



Ciências
ULisboa

Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Ana Teresa Gaspar Castanheira

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Killian Paulo Kiernan Lobato

Resumo

A impressão 3D é uma tecnologia em crescimento em vários setores, um sector desses o de novos edifícios. Esta dissertação foca-se na investigação dos potenciais usos desta tecnologia para a impressão de estruturas aplicadas ao isolamento térmico. Para tal, foram impressos vários blocos teste, sólidos e com caixas de ar no interior (de espessura de 5, 10 ou 15 mm), usando três materiais normalmente utilizados em impressão 3D: o PLA, ABS e PETG. O desempenho térmico foi avaliado para gamas de 40 a 80 °C, medindo a mudança de temperatura numa das faces do bloco enquanto que a face oposta estava exposta a uma fonte de calor. Os resultados das medições revelaram que o bloco de PLA com uma caixa de ar maior (15 mm) no seu interior era o mais eficiente para temperaturas superiores a 60 °C.

Finalmente, para testar a aplicação de estruturas impressas em 3D para isolamento térmico, foi desenvolvido um protótipo para o isolamento térmico de copos de café de plástico, este, por motivos práticos, com uma caixa de ar de apenas 2 mm. Recorrendo a este protótipo o arrefecimento do café a partir dos 70 até aos 46 °C, consegue ser retardado durante 8 minutos extra em comparação com uma situação normal. Enquanto isto, a temperatura da face exterior do protótipo nunca ultrapassa os 35 °C, temperatura dentro da zona de conforto para a pele humana.

Palavras-chave: Impressão 3D, isolamento térmico, transferência de calor.

Abstract

3D printing is a growing technology in several sectors, one such sector is that of new buildings. This dissertation focuses on the research of potential uses of this technology for the printing of structures applied to thermal insulation. To do so, several solid and inner air gap (of width of 5, 10 or 15 mm) test blocks were printed, using three materials typically used in 3D printing: PLA, ABS and PETG. Thermal performance was evaluated in the 40 to 80 °C range by measuring the temperature change at one of the faces of the block when the opposite face was exposed to a heat source. The results of the measurements revealed that the PLA block with a bigger air gap (15 mm) inside of it was the more efficient one for temperatures higher than 60 °C.

Finally, to test the application of 3D printed structures for thermal isolation a prototype was developed for the thermal insulation of plastic coffee cups, this one, for practical reasons, with an air gap of only 2 mm. By using this prototype, the coffee cooling from 70 to 46 °C, can be delayed for an extra of 8 minutes when compared to a normal situation. Meanwhile, the external prototype's face temperature never exceeds 35 °C, a temperature within the comfort zone for human skin.

Keywords: 3D printing, thermal insulation, heat transfer.

Índice

Resumo	ii
Abstract.....	ii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	vi
Agradecimentos	vii
Simbologia, Notações e Siglas.....	viii
Capítulo 1 – Introdução.....	10
1.1 Contextualização	10
1.1.1 Variedades de isolamento.....	11
1.2 Objetivo e metodologia.....	12
1.3 Estrutura	13
Capítulo 2 – Impressão 3D.....	14
2.1 Definição	14
2.2 Evolução e Filosofia.....	15
2.3 Tecnologias	15
2.3.1 Deposição de Material Fundido (FDM)	15
2.3.2 Sinterização Seletiva (SLS).....	16
2.3.3 Fusão por Feixe de Eletrões	17
2.3.4 Estereolitografia (SLA).....	18
2.3.5 Fabrico de Objetos através de Laminação.....	19
2.4 Materiais.....	20
2.5 Aplicações	20
Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos	23
3.1 Princípios de Transferência de Calor	23
3.1.1 Condução.....	24
3.1.2 Convecção	24
3.1.3 Radiação.....	26
3.1.4 Regime Transiente.....	26
Capítulo 4 – Procedimento experimental e resultados	28
4.1 Impressora e as suas propriedades.....	28
4.2 Propriedades dos materiais escolhidos	29
4.3 Escolha das estruturas a imprimir	31
4.4 Calibração de parâmetros e impressão de peças teste	32

4.5	Medições	35
4.6	Protótipo	43
Capítulo 5	– Análise dos valores obtidos	45
5.1	Análise Estacionária	46
5.2	Análise Económica	49
Capítulo 6	– Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	51
Referências Bibliográficas		53
Anexos		57
A.1	Componentes da impressora 3D	57
A.2	Gráficos da evolução das temperaturas dos blocos sólidos e com caixa de ar sujeitos aos vários <i>set points</i>	58

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Condutividade térmica de alguns materiais, incluindo alguns materiais construtivos à direita, com o seu próprio eixo [1] [4] [8].	12
Figura 2.1 - Ilustração de um sistema de impressão 3D sem a utilização de estruturas de suporte com FDM como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].	16
Figura 2.2 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com SLS como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].	17
Figura 2.3 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com EBAM como princípio de funcionamento, adaptado de "Wire-based AM vs. Powder-based AM" [26].	18
Figura 2.4 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com SLA como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].	19
Figura 2.5 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com LOM como princípio de funcionamento, adaptado de "Types of 3D printers or 3D printing technologies overview" [27].	19
Figura 2.6 - Aeronave não tripulada fabricada através da tecnologia FDM pela Sratasys	21
Figura 2.7 - LM3D Swim fabricado através da tecnologia FDM pela Local Motors de "3D-Printed car", [Online] [32].	22
Figura 2.8 - Exemplos de trabalhos impressos em 3D, obra do artista Joshua Harker	22
Figura 2.9 - Ilustração de um sistema hipotético de Contour Crafting em ação, de Contour Crafting, [Online] [33].	23
Figura 4.1 - Impressora 3D Leapfrog Creatr HS de "Creatr HS", [Online] [36].	29
Figura 4.2 - Condutividades do PLA (verde) [40] e ABS a 20 MPa (laranja) [41].	31
Figura 4.3 - Esquema dos blocos impressos com 25x25x15 mm ³ . Bloco sólido à esquerda e com caixa de ar à direita.	32
Figura 4.4 - Desenho original para testar a impressão de pontes, impresso em diversos tamanhos.	33
Figura 4.5 - Estrutura impressa nº7 (Tabela 2).	34
Figura 4.6 - Estrutura de dimensões mais reduzidas (esquerda) e estruturas impressas com 15x10x10 mm ³ (centro) e 22x15x18 mm ³ (direita).	34
Figura 4.7 - Paredes sólidas impressas de diferentes maneiras (esquerda e centro) e sem os parâmetros ajustados (direita).	34
Figura 4.8 - Ilustração da colocação do primeiro termopar no bloco fixo com a fita kapton.	35
Figura 4.9 - Imagens obtidas pela câmara térmica da distribuição de calor na placa aquecedora (esquerda) e da temperatura da base do bloco (direita).	36
Figura 4.10 - Figuras das três bases experimentadas para os blocos impressos. (1) - O papel de alumínio; (2) - A peça de alumínio com 5 mm; (3) - A chapa de alumínio com 2 mm.	37

Figura 4.11 - ΔT 's finais para os blocos com e sem caixa de ar, dos três materiais nas várias medições.....	38
Figura 4.12 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, com caixa de ar, nas medições a 40 °C.....	39
Figura 4.13 - Desenho do bloco com dimensões 50x50x15 mm ³ com a sua caixa de ar visível à direita.....	40
Figura 4.14 - Bloco de 25x25x6 mm ³ ao lado de um bloco com 25x25x15 mm ³	40
Figura 4.15 - Aparência de uma peça com preenchimento de 30%.	41
Figura 4.16 - Comparação dos ΔT 's finais para os blocos com caixa de ar e sólidos, entre aqueles impressos com paredes sólidas e com 30% de preenchimento, para as várias temperaturas de teste.	42
Figura 4.17 - Ilustração apenas das camadas sólidas inferiores impressas num bloco com caixa de ar e preenchimento de 30%.	42
Figura 4.18 - Comparação dos ΔT 's finais para os blocos com caixa de ar e sólidos com caixas de ar de 15, 20 e 25 mm, para as várias temperaturas de teste.....	43
Figura 4.19 - Impressão do protótipo de uma manga para um copo de café (esquerda) e protótipo já impresso com um copo de café (vazio) no seu interior.	44
Figura 4.20 - Evolução da temperatura do café sem a utilização da manga (azul), com a utilização desta (laranja) e da face exterior da mesma (amarela).	45
Figura 5.1 - Secção do bloco em estudo dividida em três partes principais (1), (2) e (3), sendo a parte central (2) subdividida em outras três partes (a), (b) e (c).....	47
Figura 5.2 - Esquema 3D do bloco inteiro, incluindo a secção acima descrita e outras duas, completamente compostas por PLA.....	48
Figura 5.3 - Resistências térmicas totais de blocos sólidos e com caixa de ar, constituídos por materiais isolantes.	49
Figura A.1.1 - Componentes da impressora 3D Leapfrog Creatr HS. Adaptado de Kamerlingh H Onnesweg, "Leapfrog Creatr HS DATASHEET V01--04" [46].	57
Figura A.2.1 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, sólidos, nas medições a 40 °C.....	58

Índice de Tabelas

Tabela 4-1 - Estruturas teste impressas e parâmetros variados na sua obtenção.....	33
Tabela 4-2 – ΔT 's finais para o material ABS utilizando o papel, peça e chapa de alumínio. ...	37
Tabela 4-3 - ΔT 's finais dos diferentes blocos de PLA para as diferentes temperaturas.	41
Tabela 5-1 - Algumas propriedades do ar a 300 K [34] e [43].....	45

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Killian Lobato, pelos conselhos, interesse e acompanhamento ao longo deste processo. À professora Marta Panão pelo esclarecimento de dúvidas e amabilidade.

Ao Sr. Ricardo Pereira pela ajuda, disponibilidade e simpatia. A todos os que, de uma maneira ou outra, me deram algum apoio no laboratório.

Aos meus amigos da faculdade por tornarem os últimos 6 anos memoráveis e nunca aborrecidos, tal como aos meus outros amigos que continuam a permanecer presentes.

A toda a equipa da Biblioteca da Faculdade de Ciências, pelas dicas e pelo excelente ambiente de trabalho criado dia após dia.

À Faculdade de Ciências em si, uma verdadeira segunda casa, por tudo aquilo que me ensinou, deixando-me melhor preparada para futuros desafios.

Ao Grey e à Catarina pela companhia.

Ao Daniel pela infundável paciência, conselhos e ideias.

E por último à minha família, ao meu pai, pela confiança que sempre demonstrou em mim, à minha mãe por nunca deixar de acreditar em mim, a ambos por tornarem tudo isto possível, à minha irmã por ser um modelo a seguir, mesmo sem se aperceber, e aos meus avós pelo apoio e preocupação.

Simbologia, Notações e Siglas

β	Coefficiente de Expansão Volumétrica (K^{-1})
ΔT	Diferença de Temperatura (K)
ε	Emissividade
μ	Viscosidade (kg/m.s)
ρ	Densidade (kg/m^3)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$)
τ	Constante Térmica de Tempo (s)
A_s	Área Superficial (m^2)
Bi	Número de Biot
c	Calor Específico (J/(kg.K))
E	Poder emissivo (W/m^2)
E_b	Poder emissivo de um corpo negro (W/m^2)
E_{out}	Energia perdida à superfície (J)
E_{st}	Mudança de energia interna (J)
G	Irradiação (W/m^2)
G_{abs}	Irradiação absorvida (W/m^2)
Gr	Número de Grashof
h_c	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção (W/m^2K)
h_r	Coefficiente de Transferência de Calor por Radiação (W/m^2K)
k	Condutividade Térmica (W/m.K)
L_c	Comprimento Característico da Superfície
Nu	Número de Nusselt
R	Resistência térmica (m^2K/W)
R^a	Resistência térmica absoluta (K/W)
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
Pr	Número de Prandtl
q	Taxa de transferência de calor (W)
q''	Fluxo de calor (W/m^2)
T_i	Temperatura inicial (K)
T_0	Temperatura na face na posição $x=0$ (K)
T_L	Temperatura na face na posição $x=L$ (K)

T_s	Temperatura do sólido (K)
T_{sur}	Temperatura dos arredores (K)
t_0	Instante inicial (s)
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (Acrilonitrila butadieno estireno)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacturing</i> (Fabricação aditiva por feixe de electrões)
EBDM	<i>Electron Beam Direct Manufacturing</i> (Fabricação direta por feixe de electrões)
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> (Fusão por feixe de electrões)
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Deposição de material fundido)
FFF	<i>Freeform Fabrication</i> (Fabrico de forma livre)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Fabrico de objetos através de laminação)
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> (Politereftalato de etileno glycol-modificado)
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Poliláctico)
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i> (Estereolitografia)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva)

Capítulo 1 – Introdução

Esta secção introduz e contextualiza o tema da dissertação, tal como os principais objetivos desta e a metodologia seguida para os alcançar. É também apresentada a estrutura de todo o documento.

5 1.1 Contextualização

10 A necessidade de isolamento térmico adequado é algo tão antigo como a construção em si [1]. O processo de construção surgiu quando o Homem pré-histórico teve a necessidade de se proteger dos animais e elementos da natureza (vento, chuva, frio e calor extremos) [1]. Os humanos de então começaram a criar abrigos a partir de pelo e peles de animais, lã, palha, linho ou cana, mas estes possuíam uma durabilidade reduzida [1]. Só mais tarde com o desenvolvimento da agricultura e de um estilo de vida mais estável é que começaram a recorrer a materiais mais duráveis, como pedra, madeira e terra.

15 Essa imprescindibilidade do ser humano se proteger dos elementos levou a que para diferentes localizações as construções fossem realizadas para melhor se adaptarem aos diferentes tipos de clima. Por exemplo, era usual os Egípcios usarem a terra como isolamento ao se refugiarem em câmaras subterrâneas nos dias mais quentes [1].

20 À medida que as tecnologias se desenvolveram, também as inovações para aumentar o conforto dos humanos o fizeram. Ao longo do século XII e XIII foi introduzida a lareira e chaminé na Noruega e Islândia, inovações que apesar de não contribuírem para o isolamento das habitações, providenciavam uma fonte de calor, aumentando portanto o nível de conforto [2]. No norte da Europa as casas começaram a ter telhados de palha trançada com espessuras até os 60 cm e paredes de palha e barro. Os indígenas construía cabanas com ervas marinhas secas, que graças a sua fibra oca providenciavam um grau de isolamento aceitável [2].

25 No fim do século XIX houve um grande desenvolvimento num curto espaço de tempo no qual o uso de isolamento térmico começou a ser algo mais deliberado e surgiram materiais como o vidro, metal, ferro e betão [1] [2]. Foi também nesta altura que surgiram os primeiros isolamentos tipo “manta”, sendo um dos primeiros constituído por uma camada de folhas de plantas entre duas placas de cartão [2]. No mesmo século começou a produção comercial da lã mineral, na altura usada para isolar canos, e já no século XX surgiu a lã de rocha e a lã mineral [2].

30 Também no século XX foi desenvolvido um método de fabrico de fibra de vidro com o intuito de a usar para isolamento térmico [2]. Este material já havia sido descoberto e era fabricado no antigo Egipto, no entanto apenas tinha fins decorativos.

35 Com o passar dos anos foram desenvolvidos vários materiais, muitos dos quais foram ultrapassados e caíram em desuso, até chegarmos à atualidade onde cada vez mais são impostas novas e mais exigentes metas de eficiência energética aos edifícios. Um exemplo disso é o objetivo traçado pela União Europeia de todos os edifícios construídos a partir de 2020 sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia [3]. Tal objetivo requiere, não só inovadoras técnicas de arquitetura e engenharia, mas também o uso dos melhores isoladores térmicos disponíveis.

40 Na análise de tais materiais de isolamento térmico são estudadas várias propriedades inerentes a cada material, sendo uma das mais relevantes a condutividade térmica expressa em $W/m.K$, que corresponde à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e área unitária desse material por unidade de diferença de temperatura entra as suas faces [4]. Outra proprie-

dade importante e, através da qual são muitas vezes caracterizados elementos construtivos, é a resistência térmica (R) expressa em m^2K/W sendo que quanto maior for o seu valor, melhor é o elemento construtivo, representando este uma melhor barreira contra o calor.

5 Também são consideradas outras propriedades do material como a sua reação ao fogo (se contribui para a origem ou desenvolvimento de um incêndio), resistência à difusão de vapor de água, energia incorporada (energia necessária desde a concepção do produto até à sua colocação), emissões de CO_2 , custo, período de vida útil e reciclabilidade [4].

1.1.1 Variedades de isolamento

10 Existem diversos materiais utilizados para isolamento térmico, havendo quem os divida em diferentes categorias de acordo a sua forma ou origem [4] [5] [6] [7]. Uma maneira usual de fazer a distinção entre as diferentes categorias é diferenciar os materiais em rolos/mantas, espumas rígidas, materiais de enchimento solto, refletores e aplicados por spray [6] [7]. Tal distinção não implica no entanto que o mesmo material não se possa apresentar em diferentes formas. Um exemplo disto é a fibra de vidro que tanto pode vir na forma de rolos, mantas ou de enchimento solto [6].

15 Há também quem diferencie os materiais em categorias de acordo com a sua natureza, podendo esta ser mineral, vegetal, animal ou sintética [4].

Os materiais de origem mineral são aqueles concebidos com base em matérias-primas naturais abundantes, tais como areia, vidro reciclado e rocha vulcânica. Possuem boa resistência e apresentam-se geralmente sob a forma de painéis rígidos. São alguns a lã de rocha, vidro celular e a argila expandida.

20 Os materiais de origem vegetal e animal são compostos respetivamente por fibras vegetais e derivados de penugem de animais, sendo que graças à sua natureza orgânica, são dos materiais que apresentam menor impacto ambiental. Alguns deles são a cortiça, palha, fibra de algodão, lã de madeira, lã de ovelha e penas de pato.

25 Por fim, os materiais de isolamento térmico de origem sintética são aqueles com origens em matérias-primas não renováveis nem recicláveis, sendo fundamentalmente produzidos a partir de hidrocarbonetos. Como o poliestireno expandido, extrudido e o poliuretano. Em alguns casos a combustão de materiais deste tipo provoca mesmo a emissão de vapores tóxicos

30 O uso destes materiais tradicionais muitas vezes implica a utilização de camadas de isolamento mais espessas o que nem sempre é favorável à situação em causa. Tendo tal fator em atenção existem outros materiais, que podem ser considerados isolantes térmicos inovadores, conseguindo ser alternativas possíveis. Um destes materiais trata-se do aerogel, uma substância com uma densidade extremamente baixa, constituída por nano-partículas porosas que confinam o ar nos seus poros e permitem obter uma condutividade menor que a do ar imóvel. Outras alternativas incluem os painéis de isolamento a vácuo (*vacuum insulation panels* ou VIP) constituídos por uma barreira multicamada que contém vácuo
35 no seu interior, os materiais de mudança de fase (*Phase Change Material* ou PCM) que absorvem ou libertam energia com a sua mudança de fase e as barreiras radiantes que visam a redução da transferência de calor por radiação ao utilizarem um material de baixa emissividade e alta refletividade [4].

De seguida é apresentada uma figura com a condutividade térmica de alguns dos materiais aqui revistos para além de alguns materiais típicos de construção (Figura 1.1 - direita).

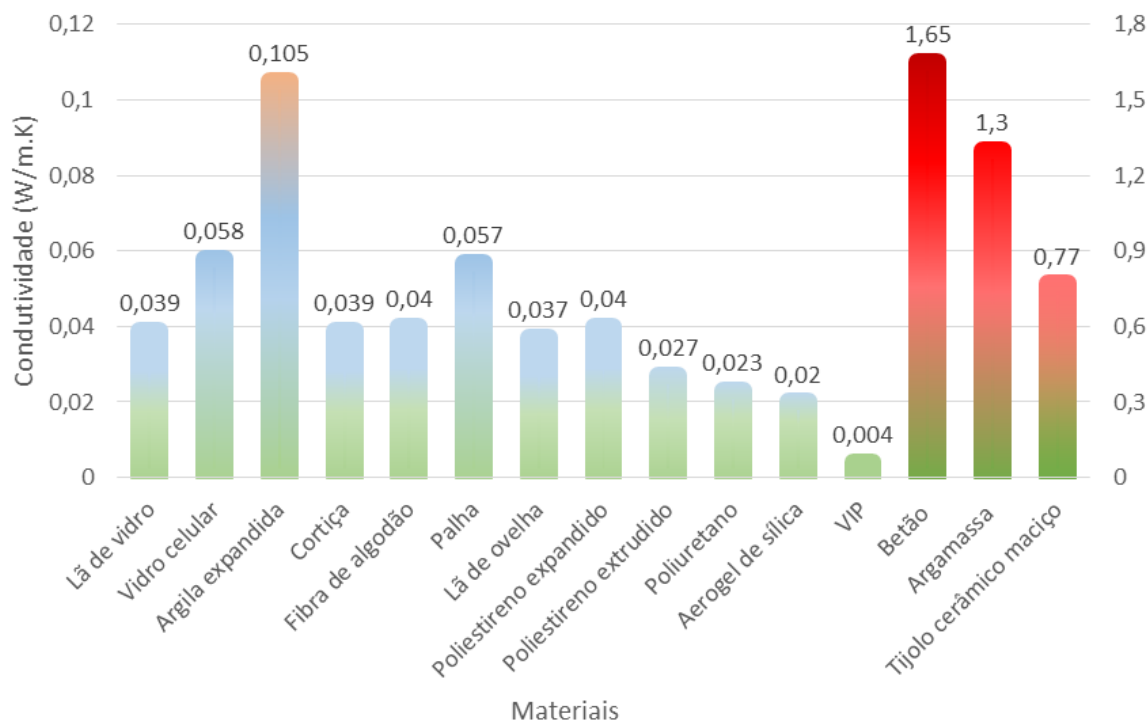


Figura 1.1 - Condutividade térmica de alguns materiais, incluindo alguns materiais construtivos à direita, com o seu próprio eixo [1] [4] [8].

