadvantages-application-materials-and-definition>. [Acedido em 27 dezembro 2021].
- [24] "<https://www.laserax.com/>," [Online]. Available: <https://www.laserax.com/laser-texturing>. [Acedido em 26 dezembro 2021].

- [25] B. Grabas, "Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement\," *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 499-508, 12 June 2015.
- [26] S. Misyura, P. Strizhak, R. Volkov e V. Morozov, "The influence of the wall microtexture on functional properties and heat transfer," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 294, 2019.
- [27] V. Serdyukov, S. Starinskiy, I. Malakhov, A. Safonov e A. Surtaev, "Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 194, 2021.
- [28] "https://www.laserax.com," [Online]. Available: <https://www.laserax.com/blog/fiber-laser>. [Acedido em 14 dezembro 2021].
- [29] D. Tiab e E. C. Donaldson, *Petrophysics (Third Edition)*, 2012.
- [30] "ni.com," [Online]. Available: [https://www.ni.com/pdf/manuals/373466a\\_02.pdf](https://www.ni.com/pdf/manuals/373466a_02.pdf). [Acedido em 2021 julho 26].
- [31] "ni.com," [Online]. Available: <https://www.ni.com/pdf/manuals/374037b.pdf>. [Acedido em 2021 Julho 26].
- [32] "omega.com," [Online]. Available: <https://assets.omega.com/manuals/test-and-measurement-equipment/flow/positive-displacement-flow-meters/positive-displacement-flow-meters/M5426.pdf>. [Acedido em 2021 Julho 26].
- [33] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman e A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2016.
- [34] P. Dupuis, Y. Cormier, M. Fenech e B. Jodoin, "Heat transfer and flow structure characterization for pin fins produced by cold spray additive manufacturing," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 98, pp. 650-661, 2016.
- [35] "3photon.com," [Online]. Available: <https://3photon.com/product/ndyvo4-neodymium-doped-yttrium-vanadate/>. [Acedido em 12 dezembro 2021].

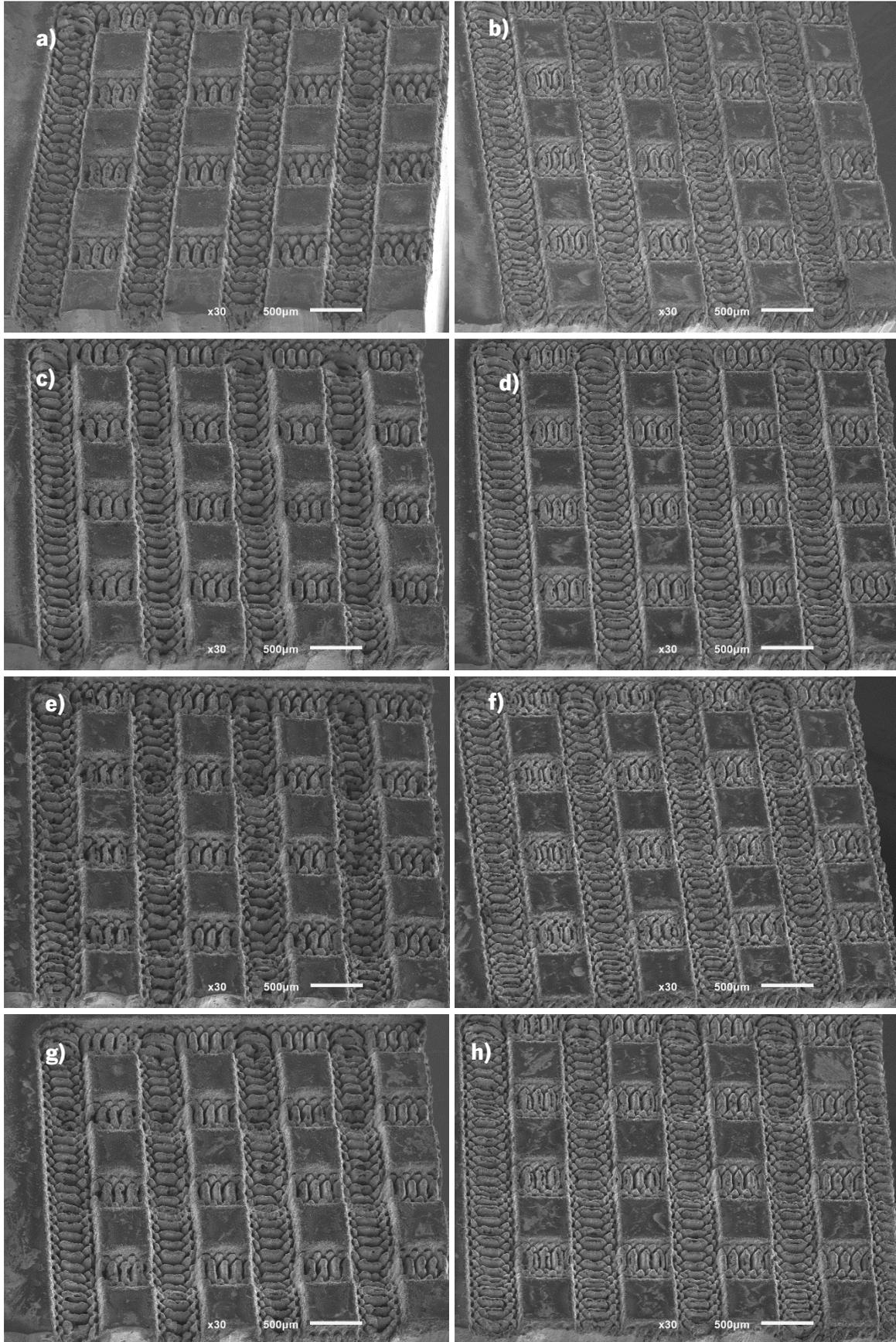
## Anexo A



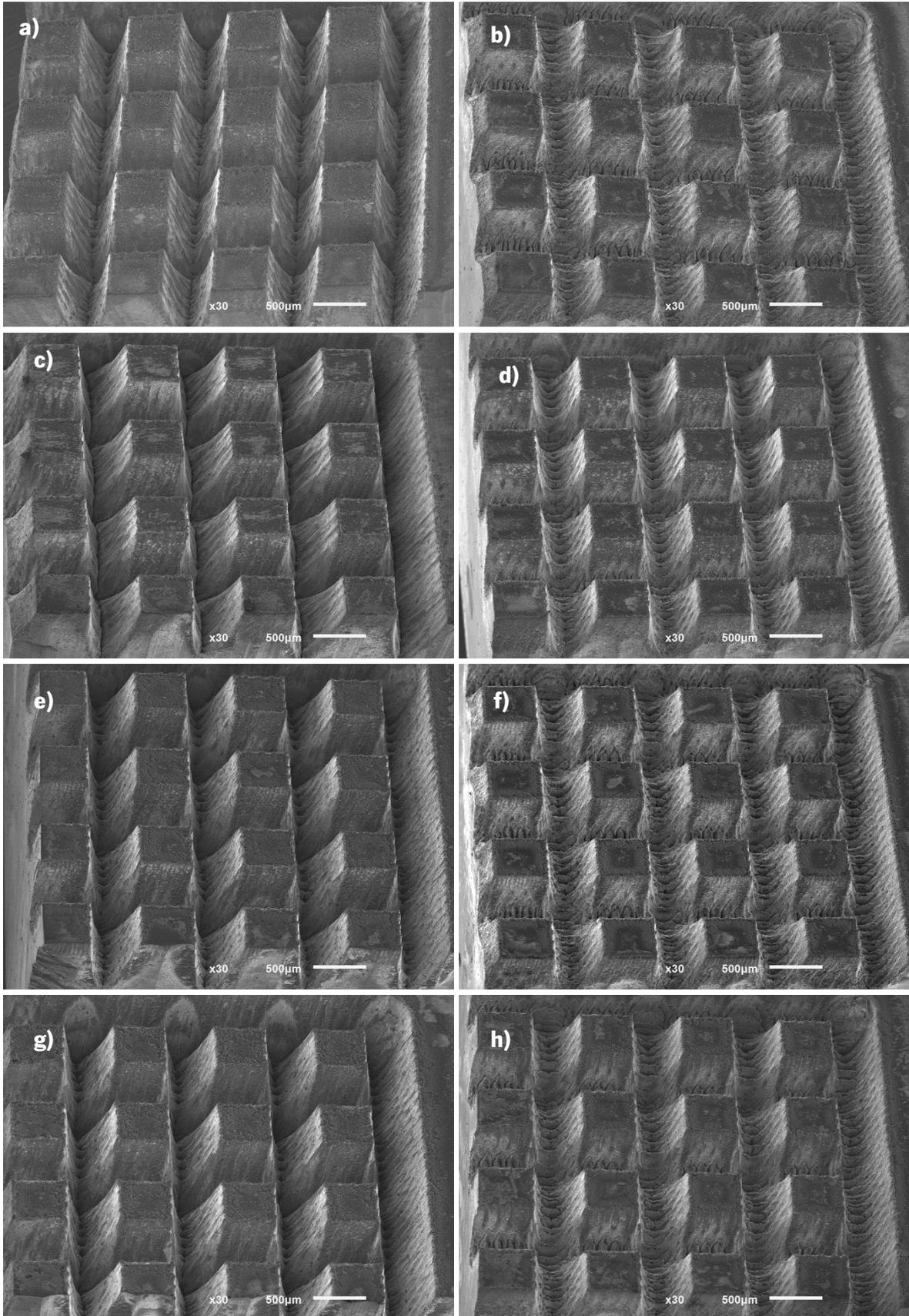
*Amostras com número de passagens = 1; a) amostra 1.1; b) amostra 2.1; c) amostra 3.1; d) amostra 4.1; e) amostra 5.1; f) amostra 6.1; g) amostra 7.1; h) amostra 8.1;*



