



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2014

**Fábio Alcino
Carvalho Alves**

**Análise e Otimização do Processo *Fused Filament
Fabrication***



**Fábio Alcino
Carvalho Alves**

**Análise e Otimização do Processo *Fused Filament
Fabrication***

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço desde já aos meus orientadores, Professora Doutora Mónica Oliveira e Professor Doutor Carlos Relvas, pelo apoio e orientação ao longo deste trabalho.

À empresa BEEVERYCREATIVE pela disponibilidade e colaboração, em especial ao Eng. Miguel Moura pelo acompanhamento prestado e disponibilização de informação.

Aos meus pais e irmãs, pela disponibilidade, sacrifícios e apoio incansável.

Finalmente reconhecer o apoio de todos os meus amigos e das pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho.

palavras-chave

Fused Filament Fabrication (FFF), impressão 3D, prototipagem rápida, otimização do processo FFF, modelo de simulação numérica, CFD.

resumo

No processo de impressão 3D por FFF, o equipamento deve manter as características de funcionamento normais dentro de determinados parâmetros durante todas as fases do processo. Contudo, o excesso de temperatura em determinados componentes pode levar à interrupção do processo de impressão. Desta forma, torna-se imperativo analisar o processo e postular soluções que permitam re-conceber o sistema de modo a enfrentar esses desafios operacionais. O processo foi instrumentado e analisado, tendo-se ainda procedido ao desenvolvimento de um modelo que, por recurso à aplicação *Flow Simulation* do *SolidWorks®*, que no fim de devidamente validado, permitiu parametrizar e preconizar soluções de operação do equipamento atualmente no mercado. As soluções preconizadas foram efetivamente desenvolvidas no âmbito deste trabalho de dissertação, sendo os resultados observados experimentalmente muito próximos dos simulados. Assim, nesta dissertação, foi efetuado um estudo detalhado de todo o processo e definida uma estratégia de otimização do equipamento de FFF.

keywords

Fused Filament Fabrication (FFF), 3D printing, rapid prototyping, FFF process optimization, numerical simulation, CFD.

abstract

In 3D printing by FFF process, the product must maintain the characteristics of normal operating within certain parameters during all phases of the process. However, excessive temperature can lead to certain components in the interruption of the printing process. Thus, it becomes imperative to analyze the process and put forward solutions that enable re-design the system to meet these operational challenges. The process was instrumented and analyzed, and was also developed a model through of the application Flow Simulation of SolidWorks, that after validated adequately the parameters, become possible parameterize the solutions of operation of the equipment currently on the market. The solutions were effectively developed within this dissertation, the results are very close to those observed experimentally simulated. Thus, in this dissertation, was made a detailed study of the process and set a strategy for optimizing the FFF equipment.

Índice

LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO.....	2
2. PROCESSOS ADITIVOS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	3
2.1. ESTEREOLITOGRAFIA (SLA).....	5
2.2. SINTERIZAÇÃO SELETIVA POR LASER (SLS).....	7
2.3. IMPRESSÃO 3D (PROCESSO COLORJETPRINTING)	8
2.4. IMPRESSÃO 3D (PROCESSO MULTIJETPRINTING - POLYJET)	9
2.5. IMPRESSÃO 3D (DIGITAL LIGHT PROCESSING - DLP)	10
2.6. FABRICO DE OBJETOS POR LAMINADOS (LOM)	11
2.7. FUSÃO POR FEIXE DE ELETRÕES (EBM)	12
2.8. A TECNOLOGIA FFF	13
2.8.1. <i>Fatores que influenciam a qualidade e acabamento superficial do processo FFF ..</i>	<i>14</i>
2.9. NOVOS DESENVOLVIMENTOS E PERSPETIVAS ATUAIS DO MERCADO “DESKTOP”	15
2.9.1. <i>3D Systems</i>	15
2.9.2. <i>Stratasys Ltd.</i>	18
2.9.3. <i>MakerBot</i>	19
2.9.4. <i>Ultimaker</i>	21
2.9.5. <i>Denford</i>	22
2.9.6. <i>Leapfrog Creatr</i>	23
2.9.7. <i>Open-source RepRap Project</i>	24
2.9.8. <i>Formlabs</i>	24
2.10. A IMPRESSORA BEETHEFIRST DA BEEVERYCREATIVE	25
2.10.1. <i>Desenvolvimento de estudos numéricos</i>	27
3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	29
3.1. CALOR POR CONDUÇÃO	29
3.2. CALOR POR CONVECÇÃO	30
3.3. CALOR POR RADIAÇÃO.....	30
3.4. RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTACTO.....	31
3.5. MECANISMOS QUE POTENCIAM O AUMENTO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	32