1.2 Objetivo e metodologia

5 Com base na necessidade regular, que tão cedo não irá desaparecer, de usar isolamento térmico, surgiu a ideia de a aliar com o emergente processo de fabrico da impressão 3D. Sendo este um campo que tem vindo a crescer ao longo dos anos e com que se faz cada vez mais investigação nos mais variados ramos. Esta associação pode trazer numerosas vantagens não só para o comum cidadão que pode um dia usufruir da personalização inerente a um processo destes, mas especialmente para aplicações em laboratórios onde peças feitas à medida e para um determinado uso podem fazer a diferença em diversos trabalhos experimentais.

15 Ainda que o acesso a impressoras 3D seja por enquanto muito reduzido para um cidadão comum na nossa sociedade, esta já é uma tecnologia utilizada em algumas instituições de ensino, tendo sido a primeira impressora 3D portuguesa criada pela Universidade de Aveiro [9]. Existindo também empresas especializadas neste ramo que não só fazem a impressão de objetos através de desenhos fornecidos pelos clientes, como também fazem a modelação de objetos ao gosto do cliente, digitalizações em 3D e até organizam workshops [10] [11] [12].

20 Este trabalho tem como objetivo a impressão 3D de estruturas para isolamento térmico, sendo que ao invés da normal utilização de materiais com uma boa resistência térmica foram utilizados alguns dos materiais habitualmente utilizados numa impressora 3D. Tal diferença de materiais manifestou-se na forma de estruturas menos isolantes, mas que ao contrário de estruturas normais (por ex: termos), qualquer pessoa, com acesso a uma impressora 3D, pode reproduzir à medida das suas necessidades e desejos.

25 Consequentemente um segundo objetivo desta dissertação foi aferir qual a configuração ideal das estruturas impressas para apresentarem uma maior resistência térmica e qual o material que deverá ser associado a essa configuração para maximizar esse valor. Para determinar a melhor configuração foram

impressas várias peças variando certos fatores entre impressões. Sendo que a condutividade térmica dos materiais em estudo vai variar de acordo com as temperaturas a que estes são sujeitos, com tendência para aumentar com o aumento da temperatura. A configuração ideal será dependente da utilização desejada para a estrutura em si, quer se esta será sujeita a temperaturas mais extremas ou apenas moderadamente altas. Este objetivo tem como fim esperado a impressão de um protótipo eficiente e barato que possa ser utilizado pela generalidade das pessoas.

1.3 Estrutura

A dissertação aqui apresentada encontra-se dividida em seis capítulos, referências bibliográficas e anexos. O presente capítulo introduz e contextualiza a temática em estudo, ao fazer uma breve introdução evolutiva ao isolamento térmico, o levantamento de alguns tipos de isolamento e uma breve comparação entre eles, sendo também apresentados os objetivos.

O capítulo 2 introduz os fundamentos da transferência de calor, incluindo os seus três modos (condução, convecção e radiação), abordando um pouco mais detalhadamente a transferência de calor em regime transiente.

No capítulo 3 é abordado o ramo da impressão 3D, analisando a sua evolução histórica. São também apresentadas algumas das várias tecnologias utilizadas, os diferentes tipos de materiais existentes e aplicações desta tecnologia em vários setores.

O capítulo 4 é dedicado ao procedimento experimental, incluindo uma introdução à impressora e materiais utilizados, a escolha das estruturas a imprimir, os testes preliminares essenciais, as decisões tomadas no decorrer das experiências, a apresentação dos resultados finais e do protótipo final.

O capítulo 5 foca-se na análise e avaliação energética e económica dos dados obtidos no capítulo 4.

O capítulo 6 concentra-se nas conclusões do presente trabalho e em possíveis desenvolvimentos futuros dentro desta temática.

Capítulo 2 – Impressão 3D

Neste capítulo é introduzida a tecnologia utilizada no decorrer desta dissertação, a impressão 3D, providenciando um esclarecimento global acerca deste tema, incluindo:

- 5 • Uma breve definição da tecnologia em si, dos requisitos necessários para a sua utilização e das suas vantagens face a outras tecnologias de produção;
- O aparecimento e a progressão ao longo dos anos da impressão 3D;
- As mais habitualmente utilizadas tecnologias e a explicação do seu funcionamento em algum detalhe;
- 10 • Os vários tipos de materiais utilizados e os mais comuns;
- As aplicações, cada vez mais crescentes, desta tecnologia, que se estendem a múltiplos ramos.

2.1 Definição

15 Ao definir impressão 3D é necessário mencionar o nome pela qual é muitas vezes conhecida: fabricação aditiva (*additive manufacturing*). Apesar de serem dois termos muitas vezes confundidos como iguais, a verdade é que apenas um define o outro, isto é, impressão 3D é um processo de fabricação aditiva. Tal expressão traduz-se num processo de fabrico que é efetuado pela adição consequente de camadas na escala das décimas de milímetros, sendo isto realizável de diversas maneiras dependendo da tecnologia usada [13]. Apesar de existirem diferentes tecnologias existem sempre três requisitos base: o desenho digital, a tecnologia de impressão 3D e o material usado [14].

20 Antes de imprimir, a impressora necessita de instruções. Tais instruções não passam de desenhos digitais em formato CAD (*Computer Aided Design*), sendo criados por programas próprios de modelação em 3D [14]. Estes ficheiros podem ser desenhados de raiz, a partir de um ficheiro existente ou mesmo criados com o auxílio de um digitalizador 3D [14]. O desenho é depois “cortado” em várias camadas horizontais e guardado no formato *gcode* por um dos *softwares* disponíveis para este efeito

25 [14]. Atualmente já existem plataformas *online* disponíveis para o público em geral onde é possível partilhar os próprios desenhos para que outros utilizadores os usem, melhorem ou modifiquem a seu gosto [15]. A plataforma mais conhecida deste género é o *Thingiverse* que conta com mais de 500 mil modelos 3D disponíveis e incentiva a partilha experiências e conhecimentos técnicos [15].

30 Relativamente às tecnologias de impressão estas podem estar integradas em várias classes cada uma denominada pelos seus processos de fabrico específicos [14]:

- Extrusão – extrusão de material derretido;
- Solidificação de pó – fusão ou junção de partículas;
- Deposição direta de energia - derreter através de uma fonte de alta energia;
- Fotopolimerização - solidificação de um polímero líquido (resina);
- 35 • Laminação de folhas - ligação de folhas.

Os materiais usados podem ser vários, desde areia, plásticos, metais, cerâmica a comida e biomateriais, havendo uma grande gama de variedades deste último tipo em constante desenvolvimento e investigação [14]. Algumas das características mais relevantes de cada material são por exemplo a temperatura de fusão, viscosidade e tempo de coagulação, isto é, o tempo que o material leva a solidificar de novo [14].

40

Face a outras tecnologias de produção a impressão 3D é vantajosa no fabrico de pequenas quantidades e de aplicações mais pequenas (protótipos, peças suplentes, etc.), passando a ter custos mais elevados para grandes impressões [16]. No entanto a impressão 3D ainda está restringida a poucos materiais, cores e acabamentos possíveis, sendo que tais materiais apresentam também uma resistência limitada ao calor e à humidade [16].

2.2 Evolução e Filosofia

O início da impressão 3D, na altura apenas denominada “prototipagem rápida”, pode ser datado de 1983 quando Charles Hull inventou a máquina de estereolitografia, patenteando-a em 1986 como um aparelho para produção de objetos tridimensionais por estereolitografia [13] [17]. Em 1987 foi introduzido o primeiro sistema comercializável deste tipo, o SLA-1 (sendo que SLA corresponde originalmente a *StereoLithography Apparatus*) [18]. No entanto a estereolitografia é apenas uma das várias tecnologias existentes, sendo que, já na altura, não era a única tecnologia em desenvolvimento. Em Outubro de 1986, Carl Deckard registou uma patente do método e aparelho para produzir peças por sinterização seletiva, ou *Selective Laser Sintering (SLS)* originalmente [19]. Três anos mais tarde foi a vez de Scott Crump, co-fundador da empresa Stratasys, registar a patente do aparelho e método para criar objetos tridimensionais por deposição de material fundido ou *Fused Deposition Modeling (FDM)*, patente a qual foi emitida à sua empresa [13] [20].

Um dos pontos mais marcantes na evolução da impressão 3D foi sem dúvida a expansão do seu uso industrial para um uso pessoal, através do projeto de código aberto (*open source* em Inglês), RepRap [21]. Este projeto foi fundado em 2005 pelo Dr. Adrian Bowyer com o principal objetivo de criar uma máquina que fosse capaz de imprimir os seus próprios componentes e, quem sabe um dia, replicar-se a si mesma [21]. O projeto surgiu também com a filosofia de tornar a impressão 3D acessível ao público em geral permitindo aos utilizadores a criação de produtos complexos sem ser necessária a intervenção de uma entidade industrial ou profissional [22]. Em 2009 três membros do projeto RepRap juntaram-se com o intuito de criar uma empresa com uma abordagem mais amigável do utilizador e fundaram a MakerBot que começou a comercializar versões kit de impressoras 3D baseadas em configurações da RepRap mas com melhorias para que fossem mais fáceis de montar [21]. Com esta empresa e através de dois dos seus criadores, nasceu também o *site* já mencionado *Thingiverse* que funciona como um repositório para partilhar todo o tipo de modelos [15].

A impressão 3D trouxe com ela inúmeras possibilidades e vantagens para os utilizadores face aos tradicionais métodos de produção [13]. A hipótese de criar e personalizar produtos de acordo com necessidades e requisitos individuais, que dificilmente se obteriam recorrendo a outros métodos de produção, enquanto estes mantêm altos níveis de complexidade. Face a outros métodos de produção, a impressão 3D tem o potencial para ser mais sustentável e eficiente, visto que pode utilizar menos materiais ao recorrer a valores de preenchimento reduzidos, o que se traduz em menos desperdício, e os objetos fabricados podem ser mais leves e fortes o que aumenta o seu tempo de vida [13].

2.3 Tecnologias

Como já foi referido anteriormente existe uma grande variedade de tecnologias de impressão 3D, no entanto é preferível restringir esta gama para uma tecnologia representativa de cada processo mencionado anteriormente.

2.3.1 Deposição de Material Fundido (FDM)

A tecnologia de deposição de material fundido, mais conhecida por *Fused Deposition Modelling (FDM)*, tem como princípio de funcionamento derreter um filamento de plástico ou metal em cima de uma plataforma de acordo com a peça a imprimir, sendo então classificado como um processo de extrusão [13]. O filamento, inicialmente em estado sólido, passa pela cabeça de extrusão da impressora, que

se encontra aquecida de maneira a derreter o material usado, este é depois disposto em cima da plataforma de maneira a formar uma camada da peça em questão, sendo que o material solidifica imediatamente depois da sua extrusão e a plataforma desce no fim de cada camada completada [23]. A cabeça de extrusão consegue controlar o fluxo do filamento e pode ser movida tanto horizontal como verticalmente através do software adequado [23]. Em certas impressoras existe uma cabeça de extrusão secundária que serve para imprimir as estruturas de suporte, caso necessárias [24].



Figura 2.1 - Ilustração de um sistema de impressão 3D sem a utilização de estruturas de suporte com FDM como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].

O nome e técnica FDM ainda hoje estão patenteados pela *Stratasys*. No entanto, tendo em conta a proliferação, desde 2009, de novos modelos de impressoras no mercado e visto que esta é a tecnologia mais utilizada para impressão 3D, foi criado um processo idêntico ao FDM em tudo menos no nome, denominado *Freeform Fabrication* (FFF). Este processo é então usado sob o nome de FFF por uma grande parte das impressoras existentes, evitando assim quaisquer problemas legais com a *Stratasys* [13].

É uma tecnologia barata, tanto nos materiais (especialmente quando se opta por plástico) como na impressora em si, sendo também consideravelmente rápida (com velocidades de impressão típicas a rondar os 80 mm/s) na impressão de objetos pequenos [23] [24]. Contudo, as peças impressas costumam ter resoluções mais baixas quando comparadas com objetos semelhantes resultantes de outras tecnologias [24].

Esta técnica porém requer estruturas de suporte no entanto estas podem ser impressas com material solúvel em água o que torna a sua remoção mais fácil [13]. Um grande senão é por enquanto a dificuldade de adesão entre as camadas impressas o que resulta em peças permeáveis à água [13].

2.3.2 Sinterização Seletiva (SLS)

Selective laser sintering (SLS) ou *laser melting* é uma técnica que utiliza um laser de alta potência para fundir pequenas partículas (pó) de variados materiais, sendo classificado como um processo de solidificação de pó [23]. O laser é apontado para uma base de material em pó firmemente compactado e traça uma forma de acordo com os dados 3D fornecidos, tal como o laser na estereolitografia, sendo que aqui o laser interage com o material fundindo-o [13]. A cada camada construída a plataforma que suporta toda a impressão desce, para que de seguida um rolo forneça uma nova camada de pó, deixando a superfície da camada seguinte lisa [13]. Na Figura 2.2 é ilustrada a câmara de construção, onde os

elementos já mencionados estão incluídos assim como um segundo depósito e plataforma (esta que sobe a cada camada construída) destinados unicamente ao armazenamento e fornecimento de pó. No seu conjunto estes sistemas encontram-se selados devido à necessidade de manter uma temperatura ambiente específica ao material usado, e mesmo o material em pó é pré aquecido um pouco abaixo do seu ponto de fusão para a facilitar [13] [23].

5

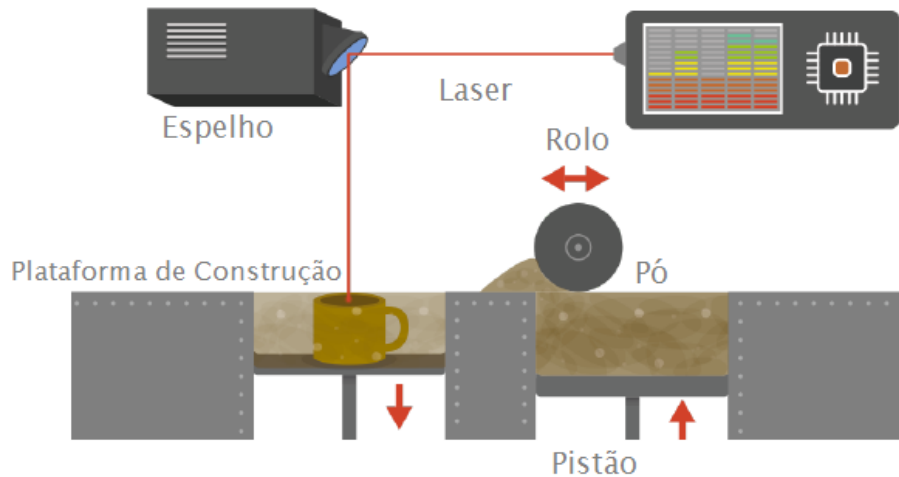


Figura 2.2 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com SLS como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].

Uma das grandes vantagens deste método é poder dispensar a construção de estruturas de suporte, já que o pó comprimido não fundido consegue cumprir esse propósito, e ainda ser viável para reciclagem até cinco vezes sem comprometer a qualidade da impressão [13] [25].

10

Apesar de se poupar algum tempo ao derreter apenas a superfície exterior dos grãos do material usado e não a sua totalidade, as temperaturas elevadas exigidas neste processo podem ainda assim implicar um tempo de arrefecimento mais elevado, resultando assim num tempo total de impressão mais longo [13] [24]. Sendo os objetos resultado de sinterização estes são porosos o que pode exigir que as peças sejam mergulhadas noutra material para melhorar as suas características mecânicas [24].

15

2.3.3 Fusão por Feixe de Eletrões

20

25

Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) ou *Electron Beam Direct Manufacturing (EBDM)* é uma tecnologia que utiliza um feixe de eletrões como fonte de energia para soldar metal sendo que todo este procedimento decorre num ambiente mantido em vácuo para evitar contaminações, enquadrando-se como um processo de deposição direta de energia [13] [14]. Um sistema deste tipo funciona com base num fornecimento constante de fio de metal que é depositado numa plataforma e, graças ao feixe de eletrões, derretido até se parecer com uma poça [14] [26]. De seguida, é através do uso de um computador, que controla a plataforma e o feixe de eletrões, que a poça é então movida em cima de um substrato de maneira a construir a peça desejada [14] [26]. Trata-se de uma tecnologia com um princípio de funcionamento em muitos aspetos semelhante à tecnologia de extrusão FDM.

30

O tamanho das peças construídas pode variar dos milímetros aos vários metros estando apenas dependente do tamanho da câmara de vácuo, em termos de materiais existe uma ampla variedade de ligas metálicas a que se podem recorrer, desde o titânio, aço inoxidável, alumínio, etc. [26]. Tal como com FDM, também com esta tecnologia é possível haver várias cabeças de extrusão, ou fornecedores de fio, o que permite a existência de duas ou mais ligas metálicas fundidas na mesma poça [26]. Esta junção abre portas à criação de novos metais com composições e características diferentes [26]. É

mesmo possível diferenciar as ligas existentes nas várias partes da peça construída consoante a função dessa parte [26].

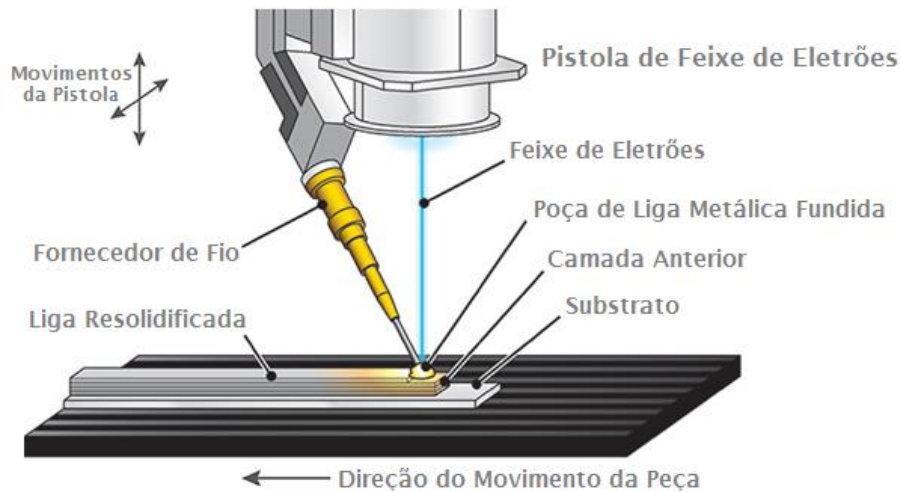


Figura 2.3 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com EBAM como princípio de funcionamento, adaptado de "Wire-based AM vs. Powder-based AM" [26].

5

Existe uma tecnologia intitulada *Electron Beam Melting (EBM)* que é semelhante e facilmente confundível com esta, sendo que funde metal em pó em vez de um fio, assemelhando-se assim por sua vez à tecnologia SLS, com a exceção que com EBM as partículas de metal são totalmente derretidas e não apenas a sua superfície como com SLS [13] [14]. Para além dessa diferença fundamental é também muitas vezes dito que EBM é um processo mais lento e dispendioso quando comparado com SLS [26].

10

2.3.4 Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia, ou *Stereolithography (SLA)*, foi a primeira tecnologia de impressão 3D a ser inventada e o seu funcionamento tem como base a solidificação de uma resina/fotopolímero quando este é exposto a um laser ultravioleta, ou seja é baseado num processo de fotopolimerização [23]. O fotopolímero está dentro de uma tina que também possui uma plataforma móvel no seu interior, sendo que em cada camada o laser é apontado ao fotopolímero com a forma correspondente à secção do objeto a imprimir [6]. Depois do fotopolímero solidificar por ação do laser UV a plataforma móvel vai descer a distância correspondente à espessura especificada para a camada, sendo esta em seguida coberta por mais fotopolímero para a formação de uma nova camada [23]. No fim da impressão e do objeto completo, este é, em primeiro lugar, imerso num banho químico de maneira a eliminar qualquer excesso de resina, sendo depois novamente curado de forma a endurecer completamente o fotopolímero, desta vez num forno ultravioleta [23].