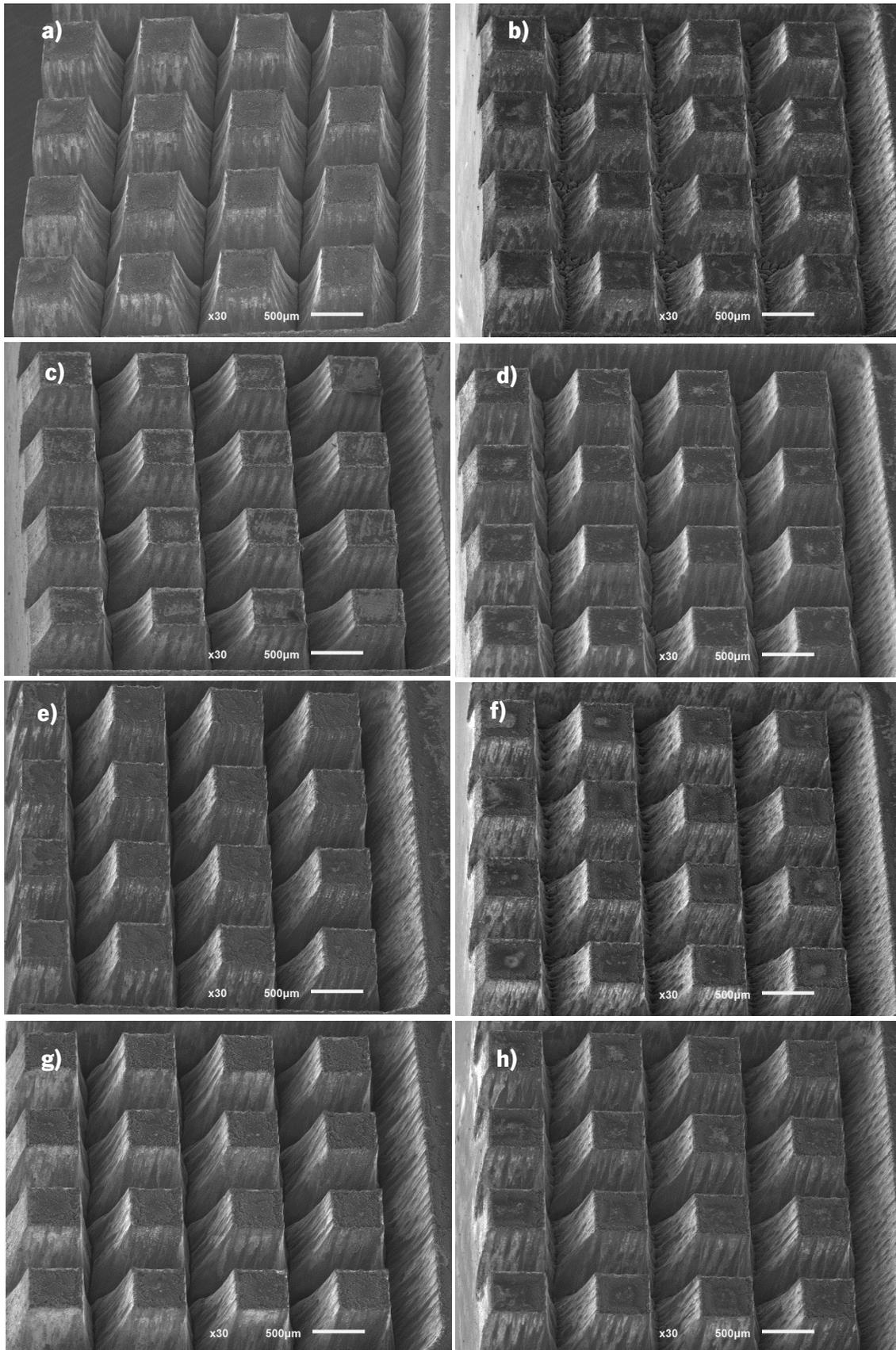
*Amostras com número de passagens = 2; a) amostra 1.2; b) amostra 2.2; c) amostra 3.2; d) amostra 4.2; e) amostra 5.2; f) amostra 6.2; g) amostra 7.2; h) amostra 8.2;*



*Amostras com número de passagens = 4; a) amostra 1.3; b) amostra 2.3; c) amostra 3.3; d) amostra 4.3; e) amostra 5.3; f) amostra 6.3; g) amostra 7.3; h) amostra 8.3;*

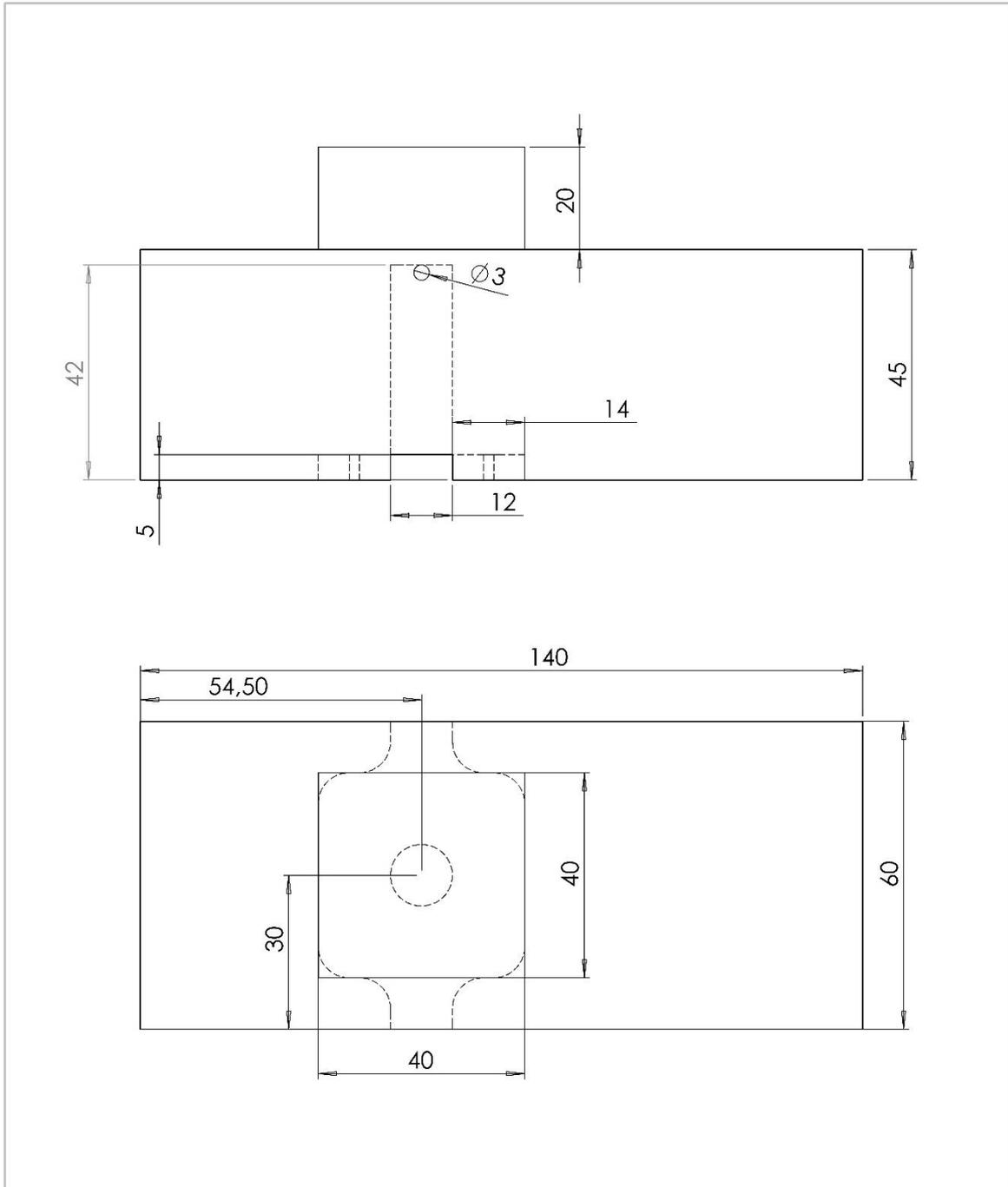


*Amostras com número de passagens = 8; a) amostra 1.4; b) amostra 2.4; c) amostra 3.4; d) amostra 4.4; e) amostra 5.4; f) amostra 6.4; g) amostra 7.4; h) amostra 8.4;*



*Amostras com número de passagens = 16; a) amostra 1.5; b) amostra 2.5; c) amostra 3.5; d) amostra 4.5; e) amostra 5.5; f) amostra 6.5; g) amostra 7.5; h) amostra 8.5;*