4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1. AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO	35
4.1.1. Colocação de termopares	35
4.1.2. Testes realizados	37
4.1.3. Resultados obtidos e discussão	38
4.2. CRIAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	42
4.2.1. Funcionamento do software adotado.....	43
4.2.2. Cargas térmicas.....	47
4.2.3. Implementação do modelo virtual.....	48
4.2.4. Simplificações efetuadas ao modelo	50
4.3. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	51
4.4. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE MELHORIA.....	54
4.4.1. Solução construtiva A - Aumento da área de transferência de calor por convecção no bloco de arrefecimento	54
4.4.2. Solução construtiva B – Temperatura de insuflação constante de 25 ^o C.....	55
4.4.3. Solução construtiva C – Afastamento do bloco de aquecimento do ventilador	56
4.4.4. Solução construtiva D – Colocação de um divergente em conjunto com uma nova geometria do canal no blower.....	57
4.5. IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS.....	58
4.6. NOVA MEDIÇÃO EXPERIMENTAL	58
4.6.1. Testes realizados.....	58
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO.....	59
5.1. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	59
5.2. RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	61
5.2.1. Repetibilidade	61
5.2.2. Resultados do Teste 2.1	64
5.2.3. Resultado do Teste 2.2	66
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	67
6.1. CONCLUSÕES.....	67
6.2. TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	69
ANEXOS	73

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – FASES DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.	5
FIGURA 2.2 – (A) PROCESSO ESTEREOLITOGRAFICO DE CONSTRUÇÃO DESCENDENTE; (B) PROCESSO ESTEREOLITOGRAFICO DE CONSTRUÇÃO ASCENDENTE	6
FIGURA 2.3 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR SLS.	7
FIGURA 2.4 – PROCESSO DE IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL <i>COLORJETPRINTING</i>	8
FIGURA 2.5 – PROCESSO DE POLYJET, PJET.	9
FIGURA 2.6 – DESENHO ILUSTRATIVO DO PROCESSO DLP.	10
FIGURA 2.7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA PROTOTIPAGEM POR LOM.	11
FIGURA 2.8 – DESENHO ILUSTRATIVO DO PROCESSO EBM.	12
FIGURA 2.9 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DO PROCESSO FFF.	13
FIGURA 2.10 – IMPRESSORA CUBEX.	16
FIGURA 2.11 – CANAL DE EXTRUSÃO CUBEX.	16
FIGURA 2.12 – EQUIPAMENTO CUBE2.	16
FIGURA 2.13 – EQUIPAMENTO CUBE® 3.	16
FIGURA 2.14 – EQUIPAMENTO 3D TOUCH.	17
FIGURA 2.15 – UNIDADES EXTRUSORAS 3D TOUCH E PORMENOR DO SISTEMA DE FUSÃO.	17
FIGURA 2.16 – CABEÇA DE IMPRESSÃO MOJO.	18
FIGURA 2.17 – IMPRESSORA MOJO E EQUIPAMENTO DE REMOÇÃO DO MATERIAL DE SUPORTE.	18
FIGURA 2.18 – MAKERBOT REPLICATOR 2.	19
FIGURA 2.19 – CABEÇA DE IMPRESSÃO REPLICATOR 2.	19
FIGURA 2.20 – EQUIPAMENTO MAKERBOT REPLICATOR DESKTOP 3D PRINTER.	20
FIGURA 2.21 – UNIDADE EXTRUSORA MAKERBOT REPLICATOR SMART EXTRUDER.	20
FIGURA 2.22 – ULTIMAKER ORIGINAL.	21
FIGURA 2.23 – CABEÇA DE IMPRESSÃO ULTIMAKER ORIGINAL.	21
FIGURA 2.24 – EQUIPAMENTO ULTIMAKER 2.	22
FIGURA 2.25 – CABEÇA DE IMPRESSÃO ULTIMAKER 2.	22
FIGURA 2.26 – EQUIPAMENTO UP! 3D PLUS.	23
FIGURA 2.27 – CABEÇA EXTRUSORA UP! 3D PLUS.	23
FIGURA 2.28 – IMPRESSORA LEAPFROG CREATR.	23
FIGURA 2.29 – UNIDADE EXTRUSORA DA LEAPFROG CREATR.	23
FIGURA 2.30 – EQUIPAMENTO FORM1.	24
FIGURA 2.31 – IMPRESSORA BEETHEFIRST.	25
FIGURA 2.32 – CABEÇA EXTRUSORA.	26
FIGURA 2.33 – SISTEMA DE FUSÃO.	26
FIGURA 3.1 – QUEDA DE TEMPERATURA DEVIDO A UMA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTACTO.	31