15

20

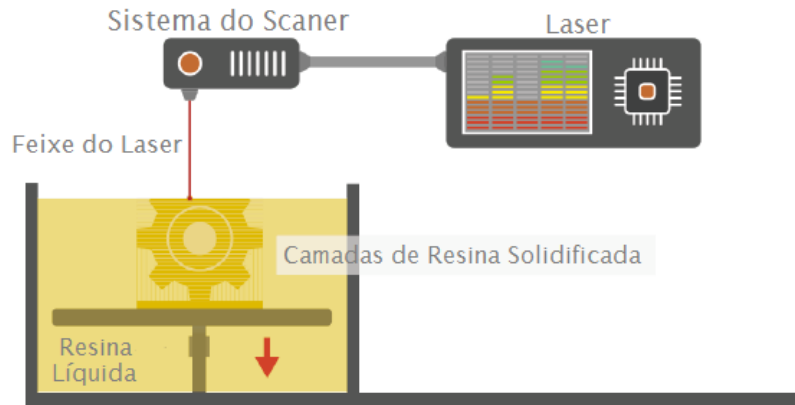


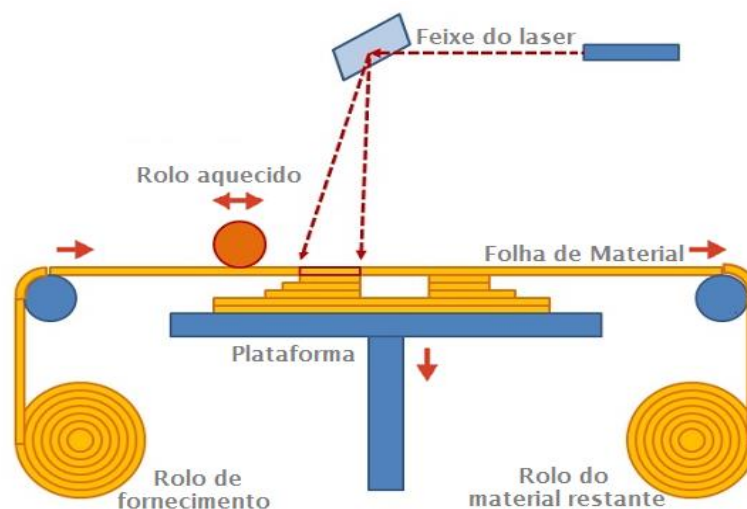
Figura 2.4 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com SLA como princípio de funcionamento, adaptado de 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" [13].

5 As vantagens de usar esta técnica são a sua elogiada precisão, rapidez e superfície bem acabada, considerada a melhor tecnologia neste aspeto por muitos [24].

Contudo esta tecnologia tem as suas desvantagens. Não dispensa o uso de estruturas de suporte, necessárias para proteger certas partes suspensas das peças contra o efeito da gravidade, é considerada uma tecnologia cara tanto a máquina em si como o fotopolímero e o material pode tornar-se quebradiço ao longo do tempo [13] [23].

10 2.3.5 Fabrico de Objetos através de Laminação

Também denominada *Laminated Object Manufacturing (LOM)*, esta tecnologia tem como princípio de funcionamento a colagem de uma fina folha de material à camada anterior, e o consequente recorte desta, de acordo com o desenho fornecido, até criar um objeto 3D, sendo considerado como um processo de laminação de folhas [14]. A fina folha de material é desenrolada de um rolo de fornecimento existente no sistema sendo colada à camada anterior com o auxílio de um rolo aquecido que ao passar por cima da folha derrete uma cobertura de plástico existente na sua parte inferior, servindo assim de cola [24]. O perfil desejado é depois recortado recorrendo a um laser ou a uma lâmina de corte, sendo que o material em excesso é recolhido por um segundo rolo existente no sistema [14] [24].



20 Figura 2.5 - Ilustração de um sistema de impressão 3D com LOM como princípio de funcionamento, adaptado de "Types of 3D printers or 3D printing technologies overview" [27].

Ao usar um material como o papel os objetos ficam com uma aparência e toque semelhante ao da madeira, com custos de material relativamente baixos, no entanto é também possível utilizar folhas de plástico, metal ou cerâmica [24].

5 Contudo quando se recorre a um laser para efetuar o recorte do material, este cria bastante fumo que torna obrigatório o uso de ventilação [24]. É um processo com um desperdício inerente de material muito elevado e em geral os acabamentos e a estabilidade dos objetos criados usando esta tecnologia não são tão bons como com outras tecnologias [24].

2.4 Materiais

10 Como já foi especificado, para diferentes tecnologias existem diferentes tipos de materiais (resina, filamento, pó, granulado, etc.) e dentro desses tipos existem ainda diversas variedades ao dispor dos utilizadores, tais como plásticos, metais, bio materiais, etc. [13].

15 Dentro dos plásticos incluem-se os mais comuns como o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), muito usado em forma de filamento em impressoras de extrusão sendo um material particularmente forte mas que enquanto é impresso liberta vapores possivelmente irritantes para as pessoas mais sensíveis [13] [28]. O PLA (ácido poliláctico) um plástico biodegradável que pode ser usado tanto em filamento como em resina mas que no entanto não é tão flexível ou forte como o ABS [13]. Sem esquecer o Nylon (adipamida polihexametileno) um plástico forte, flexível e duradouro normalmente usado em pó ou filamento [13]. A qualquer um destes materiais podem ser juntados pigmentos, oferecendo uma grande variedade de cores ao consumidor final. Este último enquanto pó pode ainda ser combinado com alumínio em pó para formar *alumide* geralmente usado em sinterização.

20 Em relação aos metais usados, um dos mais fortes e portanto mais usados é o aço inoxidável usado como pó em processos de sinterização, este é naturalmente prateado mas pode ser misturado com outros materiais para ficar com um efeito dourado ou acobreado [13]. O titânio é outro dos materiais mais fortes e tem vindo a ser usado para aplicações industriais também sob a forma de pó [13]. Nos últimos anos tem existido interesse em misturar ouro e prata com outros materiais para desenvolvimento desta tecnologia no ramo da joalheria [13].

Os biomateriais são um ramo com muita investigação centrada em torno deles que podem possibilitar aplicações desde o ramo da medicina até ao ramo da indústria alimentar, como se poderá verificar na secção seguinte [13].

30 2.5 Aplicações

Não é ao acaso que o primeiro termo para impressão 3D era prototipagem rápida, tal como o nome indica, a aplicação inicial da tecnologia era construir protótipos de uma maneira mais rápida e barata para desenvolvimento de produtos na indústria [13].

35 Desde então as ambições e os objetivos foram sendo traçados cada vez mais alto e hoje a impressão 3D tem aplicações no ramo médico, aeroespacial, automóvel, da joalheria, arte, arquitetura, moda, alimentar etc.

40 Para o setor médico a impressão 3D veio abrir um mundo de oportunidades visto ser um ramo com imenso potencial, permitiu formular ideias como a possibilidade de algum dia se conseguir imprimir pele, ossos ou até órgãos com base nas células do paciente, descartando longas listas de espera e eliminando quase por completo qualquer risco de rejeição [23]. Outra aplicação da impressão 3D neste ramo é a de imprimir membros prostéticos especialmente desenhados de acordo com as necessidades e fisiologias específicas dos pacientes [23]. Alguns dos maiores desenvolvimentos nesta área foram a impressão de próteses pela empresa *Bespoke Innovations* (entretanto adquirida pela *3D Systems*), de vasos

sanguíneos pela empresa *Organovo* e, em 2012, a impressão de um maxilar completo, recorrendo à tecnologia SLS, para uma paciente de 83 anos com uma doença crónica de ossos [29] [30] [31].

5 No setor aeroespacial existiu desde cedo um grande interesse na impressão 3D como forma de auxiliar o desenvolvimento de produtos e de construir protótipos [13]. No entanto o futuro da impressão 3D neste ramo reside na criação de peças diretamente a partir de uma impressora e para uso como um produto final [23]. Por enquanto a evolução dos processos e materiais levaram a que já hajam mesmo peças instaladas em aeronaves em funcionamento e à criação completa de aeronaves não tripuladas [13].



Figura 2.6 - Aeronave não tripulada fabricada através da tecnologia FDM pela Stratasys ^a.

10 Em conformidade com este setor também muitas empresas do setor automóvel seguiram o mesmo caminho ao utilizar impressão 3D para produzir protótipos, mantendo em mente o potencial que esta tecnologia poderá trazer na produção de peças sobressalentes ou de substituição, evitando assim o atual acumular de inventário [13]. E.g. a empresa *Local Motors* já imprimiu um carro quase na sua totalidade (75%), o LM3D Swim, composto por uma mistura de ABS e fibra de carbono [32]. Com base nos testes
15 de segurança realizados até hoje, a empresa tem a ambição de que até ao final de 2016 já hajam LM3D's disponíveis para venda ao público [32].

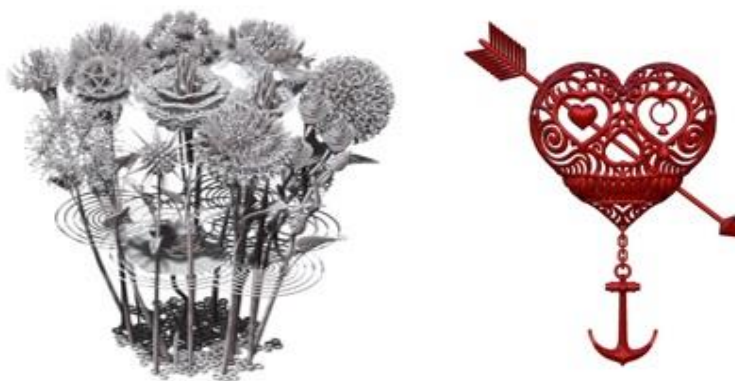
^a "Lightweight 3D printed flight structures" in *Stratasys* <http://www.stratasys.com/industries/aerospace-defense/fdm-uav>



Figura 2.7 - LM3D Swim fabricado através da tecnologia FDM pela Local Motors de “3D-Printed car”, [Online] [32].

5 Existe um grande interesse em como pode a impressão 3D contribuir para o desenvolvimento do setor da joalheria, desde implementar novos projetos, a melhorar os processos tradicionais ou até mesmo imprimir diretamente a joalheria [13]. Assim, onde sempre houve a necessidade de recorrer a vários conhecimentos específicos para o processo de fabrico (moldagem fundição, polimento, lapidação de pedras, etc.), agora torna-se possível saltar intermediários, poupando tempo e dinheiro [13].

10 Para além de existirem já artistas que construíram o seu nome e carreira trabalhando com modelação, digitalização e impressão 3D, como é o caso de Joshua Harker (Figura 2.8), existem muitos mais que interagem com esta tecnologia com um fim de explorar novas formas ou mesmo de aprendizagem [13]. No caso dos escultores torna-se possível a reprodução de réplicas quase exatas de trabalhos históricos ou mesmo mais recentes para possibilitar um estudo mais pormenorizado destas obras [13].



15 Figura 2.8 - Exemplos de trabalhos impressos em 3D, obra do artista Joshua Harker ^b.

No ramo da arquitetura é sabido que antes da implementação de qualquer projeto é apresentado um modelo 3D ilustrativo da visão do arquiteto, tendo isto em consideração é óbvio que ao integrar a impressão 3D neste processo, poderão obter-se modelos detalhados mais facilmente, em menos tempo e com menos dinheiro [13]. No entanto existem já projetos em desenvolvimento com o objetivo de imprimir uma casa inteira. Um exemplo disso é a tecnologia Contour Crafting que promete um tempo de
20

^b <http://www.joshharker.com/blog/>

construção inferior face a uma construção convencional, tal como a redução dos custos totais da obra [33]. Apesar de poder ser utilizada para vários tipos de obras, esta tecnologia tem como potencial aplicação a construção de abrigos em casos de emergência, sendo a sua maior ambição é a construção de estruturas habitáveis fora da Terra, possivelmente em Marte ou na Lua [33].



5

Figura 2.9 - Ilustração de um sistema hipotético de Contour Crafting em ação, de Contour Crafting, [Online] [33].

Mesmo no mundo da moda, já foram impressos e usados em desfiles de alta-costura vários acessórios e até roupa, que graças aos avanços dos materiais são, para além de flexíveis, laváveis [13].

10

As primeiras incursões na impressão de comida foram com chocolate e açúcar, sendo que já foram feitas experiências com a impressão de carne e existe investigação com o intuito de um dia imprimir massa [13].

Capítulo 3– Fundamentos Teóricos

15

Este capítulo tem por fim fazer uma breve introdução teórica ao leitor aos conceitos base muitas vezes referidos neste documento. Tais como:

- Definição de transferência de calor e dos seus três modos, incluindo formulações indispensáveis à resolução de problemas;
- Introdução a estudos térmicos dependentes do tempo, isto é, a situações de regime transiente e também a uma das maneiras mais habitualmente utilizadas para a resolução deste tipo de problemas;

20

3.1 Princípios de Transferência de Calor

Transferência de calor pode ser definida como energia térmica a transitar graças a uma diferença de temperatura espacial, sendo que esta pode ocorrer de três modos distintos: condução, convecção e radiação [34].

25

Quando existe um gradiente de temperatura num meio estacionário (seja ele líquido ou sólido) a transferência de calor que ocorre nesse meio é denominada condução. No caso da convecção esta é caracterizada pela transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento. Sendo a radiação determinada pela emissão de energia, sob a forma de ondas eletromagnéticas, entre

30

duas superfícies [34]. Para cada um destes modos existem equações que permitem a quantificação da energia transferida.

3.1.1 Condução

5 Numa situação onde exista um gradiente de temperatura, as moléculas na região com a temperatura mais elevada contêm uma maior energia interna e, no caso da condução, essa energia é transferida através da agitação microscópica para as moléculas adjacentes, com menor temperatura [35]. Este processo é descrito pela equação conhecida como a *Lei de Fourier* (equação 3.1) [34].

$$q''_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

Sendo k_x a condutividade térmica ($W/m.K$) no eixo do x , no entanto a grande maioria dos materiais são isotrópicos, isto é, a condutividade térmica é independente da direção [35].

10 Considerando um regime estacionário com condução de calor unidimensional em x , num sólido homogéneo de espessura L e com as suas faces sujeitas às temperaturas T_0 e T_L ($T_0 > T_L$) simplifica-se a equação 3.1 para:

$$q'' = \frac{k}{L}(T_0 - T_L) \quad (3.2)$$

15 No entanto não é normalmente este o caso, já que por exemplo, a grande maioria dos edifícios se encontram expostos às mais variadas condições atmosféricas, pelo que os fenómenos físicos devem ser tratados em regime transiente [35]. Todavia é possível tomar uma abordagem de regime estacionário na definição de parâmetros como a resistência térmica de elementos [35].

A partir desta última equação (equação 3.2) é possível definir a resistência térmica de uma superfície com área unitária como:

$$R = L/k \quad (3.3)$$

20 Sendo esta expressa em m^2K/W e apenas aplicável a materiais homogéneos [35]. No caso de um elemento com uma área não unitária é utilizada a resistência térmica absoluta (equação 3.4) expressa em K/W .

$$R^a = L/(kA) \quad (3.4)$$

Num material não homogéneo ou numa estrutura composta por vários materiais a resistência total é calculada pela soma das várias resistências ou pelo inverso da soma do inverso das várias resistências dependendo se estas estão em série (equação 3.5) ou paralelo (equação 3.6).

$$R_{total}^a = \sum_i R_i^a = R_1^a + R_2^a + \dots + R_i^a \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{R_{total}^a} = \sum_i \frac{1}{R_i^a} = \left(\frac{1}{R_1^a} + \frac{1}{R_2^a} + \dots + \frac{1}{R_i^a} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

3.1.2 Convecção

25 Quando um fluido em movimento e uma superfície sólida estão a temperaturas diferentes, existe uma transferência de calor entre estes sob a forma de convecção [34]. Esta convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do fluxo como forçada, quando esta é causada por meios externos tais como uma bomba, ventoinha ou mesmo vento [34]. Por outro lado a convecção pode ser classificada como natural quando causada por diferenças de densidade, que por sua vez são provocadas por diferentes temperaturas do fluido [34].

Independentemente da natureza da convecção, esta pode ser descrita através da equação 3.7, que tem em consideração o coeficiente de transferência de calor por convecção expresso em $W/m^2.K$ e a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [34].

$$q'' = h_c \Delta T \quad (3.7)$$

5 No cálculo deste coeficiente de transferência de calor por convecção é necessário determinar primeiro o número adimensional de *Nusselt* (equação 3.8), que por sua vez pode ser calculado de maneiras diferentes tendo em conta se está em estudo uma situação de convecção forçada ou natural.

$$h_c = Nu \frac{L_c}{k} \quad (3.8)$$

10 No caso de estarmos perante uma situação de convecção forçada o número de *Nusselt* será função do número de *Reynolds* e de *Prandtl*. Primeiramente é efetuado o cálculo do número de *Reynolds* (equação 3.9) que nos dirá qual é a natureza do escoamento (laminar/turbulento) e como calcular posteriormente o número de *Nusselt*.

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (3.9)$$

Sendo ρ a densidade do fluido expressa em kg/m^3 , V a velocidade do fluido expressa em m/s , L_c o comprimento característico da superfície com a qual se dá a convecção expresso em metros e μ a viscosidade do fluido dada em $kg/m.s$ [34].

- 15
- Se $Re < 5 \times 10^5$ trata-se de um escoamento laminar e o número de *Nusselt* é resolvido a partir da expressão:

$$Nu = 0,664 \times Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.10)$$

- Se $Re > 5 \times 10^5$ estamos perante um escoamento turbulento e o número de *Nusselt* é solucionado utilizando a expressão:

$$Nu = 0,037 \times Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (3.11)$$

Por sua vez o número de *Prandtl* é definido pela equação 3.12, onde c representa o calor específico do fluido dado em $J/kg.K$ e k a condutividade térmica do fluido expressa em $W/m.K$ [34].

$$Pr = \frac{c\mu}{k} \quad (3.12)$$

20 No caso de estarmos perante uma situação de convecção natural o número de *Nusselt* passa a ser função do número de *Rayleigh* (equação 3.13) que por sua vez implica o cálculo dos números de *Prandtl* e *Grashof* (equação 3.12 e 3.14). Neste tipo de casos com convecção natural há ainda a distinção da convecção acontecer com uma superfície vertical ou horizontal, e, neste último caso, de haver fluxo de calor ascendente ou descendente.

$$Ra = Gr \times Pr \quad (3.13)$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T\rho^2 L_c^3}{\mu^2} \quad (3.14)$$

25 Com g a representar a aceleração da gravidade expressa m/s^2 , β o coeficiente de expansão volumétrica do fluido dado por $\beta = 1/T$ e expresso em K^{-1} e ΔT a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, expressa em Kelvin [43].

Para um caso de convecção natural com uma superfície vertical o comprimento característico (L_c) desta é dado pelo comprimento ao alto da mesma, sendo que:

- Se $Ra < 10^9$ estamos perante um escoamento laminar e o número de *Nusselt* será dado pela expressão:

$$Nu = 0,59 \times Ra^{1/4} \quad (3.15)$$

- Se $Ra > 10^9$ o escoamento é turbulento e o número de *Nusselt* resulta da expressão:

$$Nu = 0,1 \times Ra^{1/3} \quad (3.16)$$

5 Para uma superfície horizontal com fluxo de calor ascendente (por ex: chão aquecido ou teto arrefecido), o comprimento característico da superfície (L_c) é dado pela razão entre a área superficial e o perímetro da superfície (A_s/P), sendo que:

- Se $Ra < 10^7$ o escoamento é laminar e o número de *Nusselt* é dado por:

$$Nu = 0,54 \times Ra^{1/4} \quad (3.17)$$

- Se $Ra > 10^7$ o escoamento é turbulento e o número de *Nusselt* é dado pela expressão:

$$Nu = 0,15 \times Ra^{1/3} \quad (3.18)$$

10 No caso de uma superfície horizontal com fluxo de calor descendente (por ex: chão arrefecido ou teto aquecido), o comprimento característico da superfície (L_c) é dado de igual forma que para o caso de fluxo ascendente. Neste tipo de casos não há distinção entre escoamento laminar e turbulento, sendo o número de *Nusselt* dado pela expressão:

$$Nu = 0,27 \times Ra^{1/4} \quad (3.19)$$

3.1.3 Radiação

15 Radiação térmica corresponde à radiação emitida por qualquer superfície a uma temperatura superior ao zero absoluto. Considerando um sólido inicialmente a uma temperatura T_s , os seus arredores a uma temperatura T_{sur} , e sabendo que estes estão separados por vácuo, não poderá haver então transferência de calor por condução nem convecção entre o sólido e os seus arredores. É então apenas por radiação que o sólido e os arredores poderão trocar energia, sendo que no caso de $T_s > T_{sur}$ o sólido irá emitir energia enquanto que se $T_s < T_{sur}$ este irá maioritariamente absorver energia [34].
20 Enquanto a transferência de calor por condução e convecção requerem a presença de um meio material, tal não acontece com a radiação, na verdade esta torna-se mais eficiente no vácuo.