# Anexo B

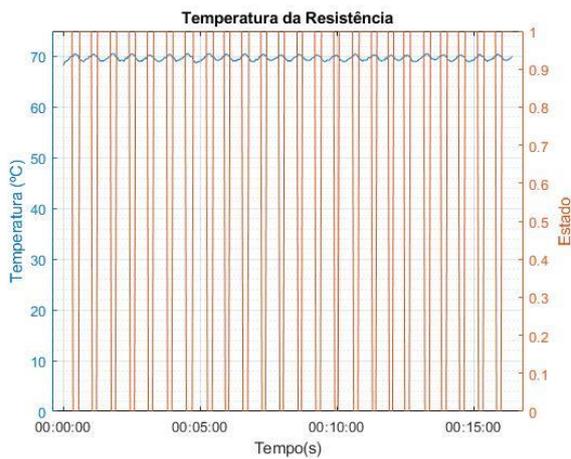
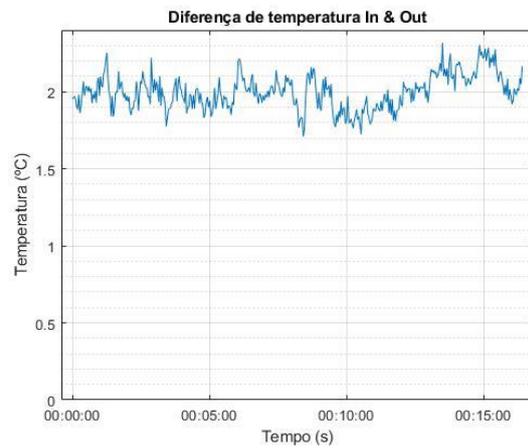
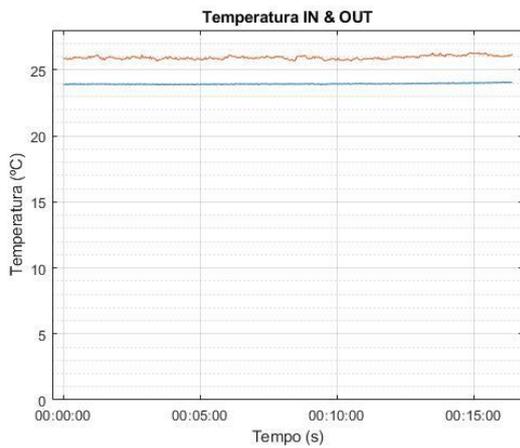
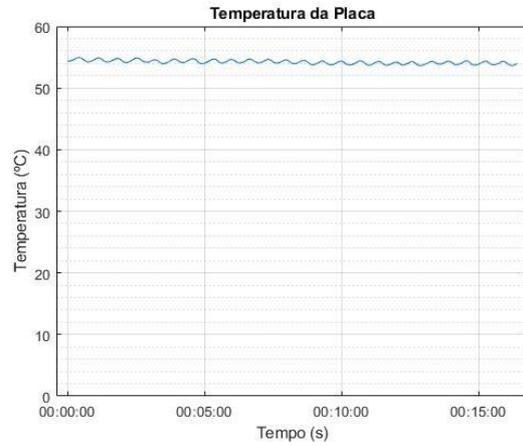
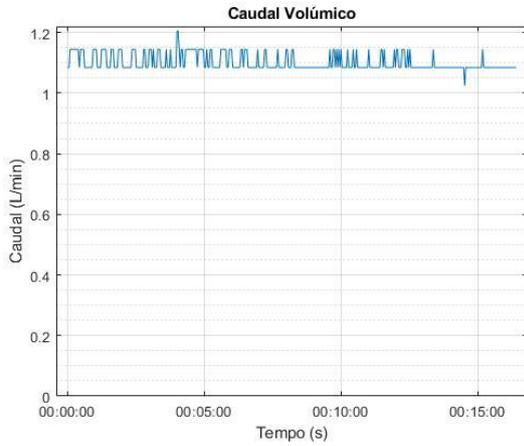


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		Don't change scale		REVISION	
DRAWN				SIGNATURE		DATE		TITLE: Bloco de Aquecimento			
CHKD											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.			
								A4			
						WEIGHT:		SCALE: 1:1			
								SHEET 1 OF 1			

Desenho do bloco de aquecimento

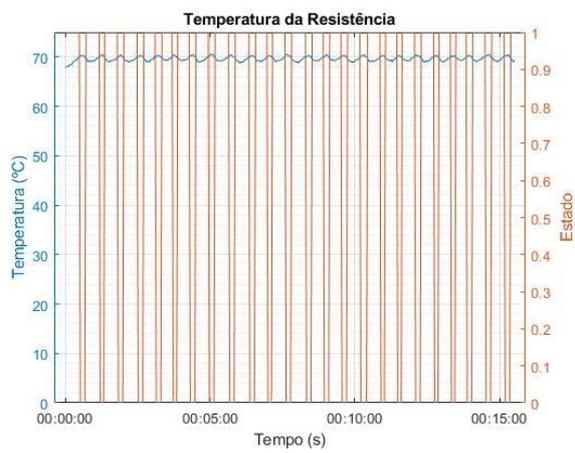
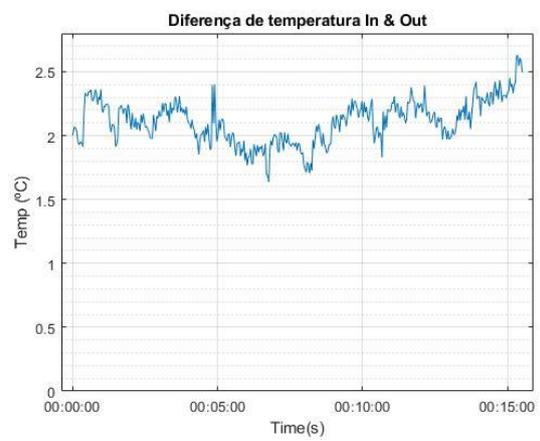
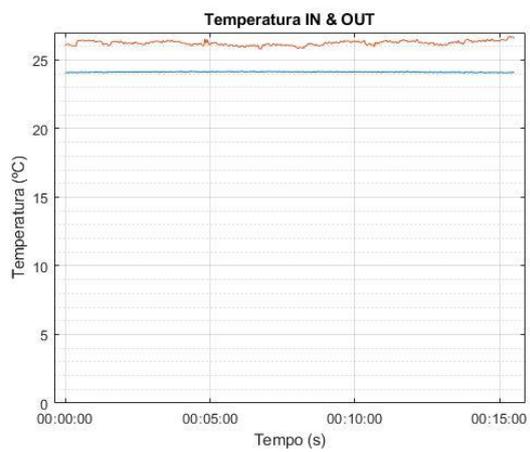
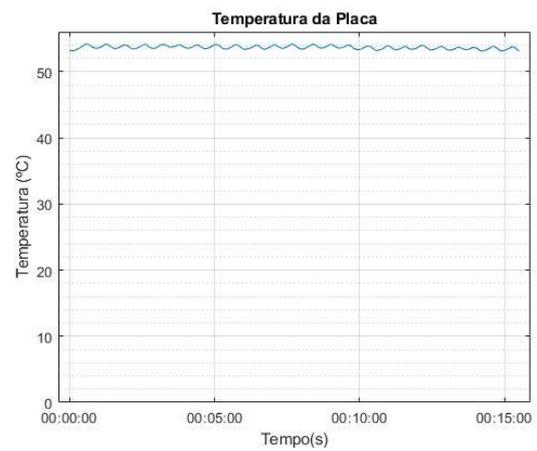
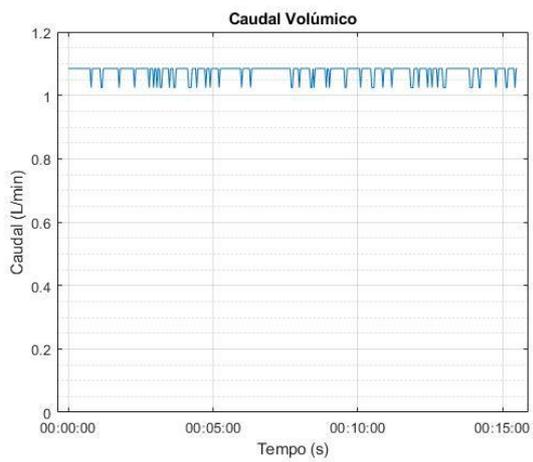
# Anexo C

## Placa 1: Teste 1



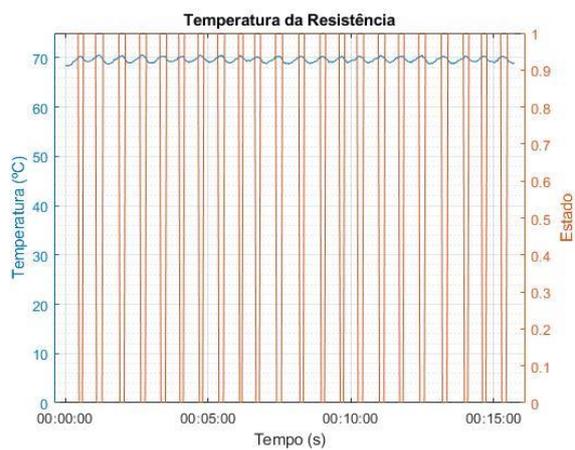
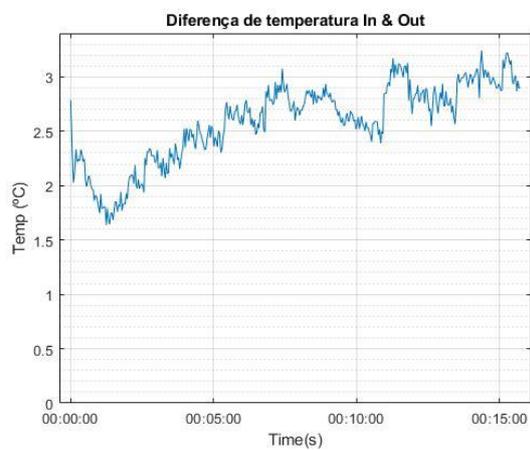
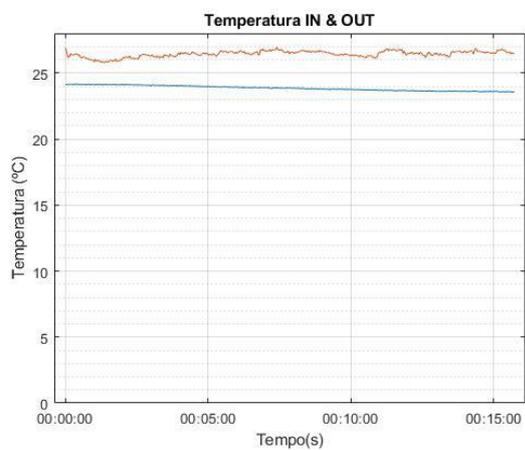
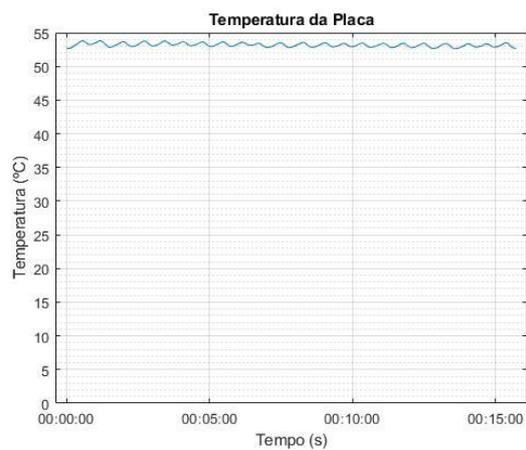
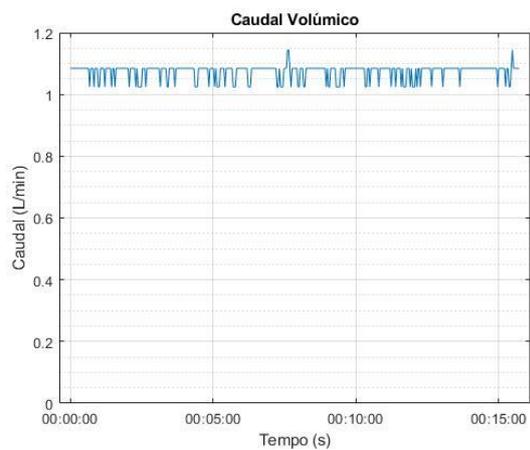
Monitorização do teste 1 da Placa 1