FIGURA 3.2 – UTILIZAÇÃO DE ALHETAS PARA MELHORAR A TRANSFERÊNCIA DE CALOR NUMA PAREDE PLANA. (A) SUPERFÍCIE SEM ALHETAS. (B) SUPERFÍCIE ALHETADA.....	32
FIGURA 4.1 – DESENHO ILUSTRATIVO DA COLOCAÇÃO DOS TERMOPARES.....	36
FIGURA 4.2 – APARATO EXPERIMENTAL.....	38
FIGURA 4.3 – RESULTADOS DO TESTE 1.1.....	39
FIGURA 4.4 – RESULTADOS DO TESTE 1.2.....	40
FIGURA 4.5 – RESULTADOS DO TESTE 1.3.....	41
FIGURA 4.6 – RESULTADOS DO TESTE 1.4.....	42
FIGURA 4.7 – CÉLULAS DA MALHA COMPUTACIONAL NA INTERFACE SÓLIDO/FLUIDO.....	46
FIGURA 4.8 – IMAGEM TERMOGRÁFICA E DESENHO ILUSTRATIVO DA TRAJETÓRIA DE SAÍDA DO FLUIDO.....	48
FIGURA 4.9 – CARGAS TÉRMICAS DEFINIDAS NO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	49
FIGURA 4.10 – MALHA E DOMÍNIO DE CÁLCULO UTILIZADOS.....	50
FIGURA 4.11 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE 1.1 AOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO - PARTE 1.....	52
FIGURA 4.12 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE 1.1 AOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO – PARTE 2.....	52
FIGURA 4.13 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE 1.3 AOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO – PARTE 1.....	53
FIGURA 4.14 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE 1.3 AOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO – PARTE 2.....	54
FIGURA 4.15 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA A E MODELO NORMAL.....	55
FIGURA 4.16 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA C E MODELO NORMAL.....	56
FIGURA 4.17 – ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA D E MODELO NORMAL.....	57
FIGURA 5.1 – PERFIL DE TEMPERATURA DO FLUIDO RESULTANTE DA SIMULAÇÃO DO MODELO ANTES E APÓS MELHORIA, PLANO FRONTAL.....	59
FIGURA 5.2 – PERFIL DE TEMPERATURA DO FLUIDO RESULTANTE DA SIMULAÇÃO DO MODELO A) ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DE PROPOSTA DE MELHORIA; B) APÓS IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIA, VISTA LATERAL.....	60
FIGURA 5.3 – PERFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA SIMULAÇÃO DO MODELO ANTES E APÓS MELHORIA.....	61
FIGURA 5.4 – TEMPERATURA DO CANAL, PARA TESTE REALIZADO APÓS MELHORIA.....	62
FIGURA 5.5 – TEMPERATURA DO BLOCO DE ARREFECIMENTO, PARA TESTE REALIZADO APÓS MELHORIA.....	62
FIGURA 5.6 – TEMPERATURA DO BLOCO DE AQUECIMENTO, PARA TESTE REALIZADO APÓS MELHORIA.....	63
FIGURA 5.7 – TEMPERATURA AMBIENTE, PARA TESTE REALIZADO APÓS MELHORIA.....	63
FIGURA 5.8 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL ANTES DE IMPLEMENTAR MELHORIAS.....	64
FIGURA 5.9 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL APÓS IMPLEMENTADA MELHORIA.....	65
FIGURA 5.10 – RESULTADOS DO TESTE 2.2 OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE.....	66