A equação da transferência de calor a partir duma superfície apenas retrata a diferença entre a energia térmica libertada através da radiação emitida e a energia assimilada através da radiação absorvida, podendo ser simplificada para a equação 3.20 [34].

$$q_{rad}'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.20)$$

25 Onde σ é a constante de *Stefan Boltzmann* expressa em $W/m^2 \cdot K^4$ e ε a emissividade da superfície [34].

3.1.4 Regime Transiente

30 Considerando situações mais realistas ou problemas com teor prático a transferência de calor é feita em regime transiente, querendo isto dizer que a temperatura vai variar ao longo do tempo. Para perceber e quantificar essas situações é habitualmente utilizado um método em que se assume que os gradientes de temperatura no sólido são desprezáveis, isto é, a temperatura no mesmo é uniforme espacialmente e apenas varia com o tempo. Este método é denominado *Análise Uniforme (The Lumped Capacitance Method* em Inglês) e formula um balanço de energia entre a taxa de calor perdida à superfície e a taxa de mudança de energia interna (Equação 3.21) [34].

$$-E_{out} = E_{st} \quad (3.21)$$

Considerando um sólido de densidade ρ , volume V e calor específico c , que está inicialmente a uma temperatura uniforme T_i e é arrefecido ao ser imerso num líquido a uma temperatura mais baixa, T_∞ , no instante $t = 0$. A temperatura deste sólido vai diminuir por convecção durante $t > 0$ até alcançar o equilíbrio à temperatura T_∞ .

$$-hA_s(T - T_\infty) = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (3.22)$$

5 Sendo h o coeficiente de convecção, A_s a área superficial do sólido em questão e T a temperatura do sólido.

Desenvolvendo a expressão acima (Equação 3.22) e sendo T_∞ constante, é possível obter uma expressão que nos dá diretamente o tempo necessário para que o sólido atinja uma temperatura T (Equação 3.23), outra que nos dá a temperatura alcançada pelo sólido até ao instante t (Equação 3.24) e ainda
10 outra que determina a energia total transferida até ao instante t (Equação 3.25) [34].

$$\frac{\rho V c}{h A_s} \ln \left(\frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \right) = t \quad (3.23)$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{h A_s}{\rho V c} \right) t \right] \quad (3.24)$$

$$Q = (\rho V c)(T_i - T_\infty) \left[1 - \exp \left(- \frac{t}{\tau} \right) \right] \quad (3.25)$$

Sendo τ (equação 3.26) a constante térmica de tempo expressa em segundos, onde um valor mais elevado se traduz num sólido que responde mais devagar às mudanças térmicas do ambiente.

$$\tau = \frac{\rho V c}{h A_s} \quad (3.26)$$

Para verificar então que este método pode ser aplicado a cada caso, é necessário calcular o número adimensional *Biot* (equação 3.27), que providencia uma medida da queda de temperatura no sólido relativamente à diferença de temperatura entre a superfície do mesmo e o fluido. Podendo também ser visto como um ratio entre as resistências do sólido à condução e convecção. Se $Bi \ll 1$ significa que a resistência do sólido à condução é muito menor que a resistência do mesmo à convecção. Na prática se $Bi < 0,1$ tal resultado significa que a distribuição de temperatura no sólido é uniforme, logo a assunção de que os gradientes de temperatura espaciais no sólido são desprezáveis, está correta [34].
15

$$Bi = \frac{R_{t \text{ cond}}}{R_{t \text{ conv}}} = \frac{h L_c}{k} \quad (3.27)$$

O número de *Biot* é naturalmente pequeno para sólidos de pequena dimensão, constituídos por materiais de elevada condutibilidade térmica (ex: metais) e quando o coeficiente convectivo é baixo (ex: convecção natural). Sendo L_c o comprimento característico do sólido em questão, este é geralmente calculado através da expressão:
20

$$L_c \equiv V/A_s \quad (3.28)$$

No entanto para certos sólidos são assumidos outros valores, isto é, para uma parede plana de espessura x , L_c assume habitualmente o valor de $x/2$, para um cilindro longo com base de raio r_0 , assume o valor $r_0/2$ e para uma esfera assume o valor de $r_0/3$ [34].
25

Capítulo 4– Procedimento experimental e resultados

Esta seção tem como objetivo conduzir o leitor pelo decorrer do desenvolvimento da parte experimental desta dissertação. Tal inclui:

- 5 • Uma breve apresentação da impressora utilizada, tal como dos materiais, das propriedades mais relevantes destes e dos parâmetros a considerar na sua impressão;
- A escolha das estruturas a imprimir e a justificação dessa escolha;
- A calibração de vários parâmetros disponíveis na impressão, quais os efeitos da sua variação e a escolha dos valores finais mais adequados;
- 10 • A impressão das peças de teste;
- As medições, o material indispensável às mesmas, a sua metodologia, as decisões tomadas no seu decorrer e os resultados obtidos;
- Apresentação do protótipo final e do seu desempenho.

4.1 Impressora e as suas propriedades

15 A impressora utilizada em todo o decorrer desta dissertação foi a Leapfrog Creatr HS (Figura 4.1 e Anexo Componentes da impressora 3D), uma impressora que utiliza a tecnologia FDM. Esta possui dois extrusores, disponibilizando a possibilidade de utilizar dois filamentos diferentes na mesma impressão, tem uma ventoinha para acelerar o processo de arrefecimento e solidificação do material, um ecrã LCD e um manípulo que permite aquecer os extrusores e a cama de impressão, pôr ou tirar fila-
20 mento e selecionar o ficheiro a imprimir. Para fornecer o ficheiro a imprimir existe ainda a entrada USB que permite a introdução de uma *pendrive* ou a ligação a um computador quando este possui o *software* próprio da impressora (*Simplify3D*) instalado. Tendo em conta que não foi disponibilizada qualquer licença para o uso do *software* da impressora, foi então utilizado o programa *Slic3r*. O trabalho de
25 *softwares* deste tipo são transformar os ficheiros tipo *stl*, feitos através de programas CAD, em ficheiros do tipo *gcode*, que contêm informação quanto aos parâmetros de impressão escolhidos.

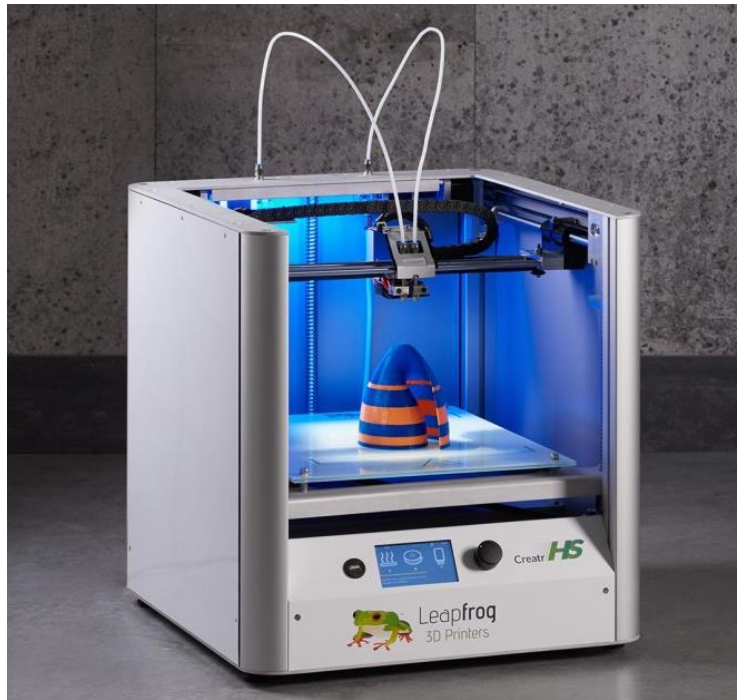


Figura 4.1 - Impressora 3D Leapfrog Creatr HS de "Creatr HS", [Online] [36].

Ao utilizar o *software Slic3r* estão disponíveis para ajuste diversas definições algumas diretamente ligadas ao filamento utilizado, como a temperatura do extrusor e da cama de impressão, a velocidade máxima e mínima da ventoinha, tal como a camada definida para que esta ligue. Dependendo da impressora é possível ajustar no *software* o tamanho da cama, as coordenadas do início da impressão, o diâmetro da cabeça de extrusão e até os comandos que a impressora executará (centrar os eixos, desligar os motores, etc.).

De acordo com o tipo de impressão desejada é também possível determinar o padrão do preenchimento (por ex: retilíneo, concêntrico, favo de mel (*honeycomb*), etc.), a sua densidade e definir se desejado, as camadas com preenchimento sólido. Um parâmetro determinante na qualidade das impressões é o comprimento da retração (filamento puxado para trás no final da impressão de cada camada para evitar acumulação do mesmo). A altura das camadas impressas é também definida pelo utilizador, sendo mesmo possível definir uma altura diferente para a primeira camada. É também possível definir o número de perímetros (contornos exteriores do objeto impresso), a existência de um contorno extra à volta do objeto a imprimir (usualmente utilizado para testar a extrusão do material) ou mesmo a impressão de uma estrutura extra para suporte na parte inferior do objeto, denominada *raft*, ou jangada do inglês.

Para além destas definições é também possível determinar as velocidades para a impressão de perímetros (externos ou internos), preenchimento (com padrão, sólido e o da camada superior), estruturas de suporte e definir uma velocidade completamente à parte para toda a primeira camada. É ainda possível definir uma velocidade para a retração e para a viagem dos extrusores (entre as várias coordenadas numa impressão).

4.2 Propriedades dos materiais escolhidos

Para a realização das impressões havia já disponível o material PLA que, como já havia sido dito, é um plástico biodegradável sendo derivado de recursos renováveis tais como tapioca, açúcar, amido de milho ou de batata. Quando comparado com outros plásticos obtidos a partir de petróleo é claramente uma opção mais amiga do ambiente e pode mesmo ser usado no âmbito da medicina através de, por

exemplo, parafusos implantados, já que este material se degrada entre 6 meses a 2 anos em ácido láctico inofensivo para o corpo humano. A temperatura de extrusão necessária varia entre os 160 e 220 °C, sendo que o uso de cama aquecida não se trata de algo obrigatório, mas pode beneficiar a qualidade dos objetos impressos. É um material que liberta um odor adocicado aquando a impressão, com um arrefecimento lento, sendo por isso aconselhável o uso de uma ventoinha, e que é ligeiramente quebradiço quando arrefecido [28].

Para além de utilizar o PLA era interessante que existisse mais diversidade de materiais de modo a que posteriormente houvesse a possibilidade de optar por aquele que demonstrasse melhor performance, isto é, que mais se adequaria ao projeto. O fato do PLA ter uma temperatura de transição vítrea na ordem dos 60 °C colocava-o à partida em desvantagem relativamente a outros materiais. Esta temperatura define o ponto em que as cadeias poliméricas do material ganham energia suficiente para aumentarem a sua mobilidade na matriz polimérica, isto é passam de um estado rígido para um estado elástico [37]. Trata-se de uma propriedade chave, mais relevante até que a temperatura de fusão, que acaba por definir os possíveis usos e limitações do material em questão.

De vários materiais disponíveis foram escolhidos o ABS, um plástico feito a partir de petróleo e não biodegradável, e o PETG (*Polyethylene terephthalate glycol*), uma versão modificada do normal plástico PET. Sendo que ambos os materiais possuem temperaturas de transição vítrea mais elevadas que o PLA (104 e 81 °C respetivamente). O preço de um enrolamento (+/- 1 kg) para os três materiais é aproximadamente o mesmo, sendo o PETG (28 €) um pouco mais caro que o ABS e PLA (23 €) ^c. A impressão com estes materiais implica por sua vez a alteração dos parâmetros já abordados para o PLA.

No caso do ABS para que as peças impressas adiram à cama, é essencial aquecê-la até aos 90°C e cobri-la com uma mistura de ABS dissolvido em acetona. Tais dificuldades de adesão levam ainda à recomendação de que a velocidade de impressão seja diminuída. É também necessário desligar a ventoinha durante todo o processo, já que este é um material que encolhe quando exposto a diferenças de temperatura bruscas. Este é um filamento que necessita de temperaturas mais elevadas (≈ 240 °C) na cabeça de extrusão, ou seja, para fundir, o que significa que é relativamente resistente ao calor. É um material que apesar de libertar vapores incomodativos para muitos, é forte e até reciclável.

Já o PETG é um material mais fácil de imprimir, ao contrário do ABS este não possui grandes problemas de adesão, sendo que se pode estabelecer uma temperatura inicial da cama de 70°C que descerá posteriormente para valores mais baixos nas camadas seguintes. A temperatura da cabeça de extrusão precisa de estar a 245 °C e a ventoinha ligada. Apesar de não ser um material difícil de imprimir, pode deixar muitos “fios” para trás, sendo aconselhável o aumento da retração e da velocidade desta. No geral é um material forte, durável, mais fácil de imprimir, mais flexível, reciclável e que não liberta odor. Acabando por ser uma combinação de alguns dos benefícios do ABS e PLA [38].

Relativamente à condutividade térmica dos materiais, foram encontradas as distribuições em função da temperatura, somente a partir dos 68 °C, para o PLA e ABS, mas apenas quando este último está exposto a pressões de 20 MPa. Para o PETG não foi encontrada qualquer distribuição em função da temperatura na literatura disponível, apenas uma gama de condutividades sem temperaturas discriminadas: 0,28-0,58 W/m.K. Tendo em conta que a distribuição apresentada para o ABS não se enquadra nas condições esperadas das medições foi também encontrada uma gama de condutividades para este material : 0,18-0,33 W/m.K [39].

^c Preços encontrados para venda de pequenos volumes

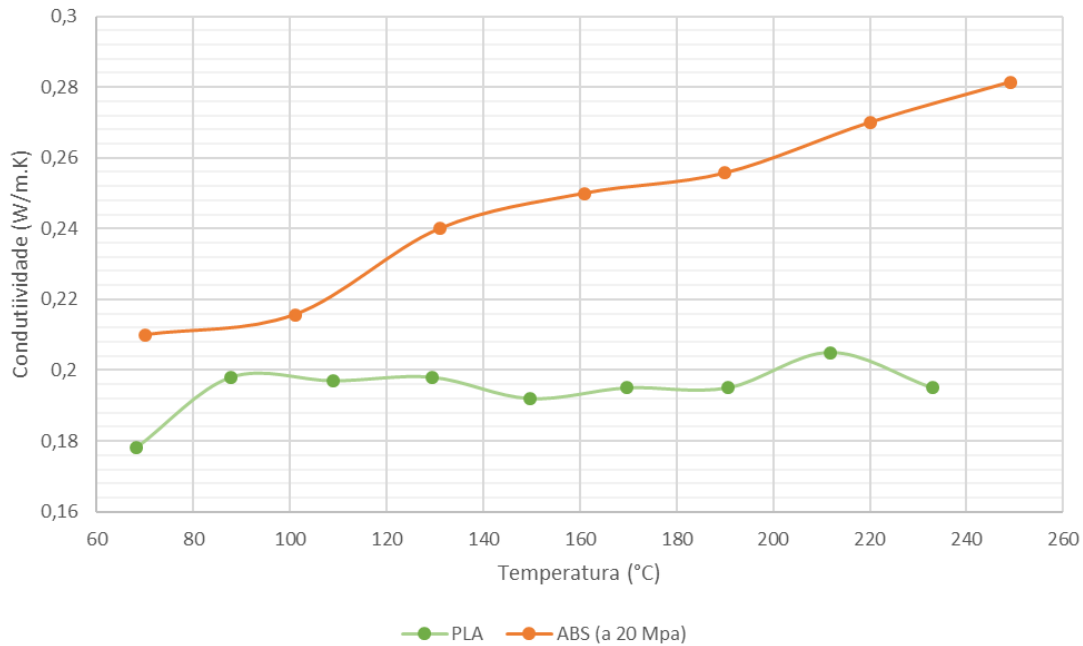


Figura 4.2 - Condutividades do PLA (verde) [40] e ABS a 20 MPa (laranja) [41].

4.3 Escolha das estruturas a imprimir

5 A escolha das estruturas a imprimir foi feita de maneira a que estas fossem adequadas para a realização de uma análise térmica transiente, isto é, para que fosse possível analisar a transferência de calor ao longo do tempo. Para tal foi selecionado um bloco que seria impresso em duas versões diferentes, uma versão consistia no bloco com uma caixa de ar no seu interior, sendo a outra um bloco completamente sólido.

10 A dimensão deste bloco e, conseqüentemente, desta caixa de ar foi escolhida de maneira a que esta representasse uma boa barreira térmica, mas que não fosse grande o suficiente para permitir que houvesse convecção natural no seu interior. Para tal a espessura deveria corresponder a valores em que a convecção seja negligenciável, sendo ainda necessário ter em conta os valores da condução, sendo estes tanto maiores quanto menor for a espessura da caixa de ar [8].

15 Tendo estes fatores em consideração foram impressos, numa fase inicial, blocos de dimensões 25x25x15 mm³ (Figura 4.3 - esquerda) e caixas de ar com 15x15x5 mm³, recorrendo aos três materiais. De maneira a aferir que espessuras resultavam numa estrutura termicamente mais isolante, foram impressos novos blocos após os testes feitos aos primeiros. Tendo estes, espessuras de caixa de ar superiores, nomeadamente 10 e 15 mm, o que resultou em blocos com dimensões totais de 25x25x20 e 25x25x25 mm³ respetivamente.

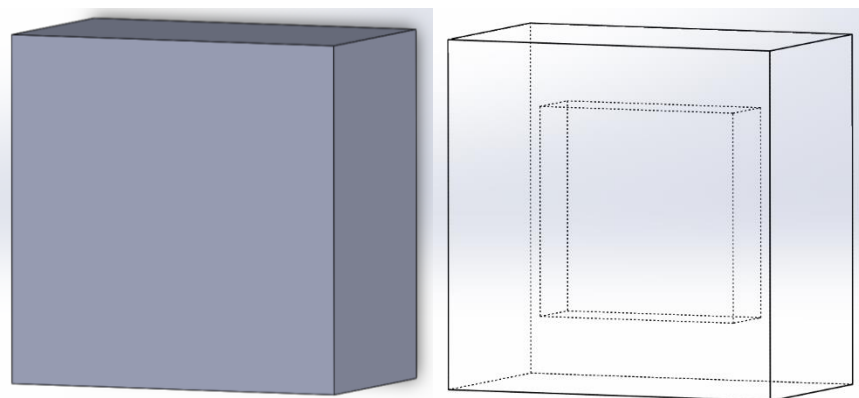


Figura 4.3 - Esquema dos blocos impressos com 25x25x15 mm³. Bloco sólido à esquerda e com caixa de ar à direita.

4.4 Calibração de parâmetros e impressão de peças teste

5 Previamente à impressão de um objeto que estivesse em conformidade com um produto final foi necessária a impressão de várias peças teste para calibrar os vários parâmetros disponíveis no processo de impressão 3D. Apesar de ser uma tecnologia em grande expansão e que evoluiu muito nos últimos anos, existem muitas variáveis a considerar na impressão de um objeto, o que torna uma boa impressão à primeira tentativa praticamente impossível.

10 Tendo em consideração que o objetivo final seria imprimir uma parede ou outra forma com uma caixa-de-ar no seu interior, tornou-se óbvio que independentemente da orientação da peça ia ser necessário nalgum ponto fechar essa caixa-de-ar, isto é, imprimir no ar. Para imprimir troços como estes recorre-se muitas vezes a materiais de suporte, que tal como o nome indica vão ser utilizados para criar estruturas de suporte à estrutura principal para que esta não caia. No final da impressão estas estruturas de suporte são retiradas manualmente ou dissolvidas nalguma substância por já não serem necessárias.

15 No entanto quando o caso é imprimir uma caixa-de-ar fechada não existe hipótese de retirar essas estruturas de suporte no fim da impressão.

Tendo isto em conta, foram feitas algumas experiências para as quais foram ajustados certos parâmetros que se pensavam vir a permitir a impressão de estruturas de qualidade aceitável no ar sem o uso de qualquer apoio. Os parâmetros ajustados foram:

- 20 • *Bridges speed* – o software (*Slic3r*) diferencia várias velocidades para diferentes partes da impressão (perímetros, perímetros externos, preenchimento, preenchimento sólido, material de suporte, etc.), sendo esta uma dessas velocidades. Esta é definida pela velocidade em que são impressas as tais “pontes” (*bridges* em inglês) de material sem qualquer suporte;
- 25 • *Bridges flow ratio* – interfere na quantidade de filamento libertada no momento da impressão de pontes, podendo ser reduzido para impedir que essas pontes abalem ou se desfaçam;
- 30 • *Retraction length* – quando a cabeça de extrusão viaja durante a impressão muitas vezes deixa um rasto de filamento derretido no meio das peças, podendo mesmo haver acumulação de plástico nestas o que acaba por deformar a peça em questão. Para evitar que isto aconteça é possível ativar a retração que consiste em puxar para trás um certo comprimento de filamento, reduzindo a acumulação de plástico;
- *Infill density* – é possível escolher uma densidade de preenchimento desde os 0 aos 100%, o que oferece a possibilidade de manter uma estrutura suficientemente sólida enquanto se poupa material.

Feitas as experiências é possível verificar que destes fatores apenas os dois primeiros têm direta influência no sucesso da impressão de pontes, sendo que os outros dois somente auxiliam à obtenção de um objeto de melhor qualidade, ao conseguir limitar acumulações indesejáveis de material.

No final da realização destas experiências obtiveram-se sete estruturas (Tabela 4-1), todas com a mesma forma (Figura 4.4), diferenciadas apenas pelo seu tamanho e parâmetros com que foram impressas. A forma destas estruturas surgiu da curiosidade em perceber até que dimensão seria possível imprimir estas pontes, no entanto ao entender que tal era possível para uma estrutura com 10 cm de comprimento, não houve necessidade de imprimir peças mais compridas visto que as peças teste planeadas nunca alcançariam dimensões tão elevadas.



Figura 4.4 - Desenho original para testar a impressão de pontes, impresso em diversos tamanhos.

Tabela 4-1 - Estruturas teste impressas e parâmetros variados na sua obtenção.