## Placa 1: Teste 2



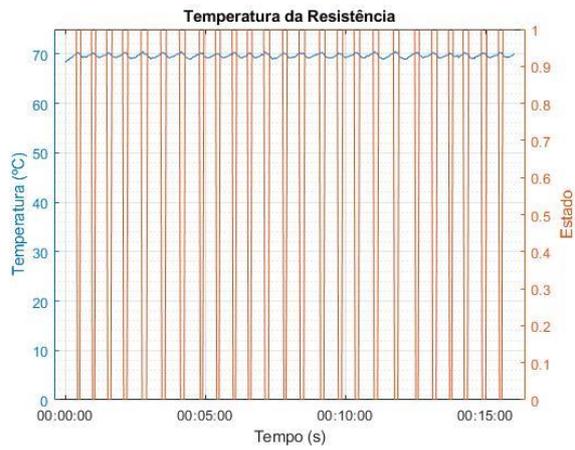
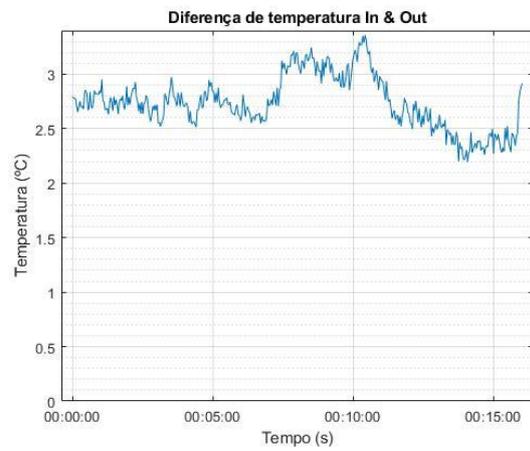
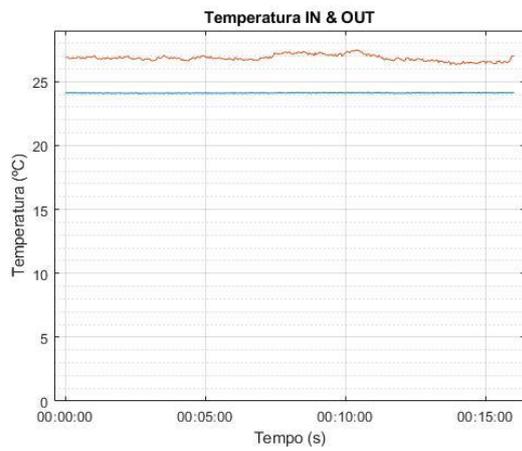
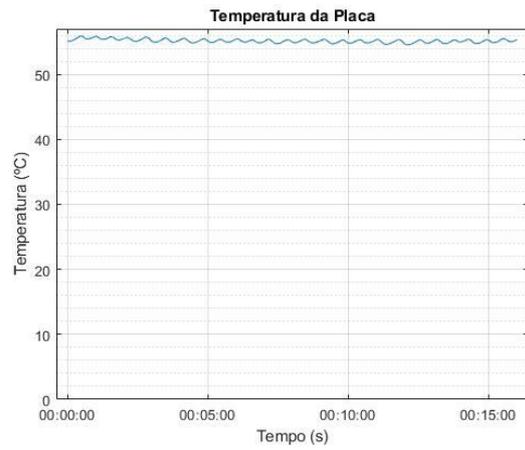
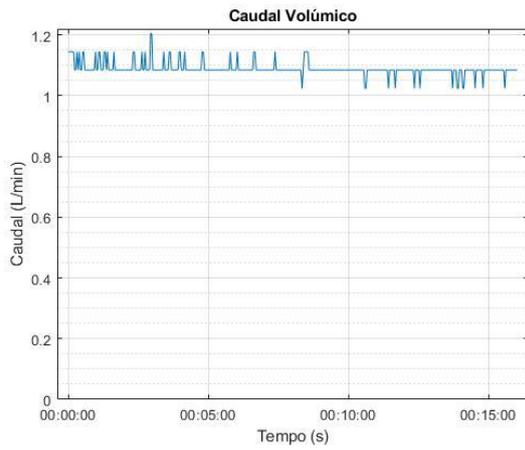
*Monitorização do teste 2 da Placa 1*

### Placa 1: Teste 3



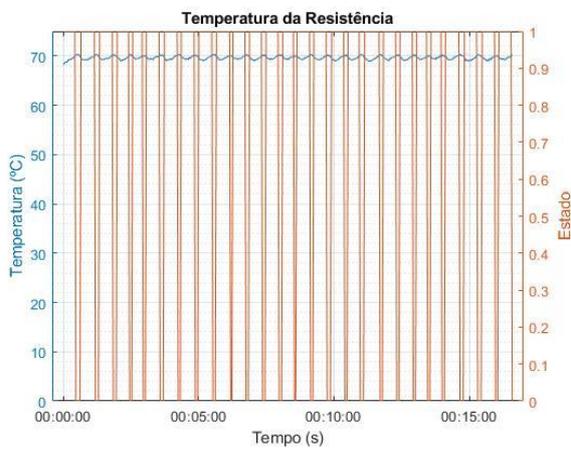
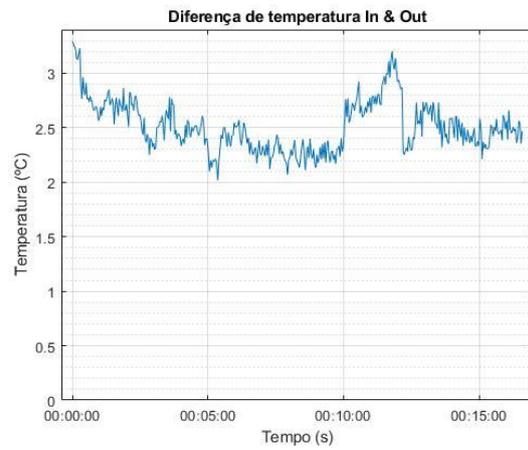
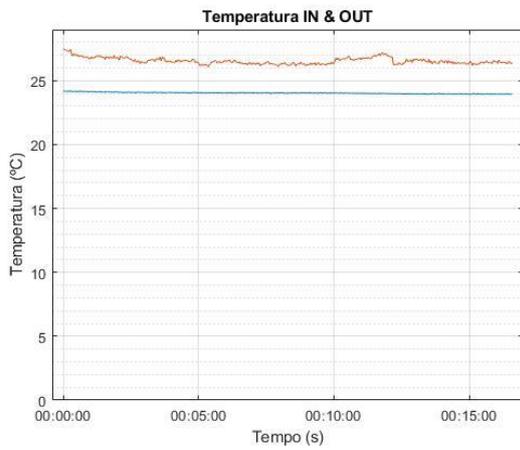
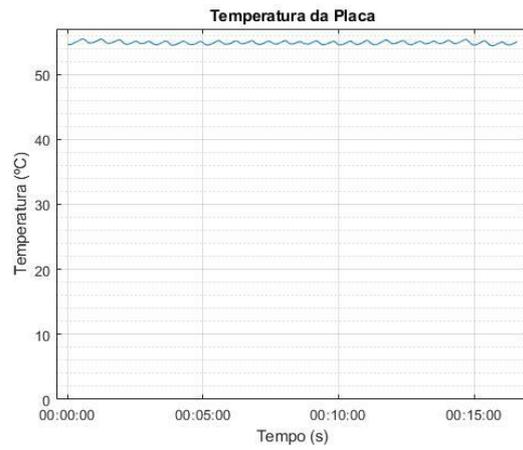
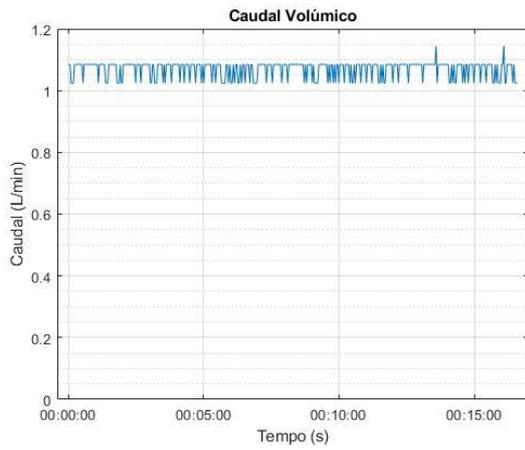
Monitorização do teste 3 da Placa 1