Lista de tabelas

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS TERMOPARES UTILIZADOS.	36
TABELA 2 - SUMÁRIO DOS TESTES REALIZADOS NA FASE DE AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS.	39
TABELA 3 – RESULTADOS OBTIDOS PELA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA A.	55
TABELA 4 – RESULTADOS OBTIDOS PELA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA B.	55
TABELA 5 – RESULTADOS OBTIDOS PELA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA C.	56
TABELA 6 – RESULTADOS OBTIDOS PELA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA D.	57

Lista de Símbolos

Abreviaturas

3D	Three Dimensional (Tridimensional)
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AMF	Additive Manufacturing File Format
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Engenharia assistida por computador)
CJP	Color Jet Printing
CNC	Computer Numerical Control (Controlo Numérico Computorizado)
DLP	Digital Light Projection
EBM	Electron Beam Melting (Fusão por feixe de eletrões)
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelação por fusão e deposição)
FFF	Fused Filament Fabrication (Fabrico por filamento fundido)
LOM	Laminated Object Manufacture (Fabrico de objetos por laminados)
MJM	MultiJet Modeling
PJP	Plastic Jet Printing
PLA	Poly(lactic acid) (Ácido polilático)
PR	Rapid Prototyping (Prototipagem Rápida)
SLA	Stereolithography Apparatus (Estereolitografia)
SLI	Slice (Formato de ficheiro em camadas)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterização Seletiva por Laser)
STL	Stereolithographic Tessellation Language (Formato de ficheiro STL)
TDP	Three-dimensional printing (Impressão Tridimensional)

Nomenclatura

[M]	Ensaio realizado após solução de melhoria
[n]	Ensaio realizado ao modelo normal
[S]	Resultado obtido por simulação
[SM]	Resultado obtido por simulação após implementada solução de melhoria
[Sn]	Resultado obtido por simulação do modelo normal

1. Introdução

1.1. Motivação

Numa fase em que se assiste à revolução do uso da impressão tridimensional, nomeadamente através da disponibilização desta tecnologia para o *mercado doméstico* ou de consumo por parte de *não profissionais*, existe uma necessidade contínua de desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e sustentáveis, por forma a responder aos desafios colocados. Sendo um conceito já desenvolvido e, uma tecnologia recente, pequenos problemas como o encravamento do filamento à entrada da unidade extrusora, motivado pelo excesso da temperatura nesse local constituem um problema de fácil resolução em termos de utilização profissional, mas torna-se limitador na sua aceitação num mercado emergente como o mercado *não profissional*. É neste contexto que surge este trabalho que visa resolver um problema concreto de uma impressora 3D que apresenta perda de alimentação durante o processo de extrusão contínua do filamento polimérico. Pretende-se através da implementação de soluções de melhoria reduzir a temperatura dos componentes na zona de alimentação, para que esta se situe abaixo da temperatura de transição vítrea do material polimérico a extrudir.