Estrutura n°	Tamanho (cm)	Bridges speed (mm/s)	Bridges flow ratio	Retraction length (mm)	Infill density (%)
1	7,5	15	1,25	2	30
2	7,5	30	1,25	3	30
3	10	45	1,25	3	30
4	7,5	50	1,25	3	25
5	10	100	1,25	3	25
6	7,5	100	1,25	3	25
7	10	50	1,15	3	25

Através da impressão das estruturas n°1 e 2 foi possível averiguar que o processo corre melhor ao definir uma velocidade mais elevada do que um valor baixo (30 mm/s face a 15 mm/s), ficando a estrutura n°2 todavia um pouco abaulada. Nas seguintes estruturas foram utilizadas diferentes velocidades com o objetivo de obter o menor abaulamento possível, no entanto não foram conseguidas reduções visíveis, obtendo mesmo resultados piores nas estruturas n°5 e 6 onde a velocidade de impressão foi definida para os 100 mm/s. Tendo isto em conta é seguro afirmar que quaisquer velocidades entre os 30 e 50 mm/s serão adequadas para a impressão de pontes.

Relativamente aos outros parâmetros, não foram verificadas diferenças na qualidade das pontes ao alterar o *bridges flow ratio*, com o aumento da *retraction length* foi possível observar alguma melhoria nos acabamentos das peças e a diminuição do *infill density* permitiu poupar material sem qualquer alteração aparente na robustez da estrutura.



Figura 4.5 - Estrutura impressa nº7 (Tabela 4-1).

Todas as estruturas impressas ficaram visivelmente abauladas, tal como a estrutura nº7 apresentada na Figura 4.5, tendo estes resultados em conta, o passo seguinte desta fase de testes foi averiguar se o mesmo acontecia com estruturas de dimensões mais reduzidas, ou seja mais semelhantes às peças de teste desejadas.

Foram então impressas duas estruturas com uma estrutura de acordo com a Figura 4.6 (esquerda), tendo uma delas dimensões de $15 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ e outra de $22 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$, sendo que em ambas o abaulamento foi praticamente desprezável. É possível também reparar na diferença de qualidade entre as duas estruturas impressas graças ao aumento de retração (2 para 4mm) da primeira para a segunda. (Figura 4.6 – centro e direita).



Figura 4.6 - Estrutura de dimensões mais reduzidas (esquerda) e estruturas impressas com $15 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ (centro) e $22 \times 15 \times 18 \text{ mm}^3$ (direita).

Para avaliar a diferença que a constituição da restante estrutura iria fazer, foi considerada interessante a impressão de estruturas em que as paredes destas fossem completamente sólidas. Isto é concretizável de duas maneiras: imprimir com uma densidade de preenchimento de 100% (Figura 4.7 - esquerda); imprimir com uma densidade de preenchimento de 0% e apenas com perímetros (no caso da impressão de um quadrado, a impressora faz quadrados concêntricos até preencher toda a área interior do mesmo) (Figura 4.7 - centro). Ambas as metodologias foram experimentadas, sendo a primeira considerada mais eficaz. Para que as estruturas impressas segundo esta metodologia não resultassem numa



Figura 4.7 - Paredes sólidas impressas de diferentes maneiras (esquerda e centro) e sem os parâmetros ajustados (direita).

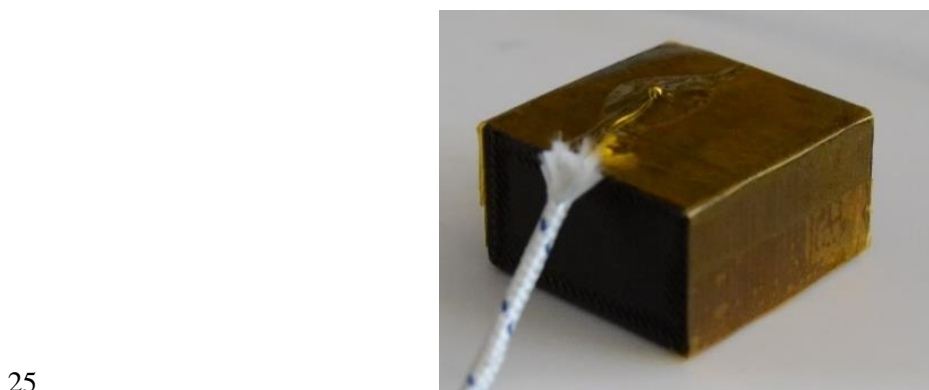
peça defeituosa por acumulação excessiva de material (Figura 4.7 - direita) foi necessário alterar novamente alguns parâmetros. O *extrusion multiplier*, que define a porção de filamento extrudido, foi diminuído do valor padrão 1 para 0.9, a retração de filamento foi elevada para 4 mm e a velocidade máxima da ventoinha foi ligeiramente aumentada.

- 5 Na impressão das peças teste utilizando o PLA, a temperatura de extrusão foi definida para os 200 °C, sendo a cama de impressão aquecida a 40 °C. No caso do ABS e do PETG as temperaturas de extrusão utilizadas foram as já mencionadas acima, sendo que os valores de retração utilizados para o PETG foram de 5 mm e velocidade desta alterada para os 15 mm/s (ao invés dos normais 10 mm/s).

4.5 Medições

- 10 Ainda anteriormente à realização das medições, as superfícies dos blocos foram lixadas para providenciar uma área de contacto mais adequada possível para realizar as medições.

15 As medições feitas foram realizadas recorrendo ao uso de uma placa aquecedora (VWR VMS-C10), fita do tipo kapton, massa térmica, dois termopares, dois multímetros, uma câmara térmica e um cronómetro. A temperatura da placa aquecedora era regulada através da temperatura lida pela ponta de medição desta, no entanto em todo o decorrer das medições foi difícil obter uma temperatura estável na placa (se a temperatura desejada fosse os 60°C esta oscilaria entre os 60-70°C). A fita do tipo kapton foi colocada à volta de todos os blocos, sendo depois colocada massa térmica na face que estaria em contacto com a placa para que esta maximizasse a transferência de calor. Para que fosse possível utilizar a massa térmica, mas não fosse necessário sujar a placa aquecedora foi colocada uma folha de alumínio entre esta e os blocos. O primeiro termopar foi fixado no centro da face que estava virada para cima com o auxílio da fita do tipo kapton, de maneira a controlar a evolução da temperatura do bloco ao longo do tempo (Figura 4.8). O segundo termopar era fixo em cima da placa aquecedora, também com a fita do tipo kapton, mesmo ao lado do bloco para que a temperatura da placa nesse sítio pudesse ser aproximada à temperatura de baixo do bloco.



25 Figura 4.8 - Ilustração da colocação do primeiro termopar no bloco fixo com a fita do tipo kapton.

30 Antes do início das medições foi verificado se a distribuição da temperatura no topo da placa era uniforme através da câmara térmica, obtendo a Figura 4.9 (esquerda) que nos permite ver duas zonas separadas de aquecimento. Tendo isto em conta ao longo das medições os blocos foram colocados na zona central de uma destas zonas. Na segunda figura (Figura 4.9 - direita) é possível observar que a base do bloco está a quase 51 °C (valor em concordância com a temperatura dada pelo termopar), em vez dos definidos 40 °C, comprovando assim a situação descrita anteriormente, que a temperatura da placa varia muito da do *set point*.

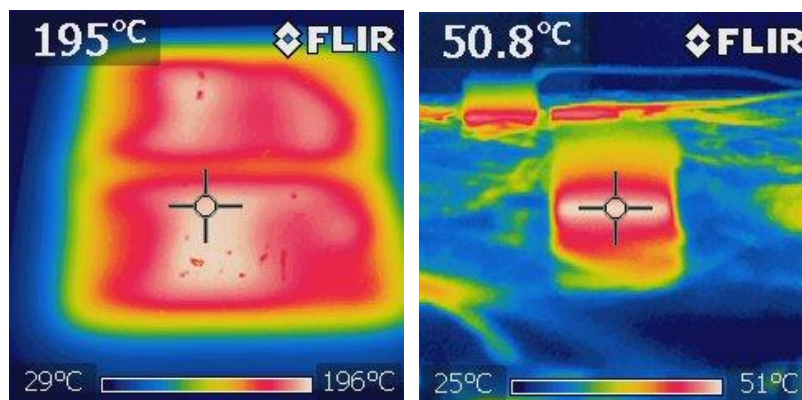


Figura 4.9 - Imagens obtidas pela câmara térmica da distribuição de calor na placa aquecedora (esquerda) e da temperatura da base do bloco (direita).

5 O processo das medições era composto primeiramente pelo aquecimento da placa e espera pela estabilização da temperatura desta, enquanto isso era registada a temperatura ambiente, sendo de seguida colocado o bloco, à temperatura inicial (T_i) e no instante inicial (t_0), na placa aquecedora. A evolução da temperatura do bloco, contabilizada pelo primeiro termopar, era então registada de 3 em 3 décimas de grau (valor escolhido *a priori*) tal como o tempo decorrido correspondente, contabilizado este pelo cronómetro. A medição era dada como terminada cerca de dez minutos depois da temperatura do bloco
10 parar de aumentar.

Nas primeiras medições, realizadas com uma temperatura da placa de ≈ 40 °C, foi verificado que a folha de alumínio nem sempre fazia bom contacto com a placa aquecedora, tornando difícil a obtenção da temperatura exacta da mesma (Figura 4.10 - (1)). Tal circunstância levou à sua substituição, tendo sido experimentada uma peça de alumínio de dimensões $50 \times 50 \times 15$ mm³ com um orifício no interior desta onde era colocado o segundo termopar (Figura 4.10 - (2)). No entanto as medições com recurso a esta peça revelaram-se mais demoradas (cerca de 10 minutos adicionais), visto que era necessário esperar que toda a peça de alumínio aquecesse e não apenas a placa aquecedora, para além de que os ΔT finais dos blocos eram superiores do que aqueles obtidos com o uso do papel de alumínio.
15

Sabendo que as medições foram todas efetuadas no mesmo local, com uma temperatura ambiente aproximadamente constante e que os blocos utilizados nestas medições foram os mesmos, é viável dizer que os blocos não ficaram mais isoladores de um dia para o outro. Sendo que a razão de se verificar um ΔT final superior quando se utilizou a peça de alumínio ao invés do papel, é que esta, apesar de ser feita de um material condutor, apresenta uma resistência térmica também superior causada pela sua espessura (15 mm). Este resultado pode também ser atribuído ao facto do termopar estar colocado no interior da
20 peça em vez de na sua superfície. De qualquer forma ao assumir que a localização do termopar é significativa torna-se óbvio afirmar que haverá um gradiente de temperatura considerável ao longo da espessura da peça de alumínio o que não a torna de todo ideal para estas medições.
25

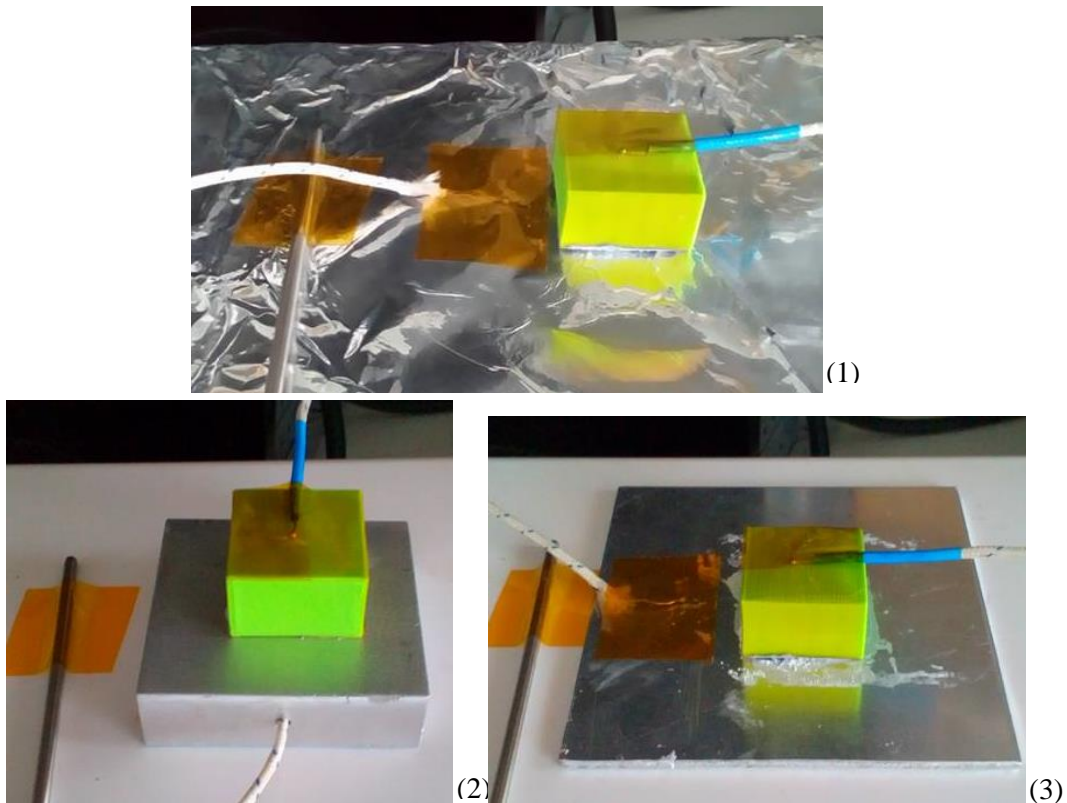


Figura 4.10 - Figuras das três bases experimentadas para os blocos impressos. (1) - O papel de alumínio; (2) - A peça de alumínio com 5 mm; (3) - A chapa de alumínio com 2 mm.

Como alternativa foi utilizada uma chapa de dimensões 50x50x2 mm³ (Figura 4.10 – (3)) em que o segundo termopar era colocado na superfície desta em vez de na superfície da placa. As medições recorrendo a esta chapa resultaram em ΔT finais mais reduzidos o que a indicou como a melhor opção para a realização das medições.

5 Os ΔT finais para o material ABS utilizando o papel, peça e chapa de alumínio são então demonstrados na Tabela 4-2, sendo que o comportamento dos outros materiais segue uma lógica idêntica. Nestes resultados é também possível verificar desde já que o ΔT final nos blocos sólidos é sempre mais reduzido do que nos blocos com caixa de ar, resultado expectável e que também se repetiu com os restantes materiais.

10 Tabela 4-2 – ΔT 's finais para o material ABS utilizando o papel, peça e chapa de alumínio.

ABS – ΔT final	Bloco com caixa de ar	Bloco sólido
Papel de alumínio	13,1 °C	10,6 °C
Peça de alumínio 15 mm	13,2 °C	10,8 °C
Chapa de alumínio 2 mm	12,8 °C	10,3 °C

Depois de averiguar que a chapa de alumínio com 2 mm era a melhor opção, foram feitos testes com outras temperaturas da placa aquecedora, isto é, com diferentes *set points*, neste caso de 60 e 80 °C de maneira a estudar o comportamento dos materiais com as variações de temperatura.

Nas medições com um *set point* de 40 °C anteriormente feitas foi possível averiguar que o material com o melhor desempenho, ou seja, que revelava um maior ΔT final entre a face em contacto com o alumínio e a face oposta (virada para cima), era o ABS (Figura 4.11). Revelando o PLA a segunda melhor performance e o PETG a pior.

5 No caso das medições com um *set point* de 60 °C, os papéis invertem-se passando o PLA para primeiro lugar, o ABS para segundo e mantendo-se em último o PETG (Figura 4.11). Tal diferença de desempenhos nos materiais é justificável através da mudança da sua condutividade térmica para diferentes temperaturas (Figura 1.1).

10 Por último, nas medições com um *set point* de 80 °C, o bom desempenho do PLA torna-se mais óbvio sendo que assegura uma diferença de temperatura quase 10 °C superiores quando comparado com o material mais condutor, desta vez novamente o PETG (Figura 4.11).

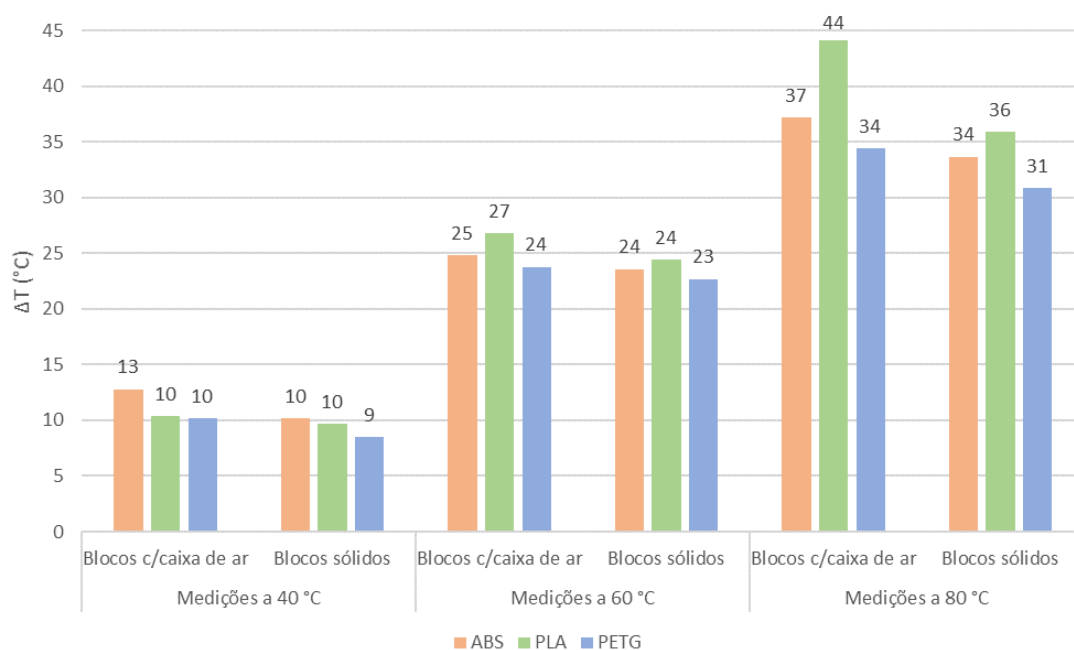


Figura 4.11 - ΔT 's finais para os blocos com e sem caixa de ar, dos três materiais nas várias medições.

15 Através destes resultados é possível estimar que para temperaturas na ordem dos 40 °C a condutividade do ABS seja inferior à do PLA, e que para todas as restantes temperaturas a do PETG seja sempre superior à destes dois materiais, tal como já havia sido visto através das gamas de condutividade acima descritas.

20 Também é possível verificar os mesmos resultados das medições a 40 °C na Figura 4.12, ao observar que o bloco de ABS (cor laranja) não aqueceu tanto como os blocos dos outros materiais. No entanto a avaliação dos materiais a partir dos gráficos nem sempre é fidedigna, havendo casos em que o material que apresenta o maior ΔT final não é necessariamente o material que menos aqueceu. Tal acontece devido ao fenómeno que já foi mencionado anteriormente: durante o decorrer das medições a temperatura da placa esteve constantemente a oscilar. Mesmo sem alterar o *setpoint* a temperatura podia ir dos 60 aos 70 °C, ou seja um material que apresente temperaturas mais baixas no gráfico não é forçosamente o que isola melhor, apenas pode ter sido alvo de temperaturas mais baixas por parte da placa aquecedora. Os gráficos para os blocos sólidos e para as restantes temperaturas são apresentados no anexo Gráficos da evolução das temperaturas dos blocos sólidos e com caixa de ar sujeitos aos vários *set points*.

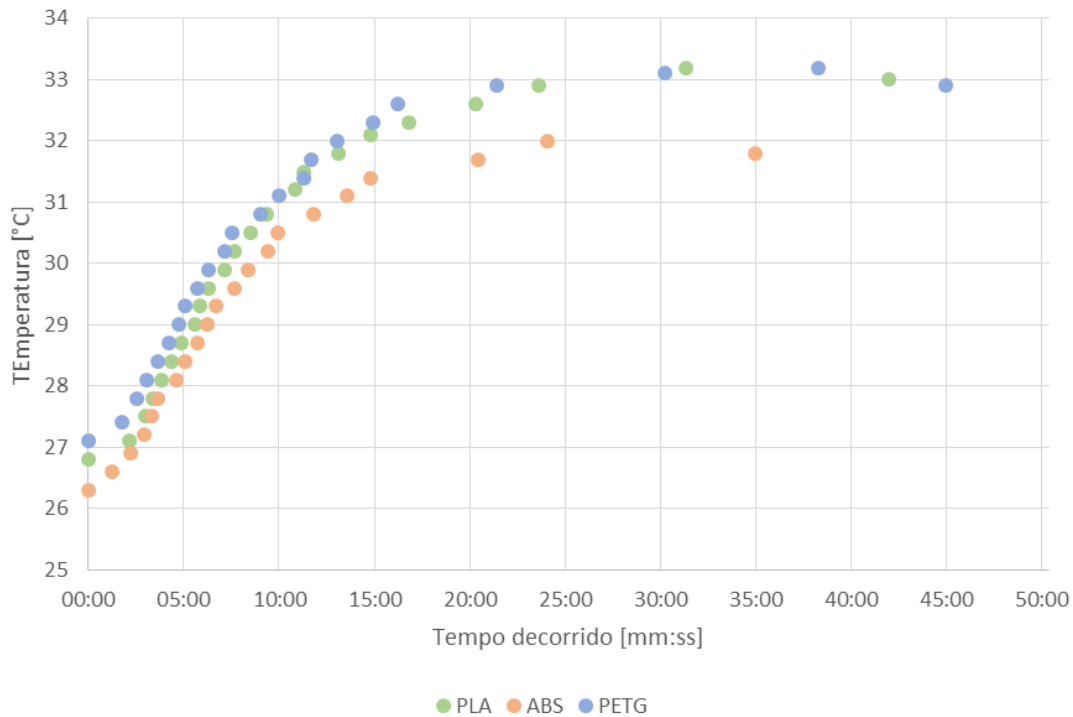


Figura 4.12 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, com caixa de ar, nas medições a 40 °C.