## Placa 2: Teste 1



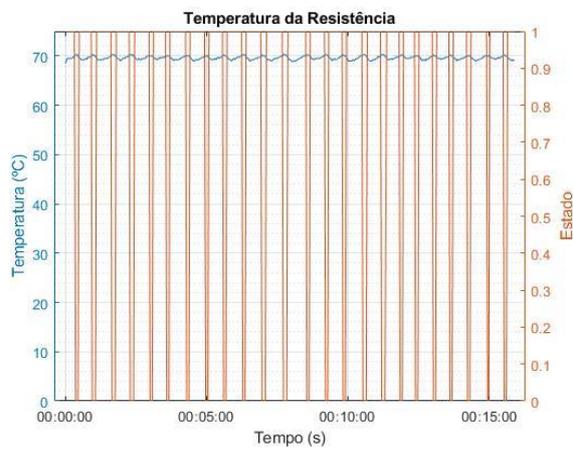
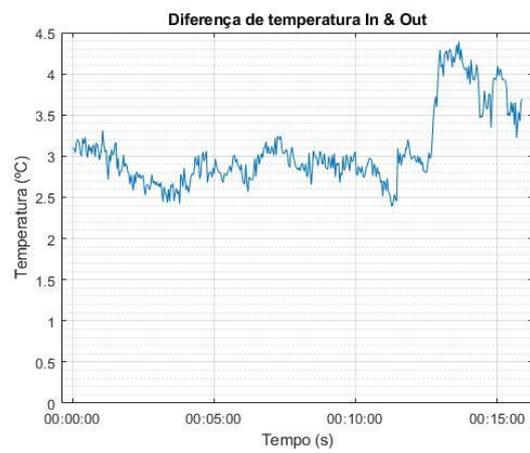
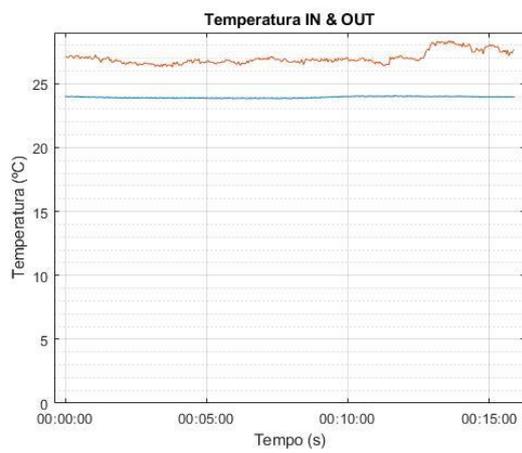
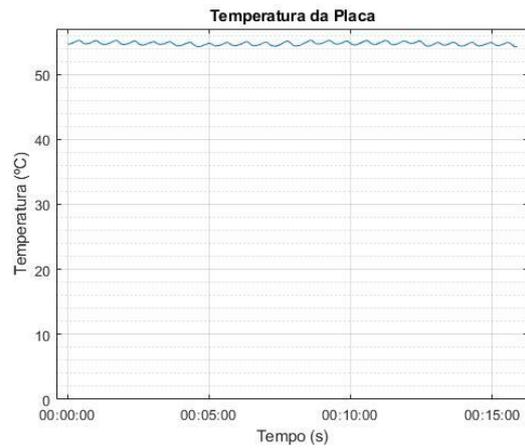
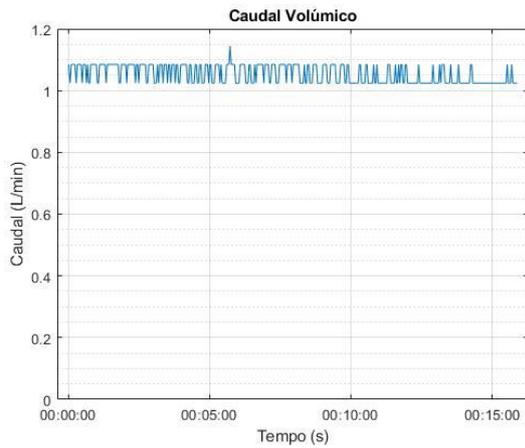
*Monitorização do teste 1 da Placa 2*

## Placa 2: Teste 2



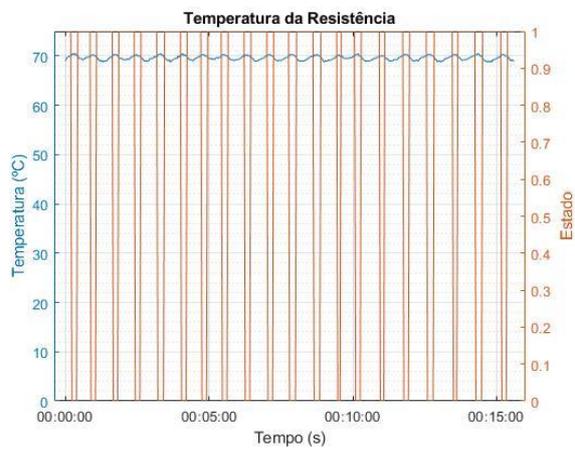
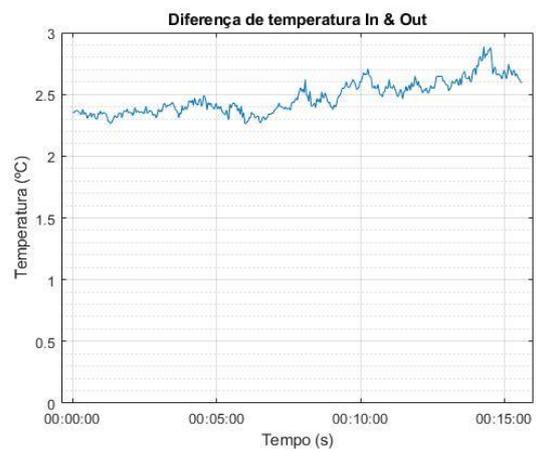
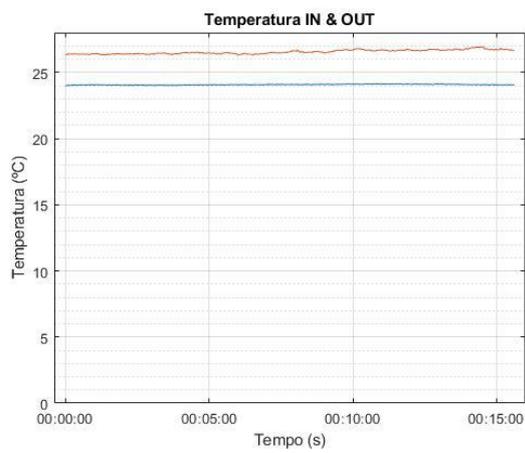
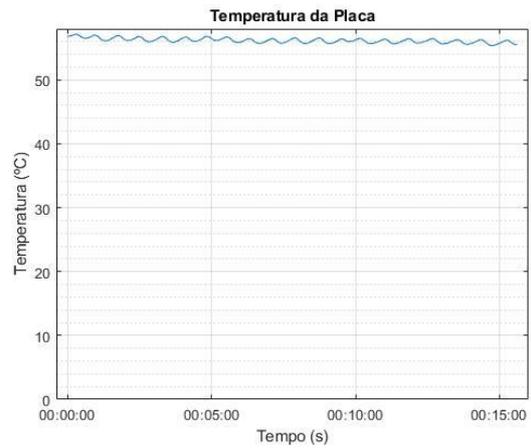
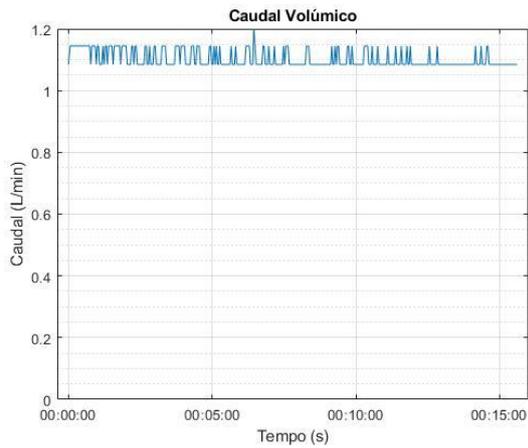
Monitorização do teste 2 da Placa 2

## Placa 2: Teste 3



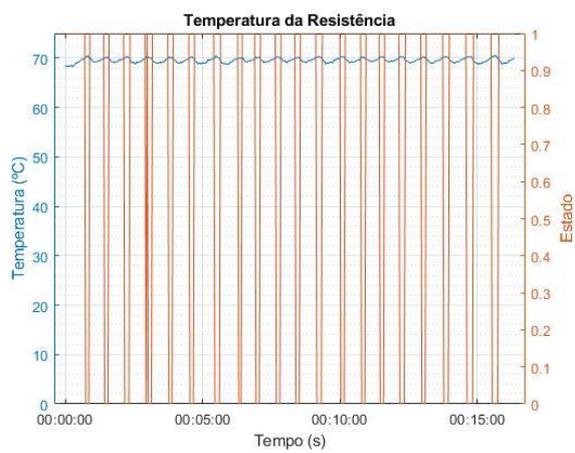
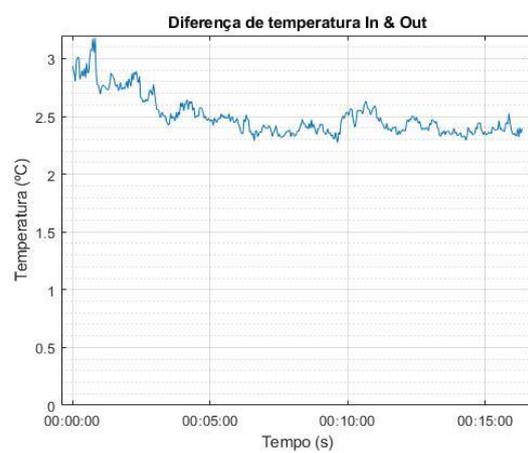
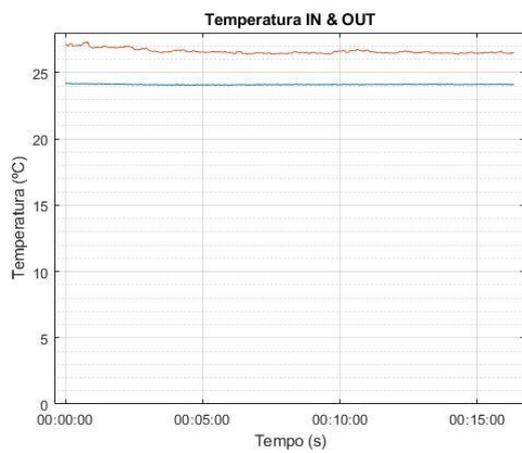
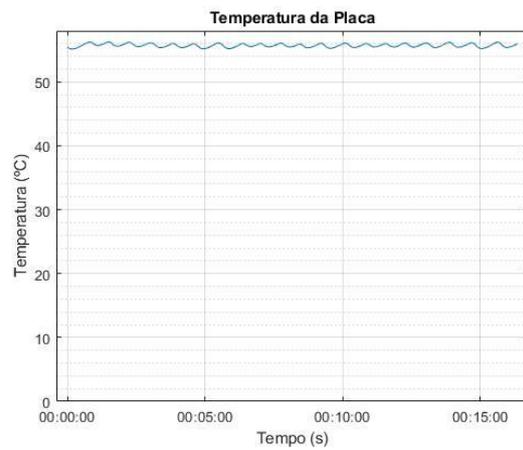
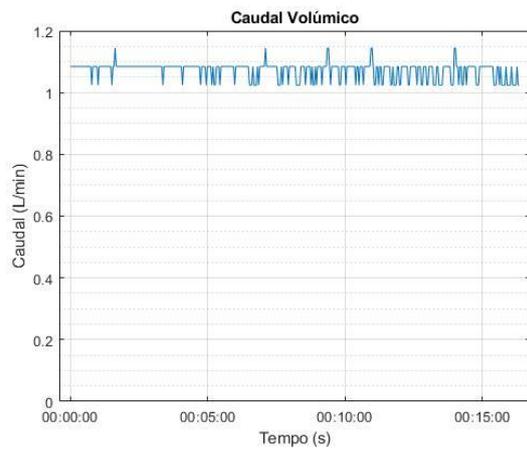
Monitorização do teste 3 da Placa 2