Para um correto funcionamento do processo de impressão 3D, o equipamento deve manter as características de funcionamento dentro de determinados parâmetros, considerados normais, durante todo o processo de impressão. Determinados fatores externos, como a temperatura ambiente, podem condicionar a qualidade do modelo impresso, bem como em casos extremos interromper a impressão. Igualmente, durante o processo de impressão se a temperatura baixar consideravelmente, esta pode provocar a criação de tensões residuais no modelo, alterando a sua resistência. Por outro lado, se a temperatura ambiente subir consideravelmente durante o processo de impressão, para além de interferir nas propriedades mecânicas do material, pode levar à rutura da alimentação do material, uma vez que atingida a temperatura de transição vítrea do material este apresenta comportamento maleável, impedindo o seu tracionamento através das rodas motrizes. Desta forma, o presente trabalho incide no desenvolvimento de novas soluções que permitam dar resposta ao desafio colocado.

1.2. Objetivos

Nesta dissertação pretende-se estudar o processo de extrusão de materiais poliméricos utilizados na tecnologia de FFF (*Fused Filament Fabrication*) para o caso concreto de uma impressora 3D (BEETHEFIRST) desenvolvida pela empresa BEEVERYCREATIVE preconizando e desenvolvendo a solução tecnológica de forma apropriada para melhorar o desempenho do equipamento.

1.3. Organização

Este trabalho está organizado em seis capítulos que descrevem de forma detalhada o estudo desenvolvido. Os primeiros três capítulos são de índole teórica referentes à temática estudada; os restantes três referem-se ao trabalho experimental desenvolvido para solucionar o problema proposto. De seguida faz-se uma breve descrição sumária sobre cada um dos capítulos.

No capítulo 2 faz-se uma breve introdução à tecnologia de prototipagem rápida, descrevendo de forma sucinta a passagem do modelo CAD 3D até ao protótipo final. Neste capítulo são apresentados os principais processos aditivos de PR (Prototipagem Rápida), onde se inclui a tecnologia de que é âmbito esta dissertação, o processo FFF e, para o qual é elaborado o seu estado da arte.

O capítulo 3 é dedicado aos fenómenos de transferência de calor.

O capítulo 4, foca-se nos métodos e materiais utilizados na parte experimental, onde é descrita a metodologia de trabalho, assim como a criação de um modelo virtual com vista à simulação numérica.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente e os resultados provenientes da simulação numérica, sendo ainda feita uma discussão acerca dos mesmos.

No último capítulo apresentam-se as conclusões sobre o trabalho e algumas perspetivas futuras de desenvolvimento.

2. Processos aditivos de prototipagem rápida

A evolução dos sistemas de modelação por computador inerente ao desenvolvimento de novas tecnologias de prototipagem rápida resultou na redução do fabrico de modelos pelos meios tradicionais. A prototipagem rápida (PR) é o termo vulgarmente utilizado para descrever o fabrico de modelos físicos diretamente de um modelo de CAD (Computer Aided Design), tendo como base a utilização de um conjunto de processos tecnológicos e de tecnologias de informação. Os processos de PR permitem realizar peças de elevada complexidade, impossíveis de obter através de meios de fabrico convencionais (1).