5 O comportamento do PLA nas medições a 60 e 80 °C foi surpreendente, tendo este material à partida a tendência para ficar plástico a partir dos 60 °C. Esse fenómeno não se fez notar em toda a duração das medições provavelmente graças à elevada robustez dos blocos.

10 Ao longo das medições foi utilizada a câmara térmica na análise das distribuições de temperatura dos blocos sólidos face aqueles com caixa de ar. O objetivo desta análise era aferir se, também com a câmara, eram notadas diferenças entre os dois tipos de blocos, tal como ocorreu nas medições. No entanto não foi observada qualquer diferença entre os blocos com e sem caixa de ar, devendo-se isto provavelmente à dimensão diminuta destes.

15 Posteriormente à realização destes testes, foi decidido apenas prosseguir com blocos impressos em PLA, devido à melhor performance deste material para temperaturas elevadas e à facilidade com que se consegue imprimir. É de frisar no entanto que o material adequado dependerá sempre da aplicação desejada para o objecto impresso.

20 Para aferir se a transferência de calor na caixa de ar era afectada pela sua largura, comprimento e pelas paredes do bloco, foi impressa uma versão maior do bloco com dimensões 50x50x15 mm³ com uma caixa de ar no seu interior de 40x40x5 mm³ (Figura 4.13). Desta forma tornaria-se possível perceber se a temperatura no centro da caixa de ar era influenciada de forma significativa pelo aquecimento das paredes laterais do bloco. Já a pensar em futuras aplicações, onde 15 mm de espessura numa estrutura

se revelassem pouco práticos foi também impresso um bloco com uma espessura de 6 mm ao invés dos anteriores 15 e uma caixa de ar com 2 mm em vez dos anteriores 5 (Figura 4.14).

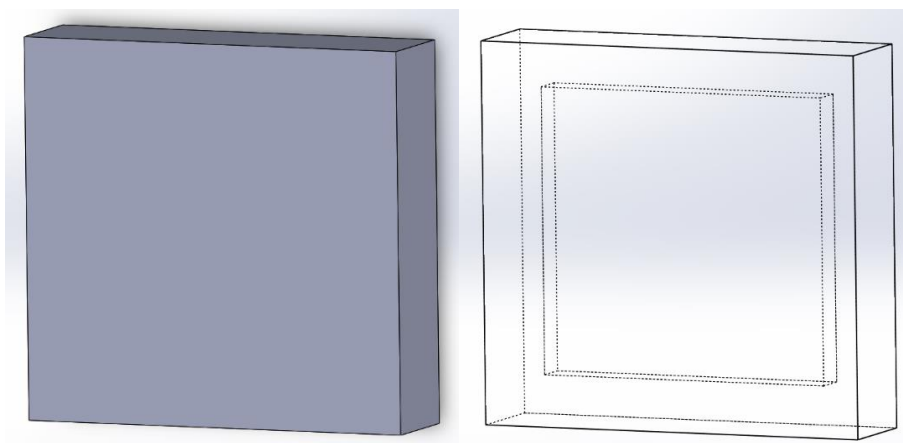


Figura 4.13 - Desenho do bloco com dimensões $50 \times 50 \times 15 \text{ mm}^3$ com a sua caixa de ar visível à direita.



Figura 4.14 - Bloco de $25 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ ao lado de um bloco com $25 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$.

5 Os resultados das medições posteriormente feitas com esses novos blocos para as várias temperaturas já testadas são apresentados na Tabela 4-3, onde se pode verificar que qualquer uma das novas estruturas teve um pior desempenho que a original de $25 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$. Tal resultado era espectável para a estrutura com espessura de 6 mm (menos material isolante significa automaticamente menos isolamento e uma caixa de ar menor vai levar a uma condução mais elevada), sendo que para a estrutura de largura e comprimentos maiores este resultado pode ser explicado pelas perdas por convecção mais reduzidas que no bloco mais pequeno.

15 Ao considerar a ventilação do laboratório onde ocorreram as medições, é possível assumir que uma pequena porção da convecção sentida nos blocos, se trata de convecção forçada. No entanto essa porção mantém-se inalterada durante todas as medições ao contrário da convecção natural. É portanto normal que essa convecção forçada se faça sentir ligeiramente mais num bloco pequeno do que num maior. Sendo assim, a face superior do bloco de dimensões maiores, irá manter-se mais quente, o que levará a um ΔT mais reduzido, isto é, a um aparente pior desempenho (o bloco não é estruturalmente pior, apenas está a ser mais arrefecido).

Tabela 4-3 - ΔT 's finais dos diferentes blocos de PLA para as diferentes temperaturas.

PLA - ΔT final	Bloco 25x25x15	Bloco 50x50x15	Bloco 25x25x6
40 °C	10,4 °C	9,2 °C	7,6 °C
60 °C	26,8 °C	24,9 °C	14,9 °C
80 °C	44,1 °C	40,3 °C	24,5 °C

5 Foi ainda decidido estudar se imprimir os blocos com paredes sólidas tinha realmente tantas vantagens face a uma impressão com um preenchimento padrão ($\approx 30\%$) (Figura 4.15), tendo sido impressos dois blocos de dimensões $25 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$ com o material PLA, um com a habitual caixa de ar e outro sem a mesma.



Figura 4.15 - Aparência de uma peça com preenchimento de 30%.

10 Tendo em conta os resultados obtidos foi elaborada a Figura 4.16 para facilitar a comparação dos dados. É então possível concluir que para a gama de temperaturas dos 40 °C os blocos impressos com 30% de preenchimento têm um desempenho claramente melhor que os blocos impressos com paredes sólidas. No entanto para as restantes temperaturas de teste os resultados ficaram divididos. As estruturas com caixa de ar e paredes sólidas tiveram uma melhor performance que as homólogas com 30% de preenchimento. Sendo que para os blocos sólidos foram os blocos impressos com 30% de preenchimento
15 que tiveram o melhor desempenho ao invés daqueles com paredes sólidas. Também nestas medições não houve qualquer transição para uma natureza plástica da parte do PLA.

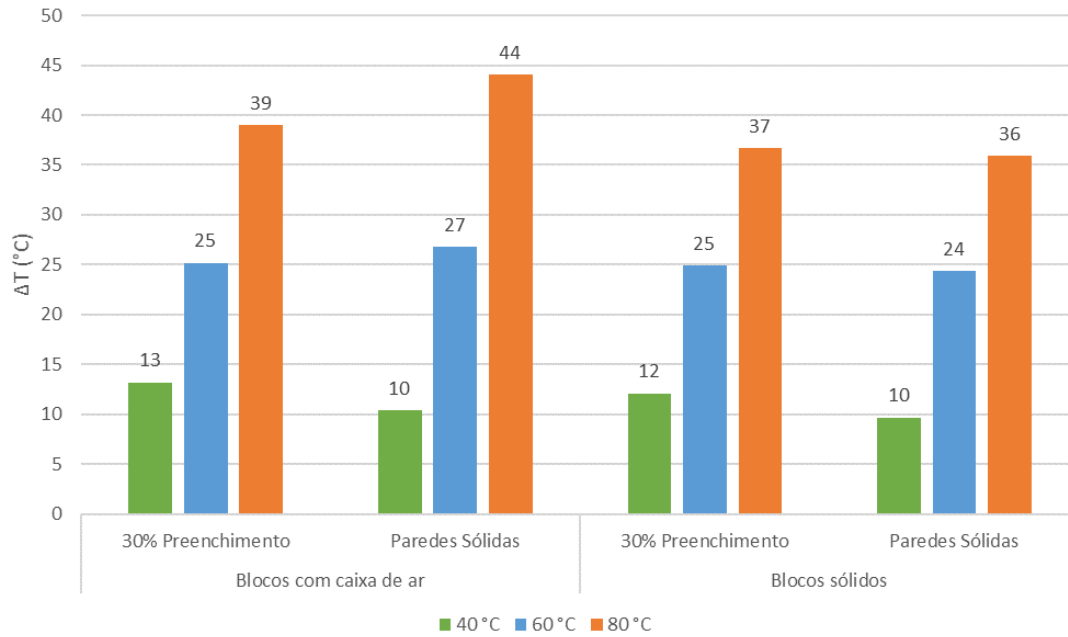


Figura 4.16 - Comparação dos ΔT 's finais para os blocos com caixa de ar e sólidos, entre aqueles impressos com paredes sólidas e com 30% de preenchimento, para as várias temperaturas de teste.

Um resultado deste tipo pode ser explicado pela forma como os blocos são impressos. Mesmo quando se opta por um preenchimento de uma certa percentagem, as camadas superiores e inferiores da estrutura têm de ser sólidas, se não o resultado será uma estrutura com o seu interior à mostra como se vê na Figura 4.15. No caso do bloco sólido (sem caixa de ar) este terá então três camadas (valor predefinido) sólidas na sua parte de cima e de baixo. Contudo, no caso do bloco com a caixa de ar (Figura 4.17), este terá seis camadas sólidas adicionais, três na parte de baixo da caixa de ar e outras três na parte de cima.

Foi também observado que ao pesar estes dois blocos, o bloco sólido era mais leve que aquele com a caixa de ar, algo que nunca se tinha passado com os outros blocos impressos e que também se justifica pela presença extra de camadas sólidas. Esta definição do *software* no entanto não pode ser desativada sem eliminar todas as camadas sólidas.

Até este ponto a configuração que se revelava a melhor para utilizações a altas temperaturas seria um bloco de PLA com caixa de ar no seu interior e paredes sólidas.

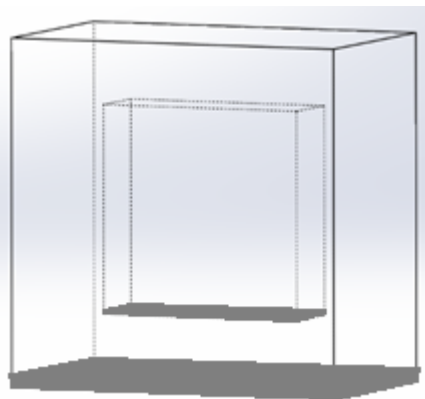
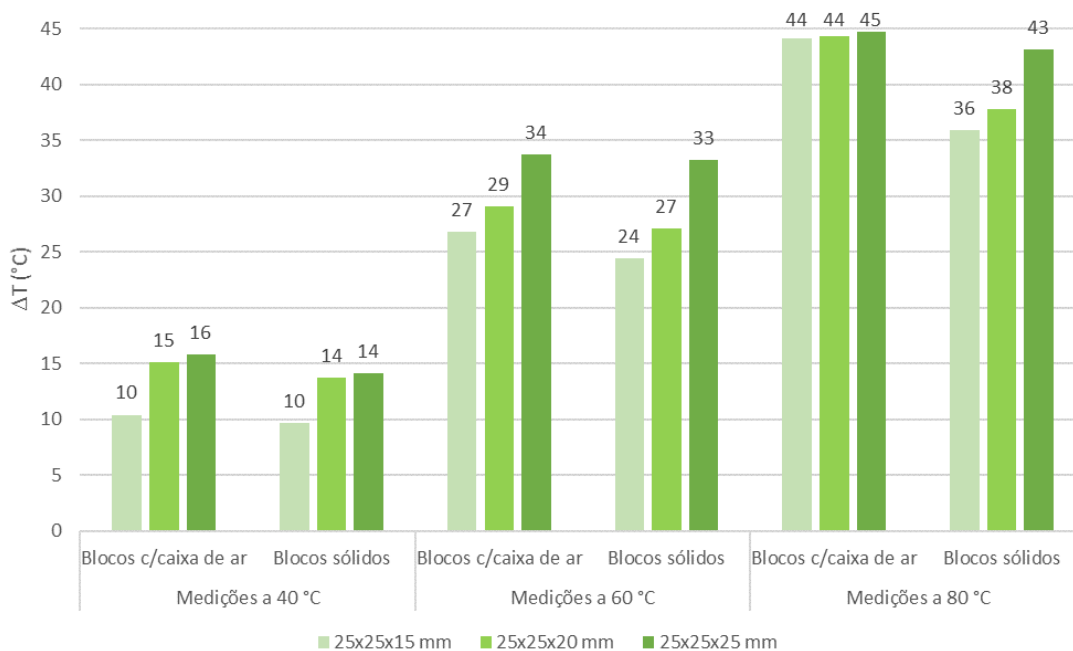


Figura 4.17 - Ilustração apenas das camadas sólidas inferiores impressas num bloco com caixa de ar e preenchimento de 30%.

Por fim, para averiguar qual seria a espessura da caixa de ar mais indicada para fins de isolamento, foi decidido variar a espessura desta e as dimensões dos blocos, imprimindo-os com dimensões de 25x25x20 e 25x25x25 mm³ e caixas de ar com espessuras de 10 e 15 mm respectivamente.

5 Foram realizadas as medições com os novos quatro blocos, comparando os ΔT 's com os anteriormente obtidos com os blocos já testados na Figura 4.18. Ao analisar os resultados alcançados é possível observar uma melhoria geral nos blocos de dimensões superiores (com e sem caixa de ar) para as várias temperaturas. Sendo essa melhoria menos acentuada, mas ainda presente, para as medições a 80 °C com os blocos com caixa de ar, onde os ΔT 's obtidos são praticamente iguais, diferindo apenas em algumas décimas.



10

Figura 4.18 - Comparação dos ΔT 's finais para os blocos com caixa de ar e sólidos com caixas de ar de 15, 20 e 25 mm, para as várias temperaturas de teste.

Através dos vários ΔT é possível concluir que para lidar com temperaturas entre os 40 e 60 °C é mais vantajoso utilizar estruturas com uma caixa de ar maior, isto é, de 15 mm. Sendo que para uma utilização sujeita a temperaturas mais elevadas o ideal será optar por estruturas maiores (25x25x25 mm³) no caso de não possuírem caixa de ar, e por estruturas de espessuras entre os 15 e 25 mm com uma caixa de ar no seu interior.

4.6 Protótipo

20 Por fim foi desenhado e impresso, um protótipo de uma manga para os copos de café utilizados nas máquinas da FCUL (Figura 4.19). As paredes desta manga foram baseadas no bloco com dimensões 25x25x6 mm³ tendo uma caixa de ar de 2 mm no seu interior, já que 15 mm de espessura seria muito pouco prático de usar.



Figura 4.19 - Impressão do protótipo de uma manga para um copo de café (esquerda) e protótipo já impresso com um copo de café (vazio) no seu interior.

5 Graças a medições feitas anteriormente sabia-se que a temperatura inicial do café era da ordem dos 70 °C e que aos 46 °C o copo já tinha arrefecido o suficiente para que fosse suportável agarrá-lo com a mão, sem qualquer manga o café demorou 14 minutos e 36 segundos a alcançar essa temperatura. Tendo essa temperatura em consideração e presumido que a grande maioria das pessoas bebe o seu café nos primeiros cinco minutos, não se continuaram as medições para além dos 46 °C.

10 Para testar o protótipo foram postos termopares na parte exterior e interior da manga e finalmente colocado um copo com um café no interior desta, sendo a evolução de ambas as temperaturas apresentadas na Figura 4.20 onde se pode ver que a temperatura do exterior da manga nunca ultrapassa os 35 °C não correndo o risco de queimar o utilizador (para que houvesse risco de queimadura a manga teria de estar a 50 °C e o contacto entre esta e a mão do utilizador teria de ser superior a 1 minuto) [42].
15 É também possível observar na Figura 4.20 que fazendo uso da manga o café demorou 22 minutos e 45 segundos a atingir os 46 °C.

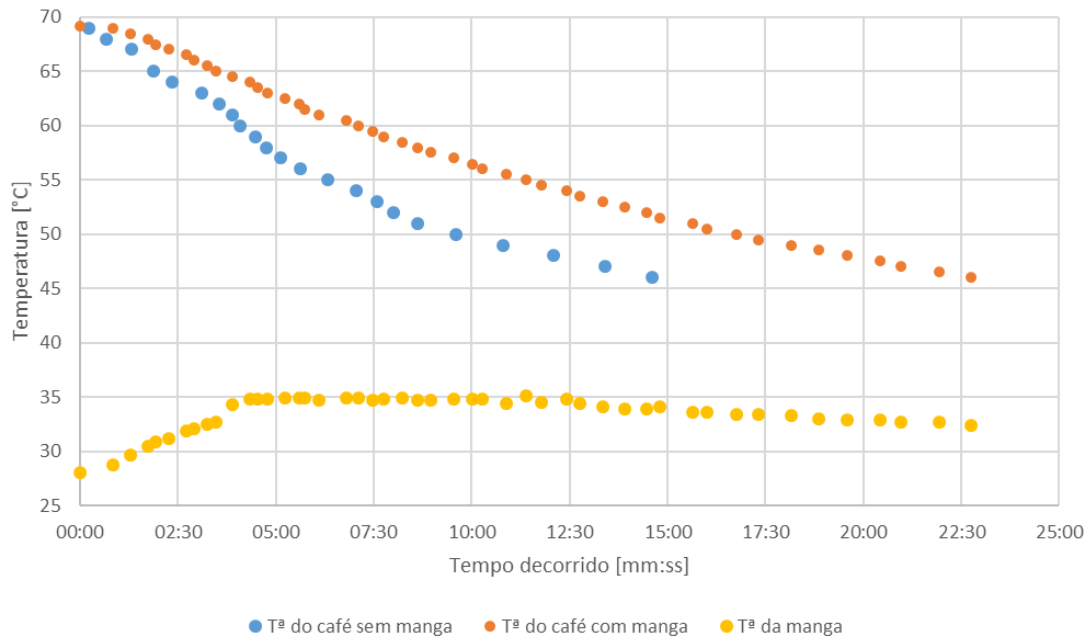


Figura 4.20 - Evolução da temperatura do café sem a utilização da manga (azul), com a utilização desta (laranja) e da face exterior da mesma (amarela).

Capítulo 5 – Análise dos valores obtidos

5 Este capítulo demonstra a análise de valores relevantes à compreensão final da dissertação, incluindo:

- Aferição se o caso de estudo se adequa à aplicação do método da análise uniforme, através da resolução de variáveis adimensionais;
- Análise térmica estacionária aos blocos sólidos e aqueles com caixa de ar, comparação com possíveis blocos de outros materiais;
- Análise económica

15 Para verificar se poderá ser aplicado o método da análise uniforme aos blocos sólidos irá então ser necessário calcular o número de *Biot* deste caso de estudo. Para tal é preciso primeiro saber qual o coeficiente de convecção a que os blocos estão expostos. Relembrando a secção 3.1.2 Convecção desta dissertação que abordou na generalidade a convecção, é possível restringir este caso a um de convecção natural com uma superfície horizontal e fluxo ascendente. Tendo isso em consideração irá ser necessária a determinação dos números adimensionais de *Prandtl*, *Grashof*, *Rayleigh* e *Nusselt*. O fluido, neste caso o ar, apresenta as seguintes propriedades à temperatura ambiente das medições (300 K):

Tabela 5-1 - Algumas propriedades do ar a 300 K [34] e [43].

Propriedade	Valor
Densidade (ρ)	1,1614 kg/m ³
Calor específico (c_p)	1,007 kJ/kg.K
Viscosidade (μ)	184,6 x 10 ⁻⁷ N.s/m ²

Condutividade térmica (k)	26,3 x 10 ⁻³ W/m.K
Coefficiente de expansão (β)	33,3 x 10 ⁻⁴ K ⁻¹
Número de Prandtl (Pr)	0,707

O primeiro passo será calcular o número de *Grashof*, sendo que o ΔT vai depender das medições que decidirmos analisar.

5 Foram então consideradas as temperaturas estabilizadas no topo dos blocos nas medições experimentais com *set point* de 40, 60 e 80 °C, um comprimento característico para a face superior dos blocos e outro para as faces laterais. Podendo assim aferir qual o tipo de escoamento com as três temperaturas e nas cinco faces do bloco. Os números de *Grashof* obtidos com base na equação 3.14 foram multiplicados pelo número de *Prandtl* já calculado, originando os números de *Rayleigh* através da equação 3.13. Estes números revelaram um escoamento laminar para todas as temperaturas e faces
10 do bloco.

Tendo um escoamento desses em conta, o número de *Nusselt* é calculado através da equação 3.17, sendo posteriormente a esse cálculo, determinado o coeficiente de convecção a partir da equação 3.8 e por fim o número de *Biot* a partir da equação 3.27.

15 Sendo o número de *Biot* maior que 0,1 para todos os casos considerados, não é possível aplicar o método da análise uniforme a este caso.