## Placa 3: Teste 1



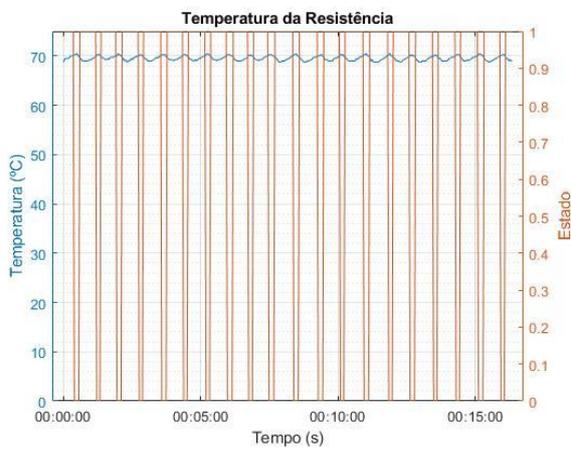
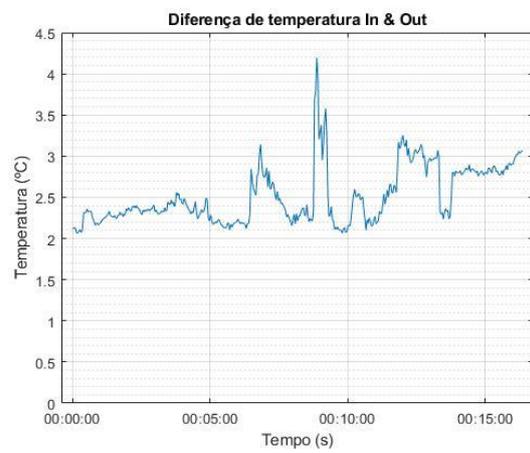
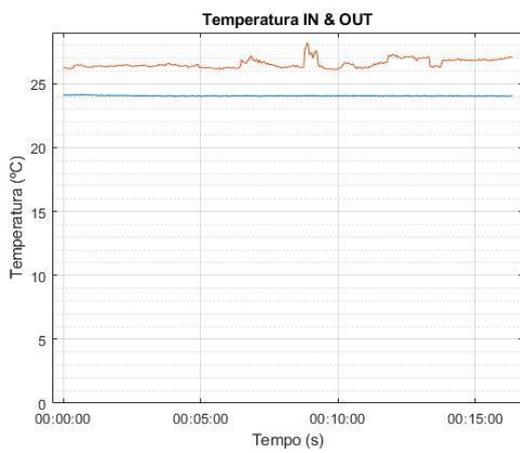
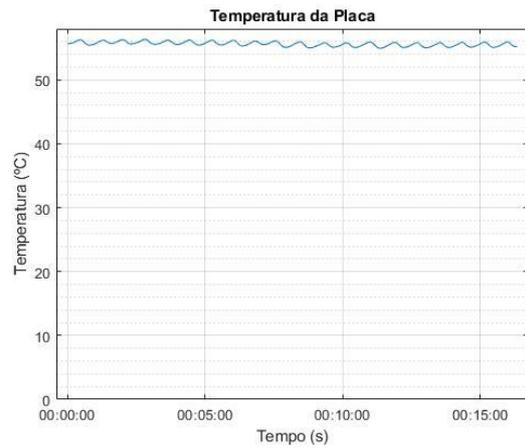
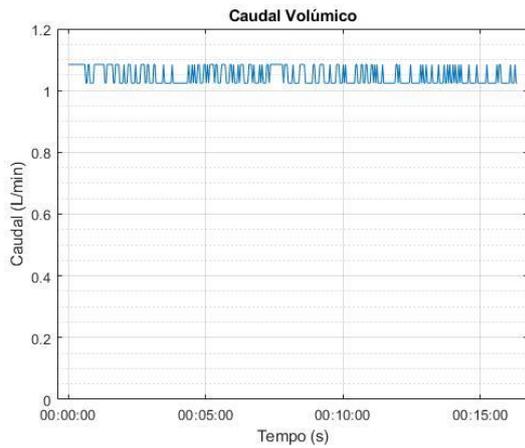
*Monitorização do teste 1 da Placa 3*

## Placa 3: Teste 2



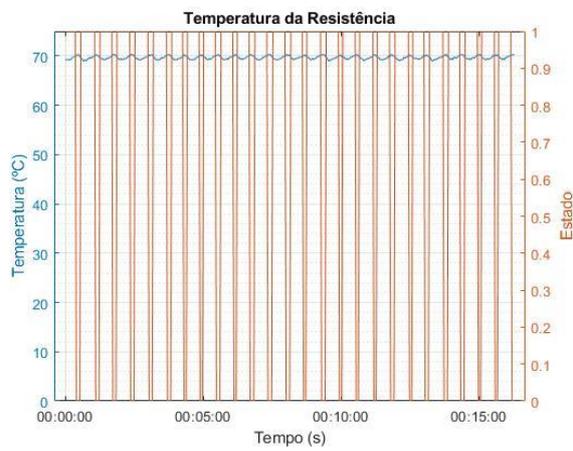
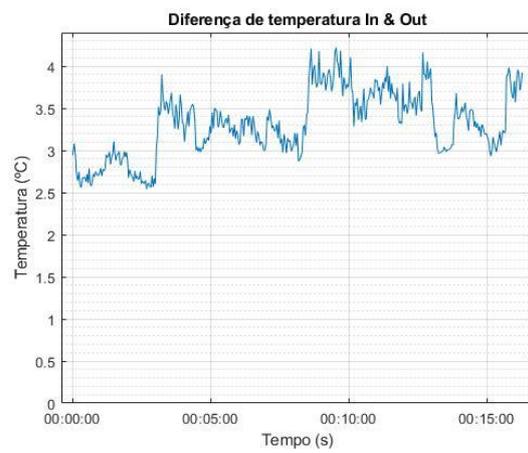
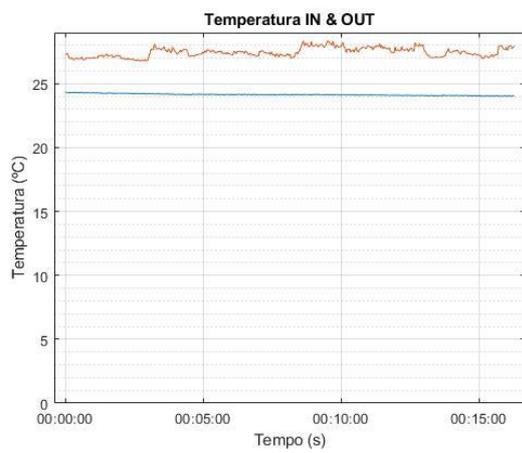
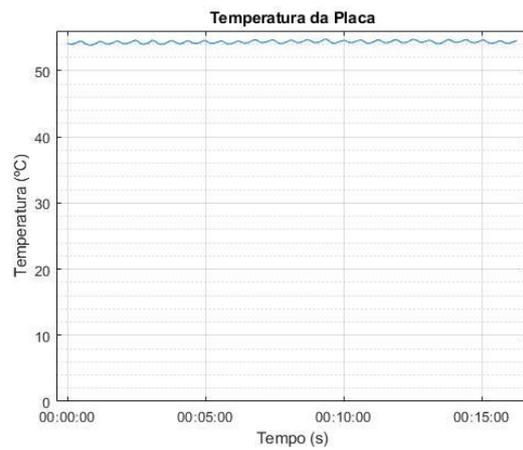
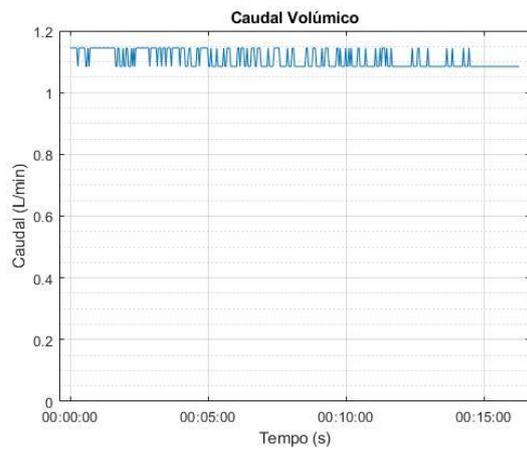
*Monitorização do teste 2 da Placa 3*