A construção de modelos e protótipos é, na maioria dos casos, uma necessidade e parte integrante do processo de desenvolvimento de um produto. Os modelos são produzidos tendo como finalidade a realização de ensaios de funcionalidade, estudos relacionados com aspetos de ordem estética, nomeadamente os que se prendem com a cor e a forma, e para o projeto e fabrico de moldes e ferramentas. Esta componente do projeto é considerada de grande especialização, envolvendo normalmente custos consideráveis. Devido à enorme pressão a que as empresas estão cada vez mais sujeitas, com o intuito de serem competitivas economicamente, os erros de projeto devem ser antecipados antes do fabrico final do produto. É neste sentido que os processos de prototipagem assumem um papel crucial na eliminação desses erros de projeto e são uma ferramenta essencial no processo de engenharia simultânea. No caso do fabrico de pequenas e médias séries, a prototipagem rápida poderá ser uma alternativa de fabrico de ferramentas de produção, reduzindo-se os custos desses equipamentos e aumentando a rentabilidade dos investimentos necessários ao lançamento no mercado de um novo produto (1).

Atualmente, o desenvolvimento da impressão 3D tem surtido efeito em outras áreas das quais se destacam a medicina, a indústria alimentar e a construção civil, que apesar de se tratar da utilização de materiais e aplicações diferentes, usufruem das potencialidades da impressão 3D na definição de geometrias complexas.

Segundo Janice Karin (2), num futuro recente as impressoras tridimensionais deixarão de ser exclusivas de ambientes industriais e passarão também a ser domésticas, permitindo que os objetos possam ser desenhados e impressos pelos utilizadores em ambiente residencial. Atualmente, as pessoas podem ainda não conseguir criar partes funcionais para substituir algo danificado, mas podem criar pequenos objetos de lazer personalizados. Para este mercado

começam a aparecer as primeiras impressoras 3D de baixo custo, que permitem ao utilizador ser o criador de novos objetos ou apenas adquirir, a partir de uma biblioteca digital, o ficheiro CAD do objeto pretendido que pode ser impresso em ambiente residencial.

Os processos diretos de prototipagem podem ser divididos em processos aditivos e processos subtrativos. Nos processos aditivos o modelo é construído camada a camada através da adição de material, enquanto nos processos subtrativos o material é removido de um bloco inicial até chegar à forma final do objeto pretendido (3), como é o caso da maquinagem CNC.

Os processos aditivos de PR principiam com a definição de um modelo geométrico CAD 3D (*Computer Aided Design Three Dimension*), que em seguida é convertido num ficheiro de formato STL (*Standard Tessellation Language*). Neste formato o modelo é descrito através de uma malha envolvente de triângulos (semelhante a uma rede de elementos finitos) que representa do ponto de vista matemático a forma polinomial mais simples para a descrição de uma superfície. Este ficheiro contém as coordenadas cartesianas (XYZ) dos nós de cada triângulo bem como um vetor normal unitário que indica a face exterior do objeto. Desenvolvido pela empresa *3D Systems* em 1987, este formato de ficheiro rapidamente se tornou no *standard* utilizado para transferência de informação para os equipamentos de prototipagem. Existem dois formatos de ficheiro STL, o formato binário e o formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), que apesar de apresentar maiores dimensões possibilita a sua leitura por parte do utilizador (4).

Atualmente, todos os sistemas comerciais de CAD dispõem de um pós processador capaz de gerar ficheiros STL. Após a definição do ficheiro STL deve proceder-se à validação e reparação do modelo, à definição de compensações e à criação de suportes estruturais, caso sejam necessários (4). A operação de validação e reparação de modelos definidos em formato STL é de grande importância, uma vez que a geração da malha de triângulos pode não ser realizada de forma precisa originando anomalias geométricas. Obtido o modelo válido, devem ser realizadas sobre este um conjunto de operações adicionais, como por exemplo, compensado dimensionalmente em função da tecnologia e do material e orientado na zona de trabalho da máquina. A orientação é uma operação importante que determina a qualidade superficial, o tempo de construção, a necessidade de suportes estruturais, contrações e empenos (5).

O ficheiro STL ao ser introduzido no equipamento de prototipagem rápida é convertido num ficheiro SLI (na literatura inglesa, “*slice*”, ou seja fatia), que através do *software* da máquina divide o modelo nas várias camadas de construção (6). Este facto origina que as peças obtidas por estes processos apresentem um *efeito de escada* na superfície. No entanto, dado que o material habitualmente utilizado (ceras, resinas, plásticos, etc...) apresentam uma dureza reduzida, podem-se atenuar facilmente as irregularidades na superfície das peças obtidas através de operações de acabamento realizadas posteriormente.