5.1 Análise Estacionária

Mesmo não sendo possível analisar o decorrer das medições com o método da análise uniforme é possível fazer uma análise estacionária ao material e às estruturas impressas para determinar qual será a resistência térmica total destes. Visto que o objetivo destas estruturas é o isolamento térmico, será
20 analisada uma das estruturas que melhor se saiu nas medições experimentais, o bloco de dimensões 25x25x15 mm³ de PLA e com uma caixa de ar no seu interior. Tendo em conta que este bloco demonstrou uma melhor performance quando sujeito a temperaturas elevadas (gama dos 80 °C) vai ser considerada a condutibilidade do PLA a essa temperatura.

25 Considerando a evolução da condutividade do PLA com a temperatura, foi estimado o valor de 0,192 W/m.K a 80 °C (Figura 4.2), sendo por sua vez a resistência do ar, numa caixa de ar não ventilada de espessura de 15 mm, para um fluxo de calor vertical ascendente 0.16 m².K/W [8].

30 Na Figura 5.1 é apresentada uma secção do bloco em estudo, sendo aqui dividida em cinco partes, as laterais (1) e (3) e a central (2) que por sua vez se divide na parte superior (a), inferior (c) e na caixa de ar (b). Esta divisão foi feita no sentido de estudar as diferentes resistências nas diferentes partes do bloco. Será então calculada a resistência absoluta das partes laterais que corresponde apenas à espessura de material (15 mm) sobre a sua condutividade e área superficial (equação 5.29). A resistência da parte central vai corresponder à resistência em série das camadas de PLA e ar, ou seja, à soma das resistências individuais dos três troços (equação 5.32).

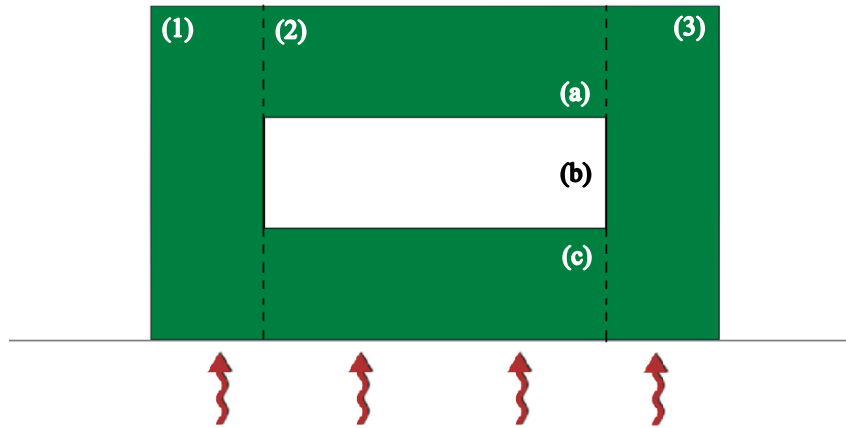


Figura 5.1 - Secção do bloco em estudo dividida em três partes principais (1), (2) e (3), sendo a parte central (2) subdividida em outras três partes (a), (b) e (c).

$$R_{(1)}^a = R_{(3)}^a = \frac{0,015 \text{ m}}{0,192 \text{ W/m.K} \times (0,005 \text{ m} \times 0,015 \text{ m})} = 1041,7 \text{ K/W} \quad (5.29)$$

$$R_{(a)} = R_{(c)} = \frac{0,005 \text{ m}}{0,192 \text{ W/m.K}} = 0,02604 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (5.30)$$

$$R_{(b)} = 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (5.31)$$

$$R_{(2)} = R_{(a)} + R_{(b)} + R_{(c)} = 0,21208 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (5.32)$$

A partir da resistência da parte central (2) do bloco, é possível obter a resistência absoluta ao dividi-la pela sua área superficial (equação 5.33):

$$R_{(2)}^a = \frac{0,21208 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}}{0,015 \text{ m} \times 0,015 \text{ m}} = 942,6 \text{ K/W} \quad (5.33)$$

10 A partir deste ponto, e sabendo que estas resistências se encontram em paralelo, segue-se a equação 3.6 apresentada no capítulo 3.1.1. Condução, para realizar o cálculo da resistência total desta secção da estrutura.

$$R_{(B)}^a = \left(\frac{1}{R_{(1)}^a} + \frac{1}{R_{(2)}^a} + \frac{1}{R_{(3)}^a} \right)^{-1} = 335,5 \text{ K/W} \quad (5.34)$$

15 Contudo, ao observar um esquema 3D do bloco inteiro (Figura 5.2) é possível perceber que apenas se calculou a resistência total da secção (B), sendo que ainda falta o cálculo da secção (A) e (C). Estas duas secções são idênticas e apenas constituídas por PLA sólido, sendo a sua resistência absoluta dada pela equação 5.35.

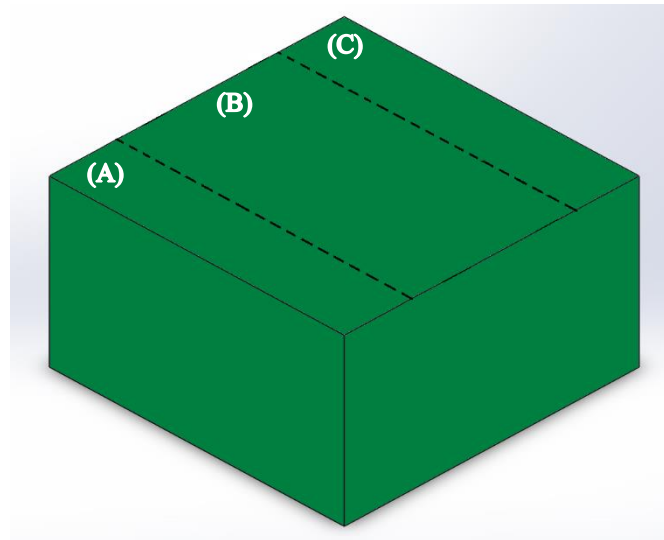


Figura 5.2 - Esquema 3D do bloco inteiro, incluindo a secção acima descrita e outras duas, completamente compostas por PLA.

$$R_{(A)}^a = R_{(C)}^a = \frac{0,015}{0,192 \times (0,025 \times 0,005)} = 625 \text{ K/W} \quad (5.35)$$

5 Após serem conhecidas as resistências das três secções e observando que são resistências em paralelo, basta recorrer de novo à expressão usada acima para obter a resistência do bloco inteiro (equação 5.36).

$$R = \left(\frac{1}{R_{(A)}^a} + \frac{1}{R_{(B)}^a} + \frac{1}{R_{(C)}^a} \right)^{-1} = 161,8 \text{ K/W} \quad (5.36)$$

Multiplicando o valor acima pela área da superfície do bloco obtém-se o valor $R = 0,1011 \text{ m}^2\text{K/W}$

10 O mesmo cálculo pode ser realizado para determinar a resistência de um bloco sólido constituído na sua totalidade por PLA, sendo um cálculo muito mais simples que para o caso anterior (equação 5.37).

$$R = \frac{0,015}{0,192 \times (0,025 \times 0,025)} = 125 \text{ K/W} \quad (5.37)$$

Contabilizando a área da superfície do bloco novamente, obtém-se uma resistência total de $R = 0,0781 \text{ m}^2\text{K/W}$. É possível então observar que um bloco com caixa de ar possui uma resistência térmica superior a um bloco sólido, resultado expectável e já comprovado pelas medições experimentais.

15 Para se conseguir perceber a grandeza destes valores comparativamente a resistências térmicas habitualmente utilizadas para isolamento, serão assumidos blocos (sólidos e com caixa de ar) de dimensões iguais mas feitos de materiais com condutividades já tabeladas anteriormente (Figura 1.1).

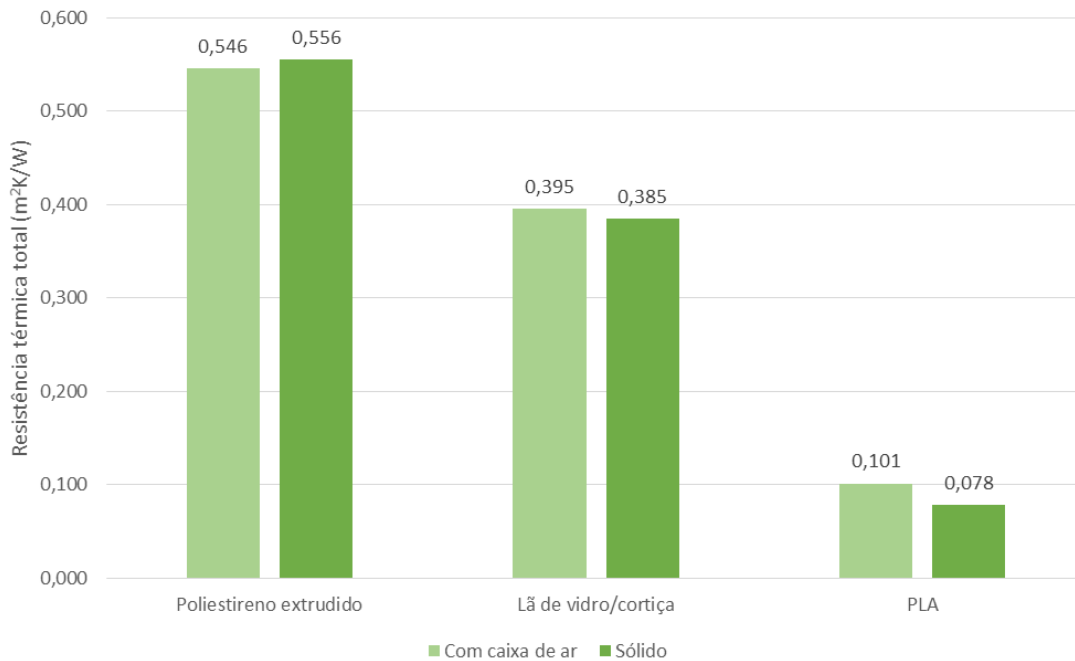


Figura 5.3 - Resistências térmicas totais de blocos sólidos e com caixa de ar, constituídos por materiais isolantes.

Comparado então as resistências térmicas dos blocos impressos de PLA com as apresentadas na Figura 5.3, é possível observar que um bloco sólido de poliestireno extrudido é cerca de sete vezes mais isolante que um bloco equivalente em PLA e cinco vezes mais isolante que um bloco de PLA com caixa de ar. É de notar que no caso do poliestireno extrudido uma caixa de ar no interior do bloco é prejudicial em termos de resistência térmica, isto porque o material é menos condutor que a própria caixa de ar em si. A lã de vidro ou a cortiça (ambos os materiais têm a mesma condutividade térmica) são também mais isolantes que os blocos de PLA (quase quatro vezes mais no caso de um bloco sólido e quase três vezes mais para um bloco com caixa de ar). No caso da cortiça e da lã de vidro a caixa de ar no interior do bloco incrementa a resistência.

Considerando aplicações onde poderia ser utilizado um bloco com dimensões superiores, como um bloco com uma largura e comprimento de 1 metro, a mesma espessura de 15 mm utilizada anteriormente e uma caixa de ar interior de 99x99 cm e 5 mm de espessura, foi realizado o cálculo da resistência para uma estrutura deste tipo. O resultado foi $R = 0,205 \text{ m}^2\text{K/W}$, esta resistência é justificável pelo o fato que este bloco tem uma percentagem mais elevada de ar que aquele com dimensões de $25 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$ (32,7% de ar face a 12%) e o ar é a parte mais isolante da estrutura.

Pondo ainda a hipótese da impressão de placas de PLA que posteriormente poderiam ser intercaladas com uma camada de poliestireno extrudido, ou seja, criando assim uma configuração semelhante à do bloco com uma caixa de ar, mas substituindo-a por material isolante e sem contabilizar as paredes laterais desta. É possível obter uma estrutura com uma resistência térmica superior aquelas que foram testadas, sendo esta: $R = 0,341 \text{ m}^2\text{K/W}$.

5.2 Análise Económica

Um dos fatores que também pesam na escolha de um certo material é o aspecto económico. No caso do PLA um enrolamento de filamento deste material corresponde a um custo de 22,90 €/kg. Sabendo que o peso dos blocos impressos eram de 11,66 gr para o bloco sólido e de 10,29 gr para o bloco com a caixa de ar, é possível calcular o preço para cada peça, sendo este 26,7 e 23,6 cêntimos

respectivamente. Calculando de seguida o preço por m^2 , resulta em 427,1 €/m² para o bloco sólido e 377 €/m² para o bloco com a caixa de ar (já que este necessita de menos material no total), sendo deste modo ainda mais vantajoso optar pela opção com a caixa de ar no interior.

5 De maneira a comparar este preço, com preços usuais em isolamento térmico, fez-se uma rápida
pesquisa acerca dos preços do poliestireno extrudido (com um mínimo de 30 mm de espessura), sendo
o preço 3,11 €/m² [44]. Foi ainda realizada a mesma pesquisa para a lã de vidro, esta com uma espessura
de 40 mm, com o preço de 2,60 €/m² [45]. Apesar de 1 m² de qualquer um destes materiais ser mais
barato que o equivalente de PLA, há que reparar que estes materiais apenas têm uma função isoladora,
10 enquanto que um bloco de PLA pode servir, não só como isolamento, mas também como uma parede
em si.

Pesando o protótipo final obtido (Figura 4.19) este tem 55,816 gr, tornando exequível calcular o
custo total de material para a produção do mesmo: 1,278 €. Este preço exclui os custos da eletricidade
e despreza o material gasto em todo o processo de testes e aperfeiçoamento da impressão (já que este
não será um gasto a repetir na possibilidade da impressão de mais unidades).

15

Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5 Numa primeira fase, esta dissertação focou-se na impressão de estruturas teste para melhor compreensão e calibração dos parâmetros disponíveis numa impressão. De seguida foram identificados e escolhidos três materiais com que imprimir estruturas: ABS, PLA e PETG. Foram de seguida impressos, com paredes totalmente sólidas, um bloco sólido e outro com uma caixa de ar no seu interior (ambos com dimensões 25x25x15 mm³) de cada material selecionado anteriormente, para a realização de testes que fornecessem um perfil térmico de cada material e da influência da caixa de ar.

10 No decorrer das medições o bloco em estudo estava colocado sobre uma chapa de alumínio que por sua vez estava colocada em cima de uma placa aquecedora. O uso da chapa de alumínio foi justificado pelo desejo de melhorar o contacto térmico na superfície inferior do bloco recorrendo a massa térmica, e tal não se poder fazer em cima da placa aquecedora. Uma das superfícies horizontais do bloco estava em contacto permanente com a fonte de calor (placa aquecedora), estando a face oposta (horizontal superior) exposta ao ar. As temperaturas de ambas as faces foram registadas recorrendo a dois termopares ambos fixos com fita do tipo kapton. O ensaio era dado como terminado quando a temperatura no topo do bloco estabilizava, sendo por fim apontado o tempo decorrido. As temperaturas selecionadas como *set points* da placa foram 40, 60 e 80 °C, sendo por isso realizados três ensaios com cada bloco.

20 Destas medições resultou que para a gama dos 40 °C os blocos constituídos por ABS demonstravam melhor capacidade de isolamento térmico, isto é, um maior ΔT final entre o topo da placa e o topo do bloco. Sendo que para as restantes temperaturas (60 e 80 °C) foi o PLA que passou a ter melhor performance, devido às alterações da condutividade dos materiais. Tendo em conta o melhor desempenho do PLA, a partir deste ponto foi decidido prosseguir apenas com estruturas impressas com este material. Para averiguar o efeito térmico das paredes na caixa de ar foi impresso um bloco de dimensões superiores (50x50x15 mm³) com uma caixa de ar (40x40x5 mm³) no seu interior que obteve resultados 25 piores que o bloco do tamanho original, devido provavelmente às perdas por convecção mais reduzidas. Sabendo que as estruturas com caixas de ar no seu interior haviam demonstrado um melhor desempenho que as estruturas sólidas e considerando que uma espessura de 15 mm poderia ser demasiado grande para ser utilizada em certas aplicações foi impresso e testado um bloco de dimensões 25x25x6 mm³, com uma caixa de ar de apenas 2 mm no seu interior. Apesar da sua dimensão reduzida, tal estrutura 30 conseguiu manter uma diferença de quase 25 °C entre as duas faces, quando sujeito a temperaturas na ordem dos 80 °C. Foi ainda testada outra configuração, sendo impressos dois blocos de PLA, com e sem caixa de ar, mas com paredes construídas com 30% de preenchimento ao invés das paredes sólidas utilizadas até a este ponto. Ainda assim, para temperaturas mais elevadas, a configuração com paredes sólidas continuou a ser aquela com melhor performance de todas as testadas. Por fim, foram impressos 35 novos blocos com espessuras de caixa de ar superiores (20 e 25 mm), que tiveram um desempenho consideravelmente melhor em comparação com as estruturas anteriores, exceto no caso das medições a 80 °C dos blocos com caixa de ar, onde os resultados foram semelhantes entre os blocos de diferentes dimensões.

40 Concluindo, foi impresso um protótipo de uma manga para um copo de café, utilizando a espessura de 6 mm testada num dos blocos. Ao ser colocado um copo de café a 70 °C na manga, as faces exteriores desta apenas aqueceram até aos 35 °C, o que garante a segurança e conforto do utilizador. Através do uso da manga o café demorou cerca de 22 minutos a arrefecer até aos 46 °C (temperatura qual já era suportável agarrar no copo com a mão) face aos 16 minutos sem manga.

45 Posteriormente à fase experimental foi ainda realizada uma análise estacionária ao bloco de PLA sólido e àquele com caixa de ar com dimensões de 25x25x15 mm³, obtendo-se as resistências térmicas

de, respetivamente, 125 K/W e 161,8 K/W. Tais valores quando comparados com resistências obtidas para blocos equivalentes, mas constituídos por poliestireno extrudido, cortiça ou lã de vidro, revelaram-se até oito vezes mais pequenos.

5 Economicamente um bloco de PLA de 25x25x15 mm³ com caixa de ar tem um custo de aproximadamente 377 €/m² valor claramente enorme quando comparado com o preço do poliestireno extrudido de 3,11 €/m² ou da lã de vidro de 2,60 €/m². Sendo que no caso do material necessário para a impressão do protótipo, este apenas custa 1,278 €/unidade.

10 A partir desta diferença de valores de resistências térmicas e de preços, é possível concluir que o isolamento térmico, através deste tipo de estruturas de PLA, é menos adequado para aplicações em edifícios, mesmo que não se tratasse de um material biodegradável, podendo ser, no entanto, mais adequado para aplicações do dia-a-dia. Sendo um exemplo deste tipo de aplicações o protótipo impresso, um objeto prático, útil e barato, possuindo este uma performance aceitável para o tipo de uso a que pode ser sujeito.

15 O desenvolvimento futuro deste trabalho poderá passar pela utilização deste tipo de objetos para fins meramente estruturais e não isolantes. Poderá ser feita uma verificação do comportamento dos materiais face a outras temperaturas mais reduzidas, quem sabe negativas, para possíveis aplicações a frio em vez de a quente. Existindo até a possibilidade de o mesmo material estar exposto a um grande alcance de temperaturas (aplicações em edifícios). Também seria interessante, se possível, a exploração de materiais inovadores e provavelmente mais isolantes como o *Laywood*, um material com uma composição de 40% madeira reciclada misturada com polímeros de ligação, o que o torna fácil de imprimir [31].
20 Tendo em conta a dimensão da impressora disponível (Figura 4.1), existe um limite no tamanho possível para os objetos impressos, sendo que dentro desse limite pode ser impressa, por exemplo, uma caixilharia com corte térmico para uma janela relativamente pequena de um edifício.

Referências Bibliográficas

- [1]. D. Bozsaky, "The historical development of thermal insulation materials" *Periodica Polytechnica Architecture*, vol. 41, no. 2, p. 49, 2010.
- [2]. R. T. B. Jr, *Insulation Handbook*. McGraw-Hill, 2001.
- [3]. Publications Office, "Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios" *Jornal Oficial da União Europeia*, 18 de junho de 2010.
- [4]. F. Silva, "Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores" Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [5]. "INSULATION MATERIALS SELECTION AND INSTALLATION" 2009. [Online]. Disponível: <https://www.dmme.virginia.gov/DE/LinkDocuments/HandbookInsulation.pdf>. Acedido a: 24 de maio de 2016.
- [6]. "Chapter 5 - insulation materials and techniques" 2009. [Online]. Disponível: <https://www.uky.edu/bae/sites/www.uky.edu/bae/files/Chapter%205%20Insulation%20Materials%20and%20Techniques.pdf>. Acedido a: 24 de maio de 2016.
- [7]. Massachusetts Department of Energy Resources, "Insulation - A consumer fact sheet" Boston, MA, 2008. [Online]. Disponível: <http://www.mass.gov/eea/docs/doer/publications/insul.pdf>. Acedido a: 24 de maio de 2016.
- [8]. C. A. P. dos Santos e L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, LNEC, 2ª ed. Lisboa: 2006.
- [9]. U. de Aveiro, "Primeira impressora 3D portuguesa construída na Universidade de Aveiro" *Jornal Online | Universidade de Aveiro*, 2016. [Online]. Disponível: <http://uaonline.ua.pt/pub/detail.asp?c=16703>. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [10]. MyBestClick ®, "Home | 3D spot" in *3D spot*, 2013. [Online]. Disponível: <http://www.3dspotgroup.com/>. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [11]. CDATA, "Digitalização e Impressão 3D" in *3D Life Tridimensional printing*, 3D LIFE. [Online]. Disponível: <http://3dlife.pt/>. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [12]. "Reprapalgarve," in *Reprapalgarve open source 3D printing*. [Online]. Disponível: <http://www.reprapalgarve.com/>. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [13]. 3D Printing Industry, "The free beginner's guide" 3D Printing Industry, 2016. [Online]. Disponível: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>. Acedido a: 20 de junho de 2016.