### Placa 3: Teste 3



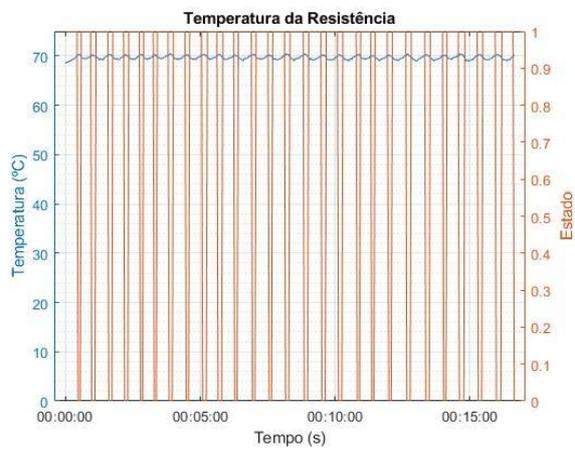
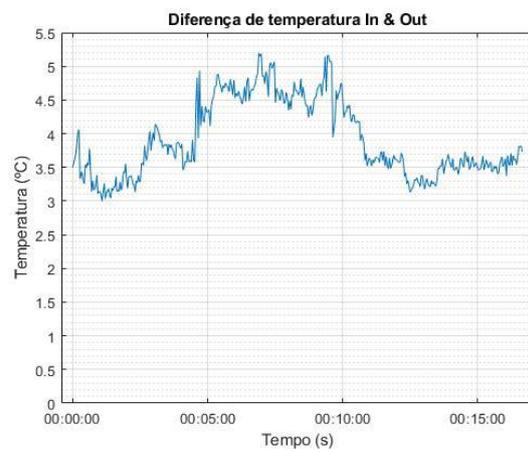
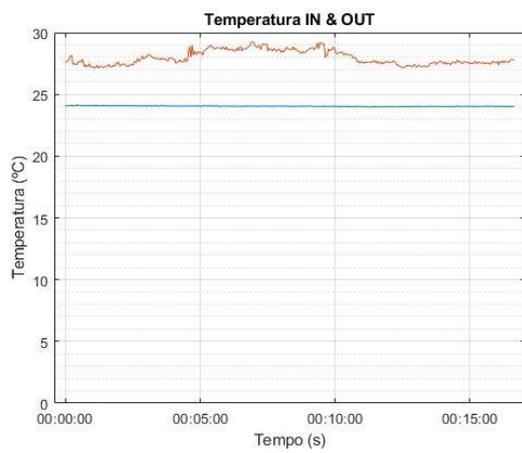
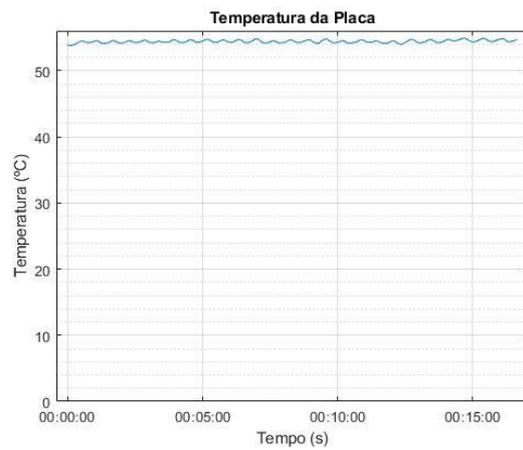
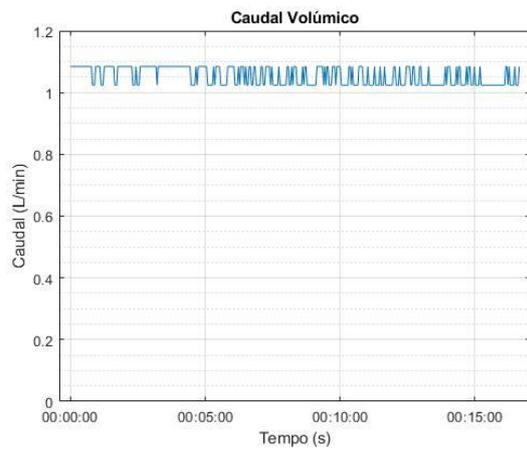
Monitorização do teste 3 da Placa 3

## Placa 4: Teste 1



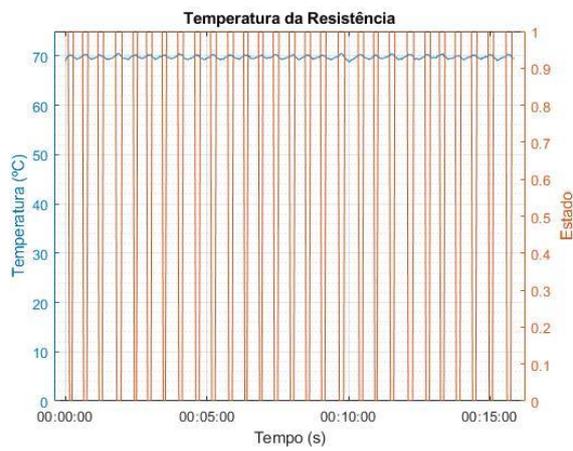
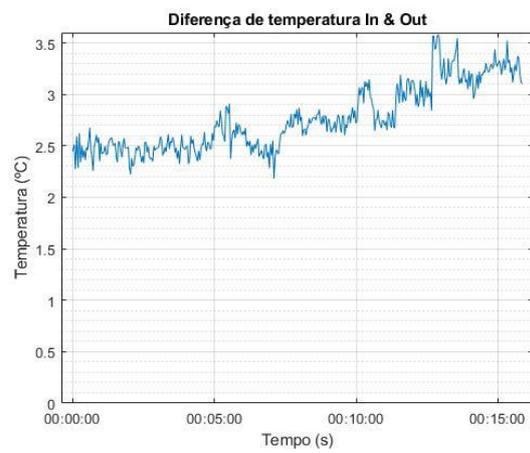
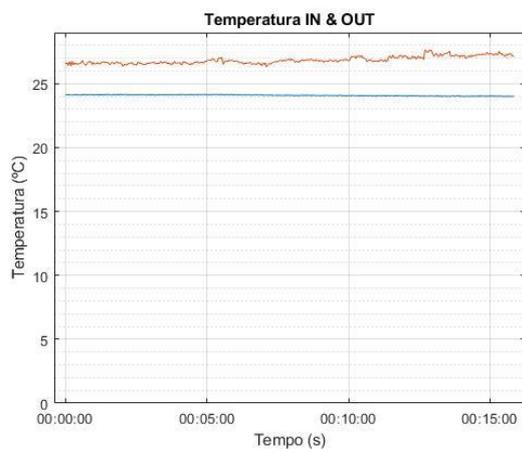
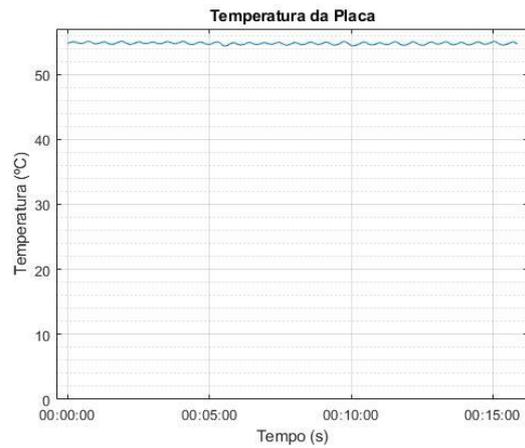
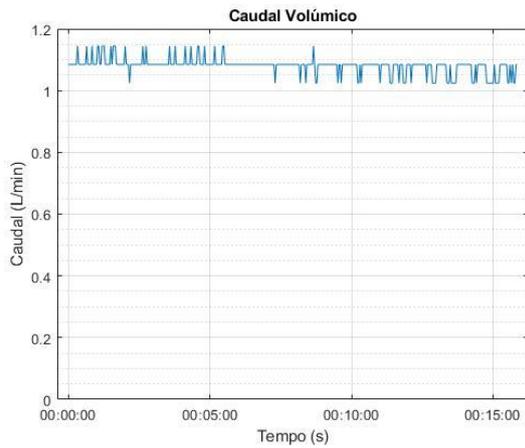
Monitorização do teste 1 da Placa 4

## Placa 4: Teste 2



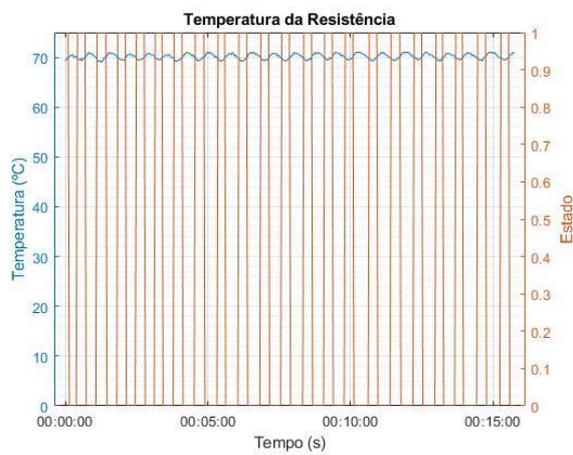
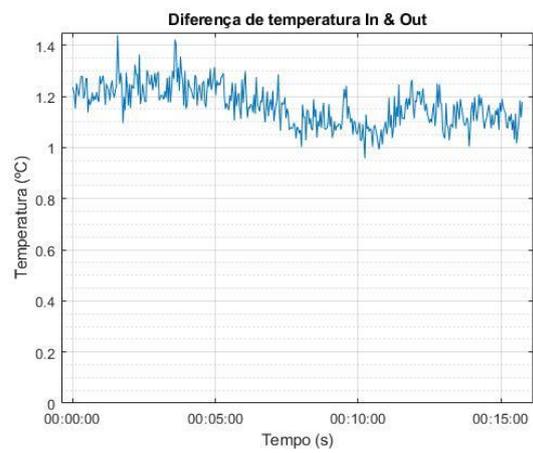
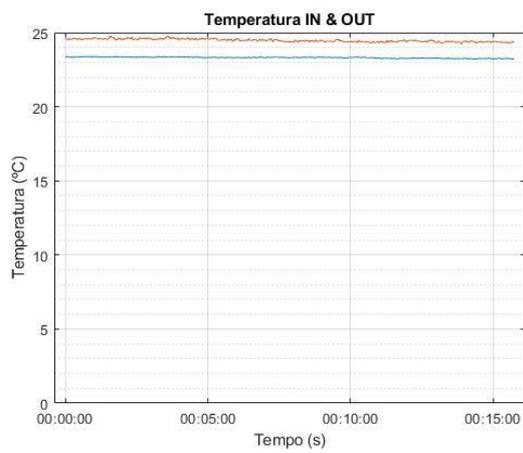
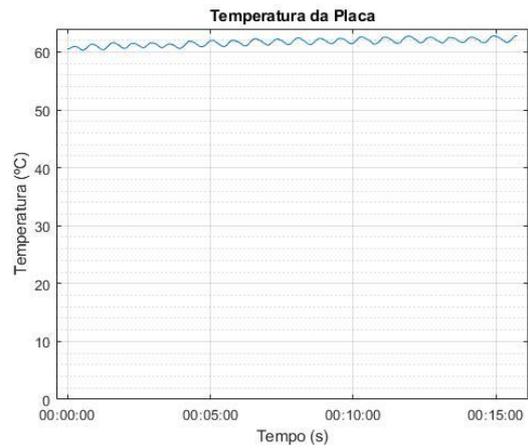
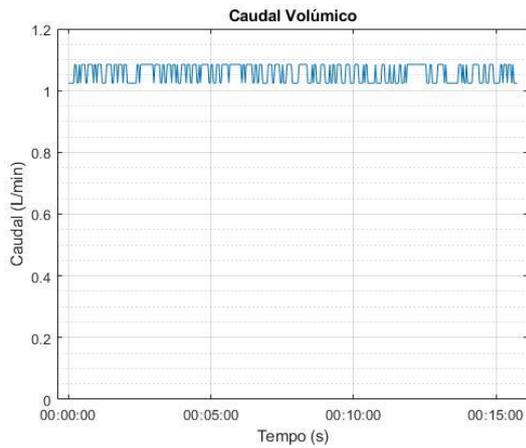
Monitorização do teste 2 da Placa 4

## Placa 4: Teste 3



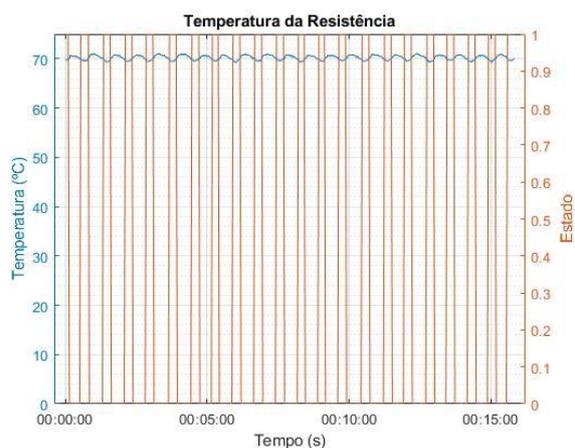
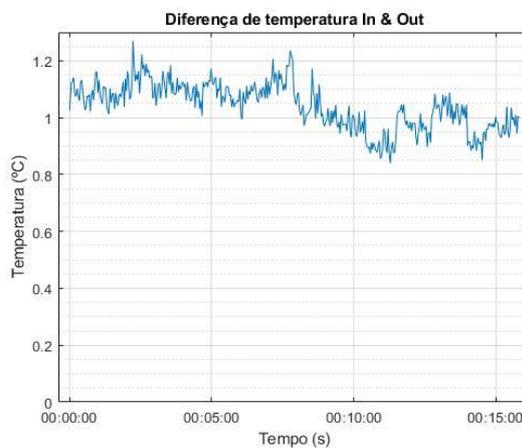
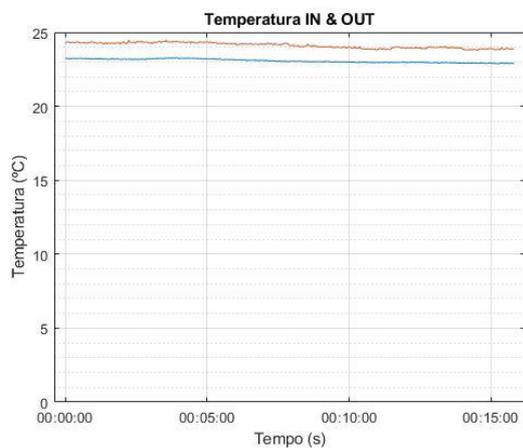
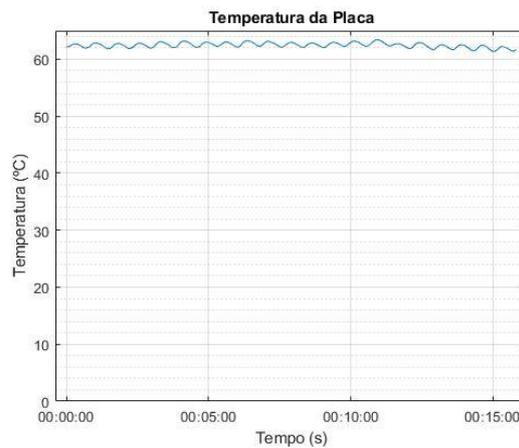
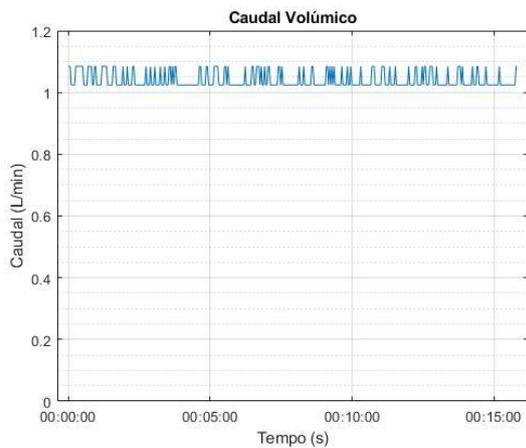
Monitorização do teste 3 da Placa 4

## Sem placa: Teste 1



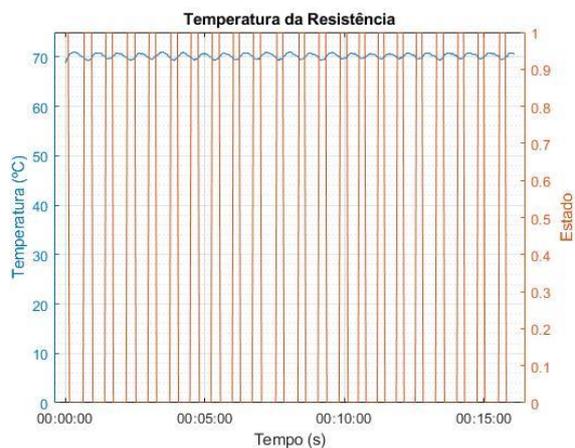
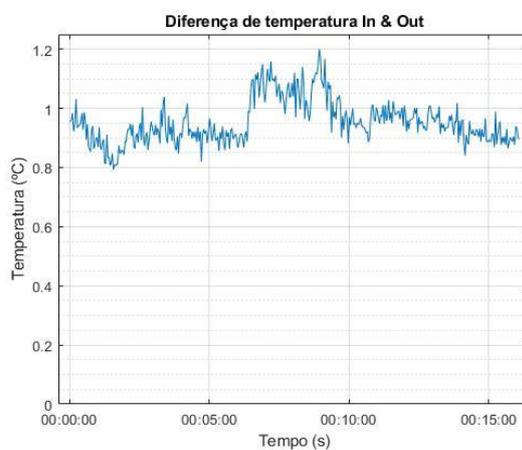
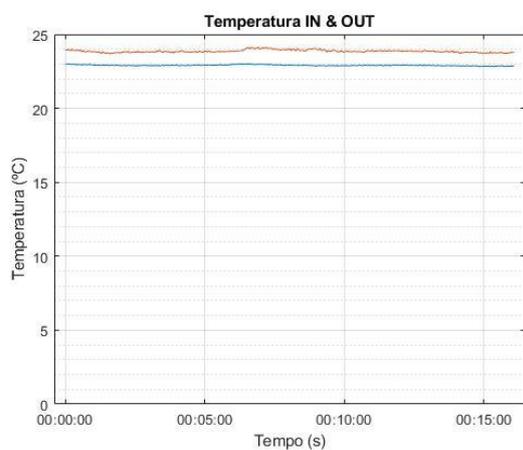
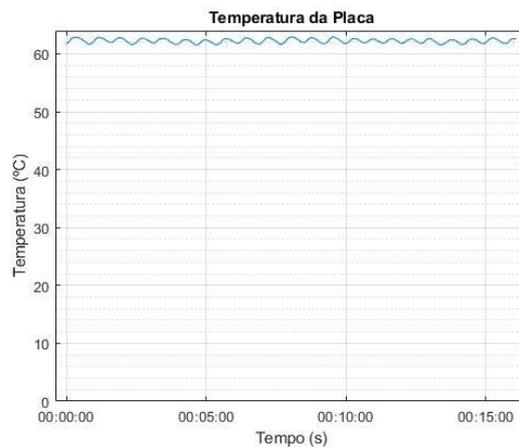
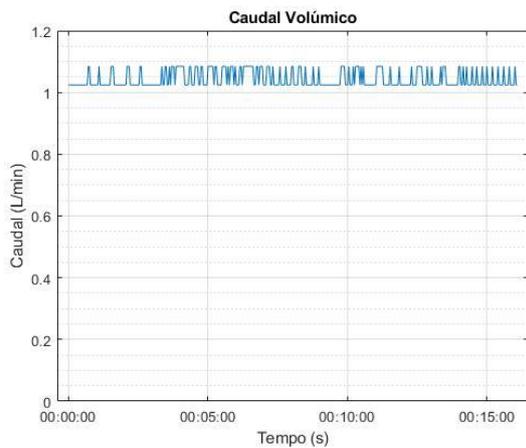
*Monitorização do teste 1 sem placa*

## Sem placa: Teste 2



Monitorização do teste 2 sem placa

### Sem placa: Teste 3



Monitorização do teste 3 sem placa