- [14]. A. van Wijk e I. van Wijk, *3d printing with Biomaterials: Towards a sustainable and circular economy*. Amsterdam: IOS Press, 2015.
- [15]. "MakerBot Thingiverse" in *Thingiverse*, 2016. [Online]. Disponível: <http://www.thingiverse.com/about/>. Acedido a: 21 de março de 2016.
- [16]. B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution" *Business Horizons*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, março de 2012.
- [17]. C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", U.S. Patent 4 575 330, 11 de março de 1986.
- [18]. T. Wohlers e Tim Gomet, "History of additive manufacturing" Wohlers Report, 2012. [Online]. Disponível: <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf>. Acedido a: 23 de março de 2016.
- [19]. C. R. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering", U.S. Patent 4 863 538, 1989.
- [20]. S. S. Crump, "Apparatus and methods for creating three-dimensional objects", U.S. Patent 5 121 329, 9 de junho de 1992.
- [21]. G. Hayes, "A brief history of personal 3D printing" *Make special issue: Ultimate guide to 3D printing*, p. 10, 2013.
- [22]. E. Matias e B. Rao, "3D printing: on its historical evolution and the implications for business" *2015 Proceedings of PICMET '15: Management of the Technology Age*, pp. 551–558.
- [23]. Ministry for education and employment, "Domain group 3D printing workshop notes 2 Proto+ created by Lee Bullock" Malta, 2014. [Online]. Disponível: <https://education.gov.mt/en/resources/News/Documents/Youth%20Guarantee/3D%20Printing.pdf>. Acedido a: 25 de março de 2016.
- [24]. M. Heynick e I. Stotz, "3D CAD, CAM and Rapid Prototyping" 2007. [Online]. Disponível: <http://enac-oc.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>. Acedido a: 31 de março de 2016.
- [25]. J. Choren, V. Gervasi, T. Herman, S. Kamara e J. Mitchell, "SLS power life study" pp. 39–45.
- [26]. S. Carlson, "Wire-based AM vs. Powder-based AM" in *Sciaky Inc*, 2016. [Online]. Disponível: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>. Acedido a: 25 de março de 2016.

- [27]. "Types of 3D printers or 3D printing technologies overview" in *3D printing from scratch*, 3D Printing from scratch, 2015. [Online]. Disponível: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>. Acedido a: 25 de março de 2016.
- [28]. "What material should I use for 3D printing?". [Online]. Disponível: http://3dprintingforbeginners.com/wp-content/uploads/2014/09/What_Material_Should_I_Use_For_3D_Printing_Download1.pdf. Acedido a: 31 de março de 2016.
- [29]. O. H. Inc, "History" in *Organovo*, Organovo, 2016. [Online]. Disponível: <http://organovo.com/about/history/>. Acedido a: 4 de abril de 2016.
- [30]. "3D systems acquires Bespoke innovations" in *3D systems*, 2012. [Online]. Disponível: <http://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-acquires-bespoke-innovations>. Acedido a: 4 de abril de 2016.
- [31]. BBC, "Transplant jaw made by 3D printer claimed as first" in *BBC Technology*, BBC News, 2012. [Online]. Disponível: <http://www.bbc.com/news/technology-16907104>. Acedido a: 4 de abril de 2016.
- [32]. "3D-Printed car" in *Local Motors*, 2015. [Online]. Disponível: <https://localmotors.com/3d-printed-car/>. Acedido a: 1 de abril de 2016.
- [33]. Contour Crafting, "CC". [Online]. Disponível: <http://www.contourcrafting.org/>. Acedido a: 29 de março de 2016.
- [34]. T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt e A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed. Oxford, United Kingdom: Wiley, John & Sons, 2011.
- [35]. M. O. Panão, *Transferência de Calor e Balanço de Energia em Edifícios*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2015.
- [36]. "Creatr HS" in *Leapfrog*. [Online]. Disponível: <https://www.lpfrg.com/en/creatr-hs/>. Acedido a: 5 de setembro de 2016.
- [37]. "Glass Transition by DMA" Cambridge Polymer Group, 2014. [Online]. Disponível: http://www.campoly.com/files/6114/2850/4047/035_Glass_Transition_by_DMA_ADMIN-0243_v2.0.pdf. Acedido a: 31 de março de 2016.
- [38]. All 3 DP, "PETG filament for 3D printing: Explained & compared" 2016. [Online]. Disponível: <https://all3dp.com/petg-filament-3d-printing/>. Acedido a: 31 de agosto de 2016.

- [39]. M. F. Ashby e K. Johnson, *Materials and design, Second edition: The art and science of material selection in product design*, 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [40]. A. Dawson, M. Rides e J. Nottay, "The effect of pressure on the thermal conductivity of polymer melts" *Polymer Testing*, vol. 25, no. 2, pp. 268–275, abril de 2006.
- [41]. Moldflow Plastic Labs, "Moldflow Material Testing Report MAT2238 NatureWorks PLA" Australia, Jul. 18, 2007. [Online]. Disponível em: http://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Properties_Documents/PropertiesDocument_7000DMoldFlowReport_pdf.pdf. Acedido a: 20 de agosto de 2016.
- [42]. A. R. Moritz and F. C. Henriques, "Studies of Thermal Injury II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous BUBTNs," *The American Journal of Pathology*, vol. 23, no. 5, pp. 695–720, 1947.
- [43]. J. C. Dixon, *The shock absorber handbook - Appendix B: Properties of Air*. Chichester, England: John Wiley, 2008.
- [44]. "Preços de placas de poliestireno extrudido - Orçamentos" in *Isolamentos e impermeabilizações*, 2015. [Online]. Disponível: <http://orcamentos.eu/precos-de-placas-de-poliestireno-extrudido/>. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [45]. Imperialum, "Tabela de Preços Março 2010," 2010. [Online]. Disponível: http://www.metodo-bra.com/pdf/IMPERALUM_Tabela_Precos_2010.pdf. Acedido a: 6 de setembro de 2016.
- [46]. K. H. Onnesweg, "Leapfrog Creatr HS Datasheet V01-04". [Online]. Disponível: https://www.lpfrg.com/media/wysiwyg/pdf/Creatr_HS_datasheet.pdf. Acedido a: 31 de março de 2016.

Anexos

A.1 Componentes da impressora 3D

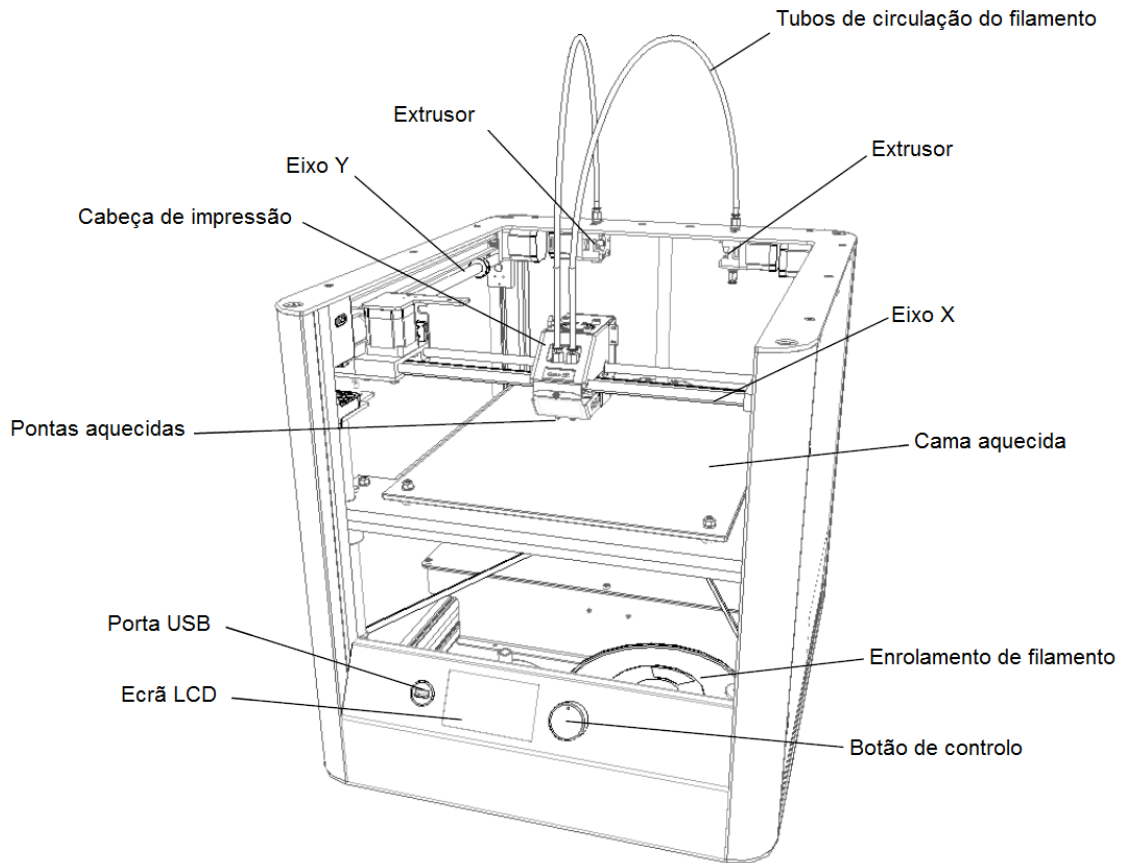


Figura A.1.1 - Componentes da impressora 3D Leapfrog Creatr HS. Adaptado de Kamerlingh H Onnesweg, "Leapfrog Creatr HS DATASHEET V01--04" [46].

5

A.2 Gráficos da evolução das temperaturas dos blocos sólidos e com caixa de ar sujeitos aos vários set points

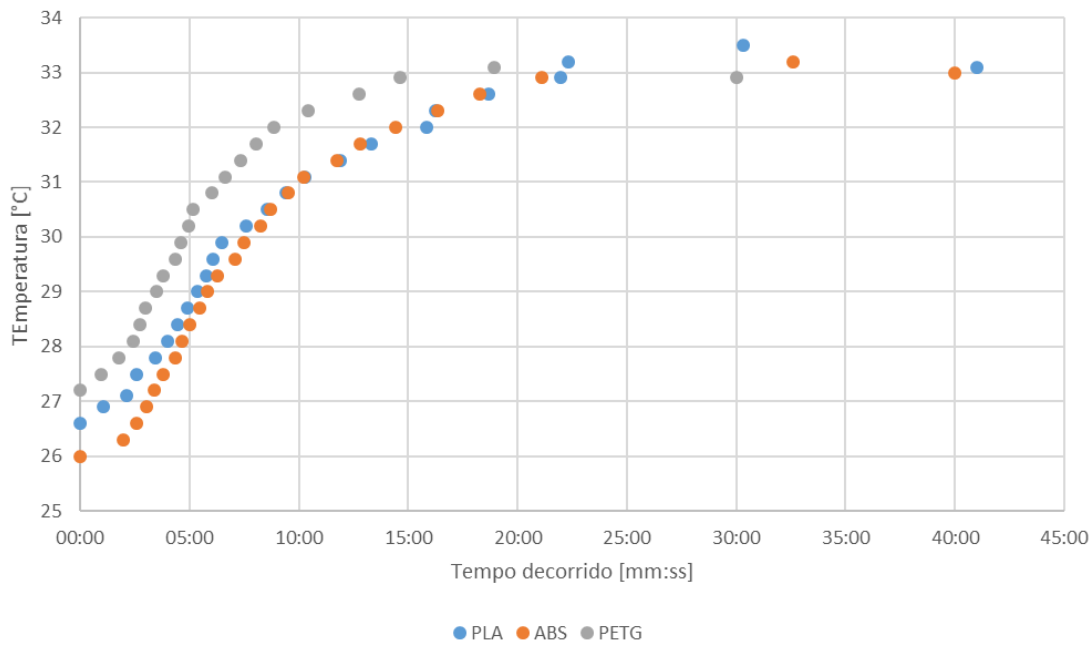


Figura A.2.1 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, sólidos, nas medições a 40 °C.

5

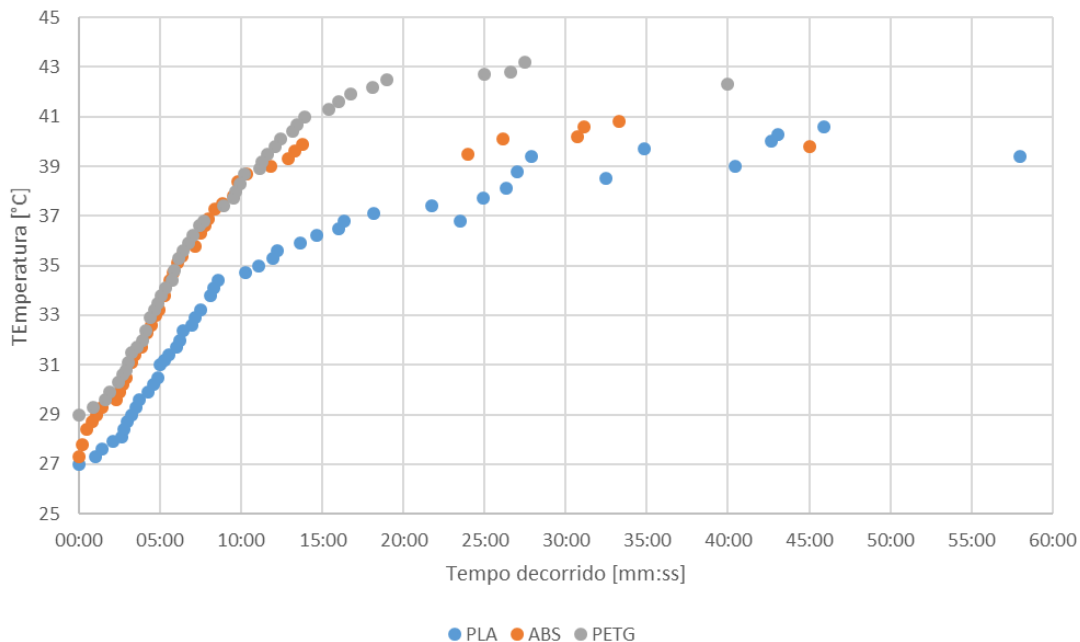


Figura A.2.2 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, com caixa de ar, nas medições a 60 °C.

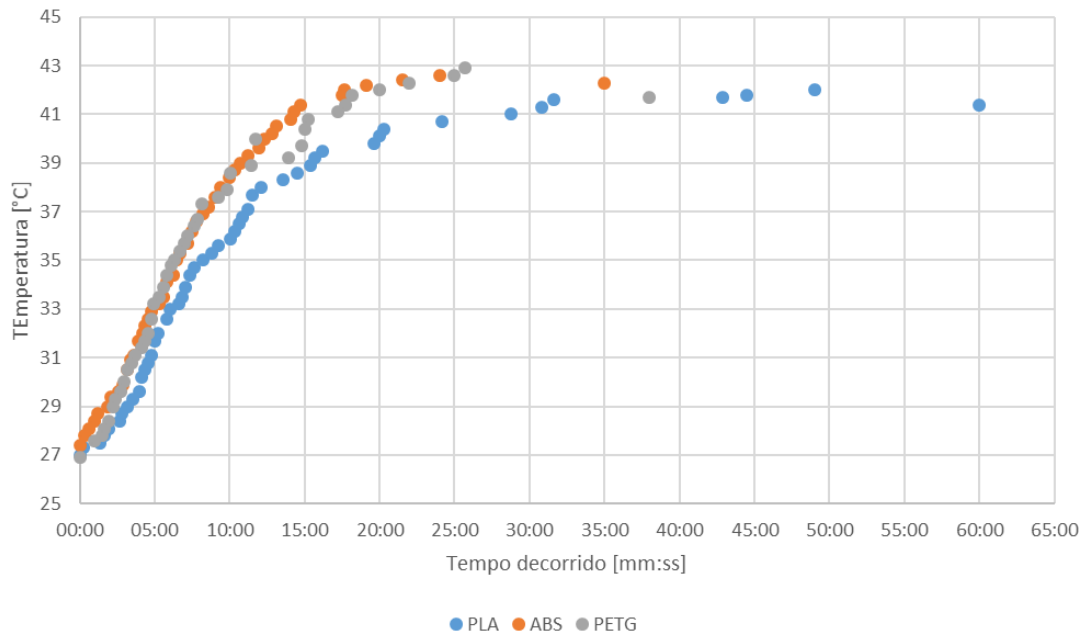
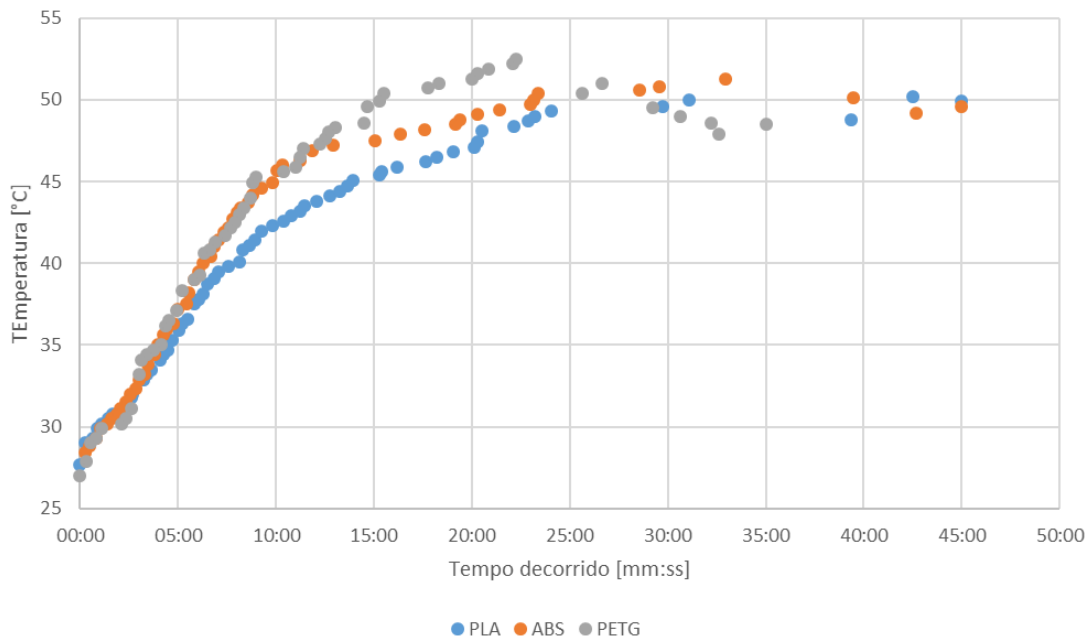


Figura A.2.3 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, sólidos, nas medições a 60 °C.



5 Figura A.2.4 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, com caixa de ar, nas medições a 80 °C.

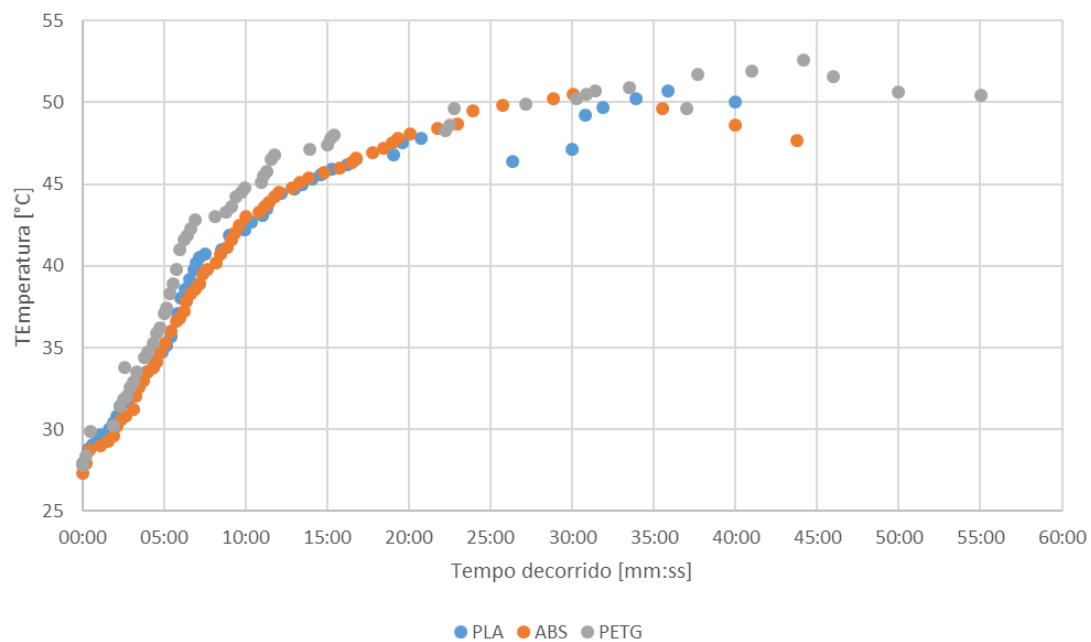


Figura A.2.5 - Comparação do aquecimento dos blocos dos três materiais, sólidos, nas medições a 80 °C.