Recentemente foi proposto um novo formato de ficheiro, o AMF (*Additive Manufacturing File Format*) para substituir o ficheiro STL. Este adiciona mais informação ao ficheiro como a cor, o material, a textura e utiliza triângulos com arestas curvas para melhorar a qualidade do modelo (7).

A PR tem como vantagens a rapidez de execução, a diversidade de materiais disponíveis, a execução de geometrias complexas e o baixo custo de fabricação. Ou seja, em termos gerais, a redução do chamado *“time-to-market”*, fator de enorme relevância num mercado fortemente concorrencial como o atual (8).

Na Figura 2.1 representam-se as diferentes fases associadas à construção de modelos através de processos aditivos de prototipagem rápida.

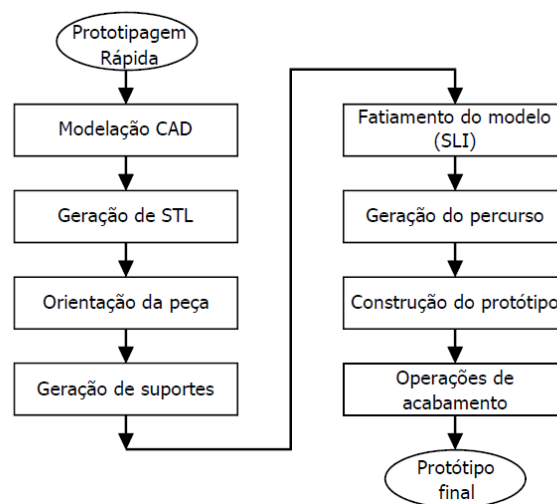


Figura 2.1 – Fases do processo de prototipagem rápida.
(9)

São vários os processos aditivos, sendo que os mais divulgados são: estereolitografia (SLA), sinterização seletiva por laser (SLS), impressão 3D, fabricação de objetos por laminados (LOM), fusão por feixes de eletrões (EBM) e modelação por fusão e deposição (FDM).

2.1. Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia (SLA ou SL) foi inventada por Charle Hull. Este processo foi pioneiro nos processos de prototipagem rápida e é considerado o processo mais abrangente no mercado. Este processo consiste na utilização de uma fonte laser emitindo no domínio dos ultravioletas para solidificar, ponto por ponto, a superfície de uma resina líquida. Os pontos solidificados correspondem a pequenos elementos de volume, de perfil parabólico, habitualmente designados

por *voxel* (pixel tridimensional). Uma vez solidificada uma camada correspondente a uma secção transversal do modelo 3D, a plataforma de construção baixa um valor igual à espessura da camada seguinte repetindo-se o processo de varrimento laser. Esta estratégia, corresponde ao método de construção descendente, passível de observar na Figura 2.2 à esquerda. Em alternativa, Hull (1986) propôs também um método de construção ascendente, passível de observar na Figura 2.2 à direita. Neste caso, a irradiação é efetuada através de uma janela de vidro existente na base da tina que contém a resina, sendo o modelo 3D construído de cima para baixo, com elevação da plataforma móvel após a solidificação de cada camada. Em termos práticos, no método descendente, a diferença manifesta-se na necessidade de existência de um nivelador para reduzir as imperfeições superficiais do modelo e estabilizar a superfície da resina líquida, uniformizando a espessura da camada, mas que aumenta a complexidade do equipamento e o tempo de construção (9). O mesmo não se verifica no método ascendente, no qual a janela garante a estabilização e regularidade de cada camada de resina. Após o final do processo, os objetos são lavados com um solvente e levados a uma câmara de raios ultravioleta, onde é concluída a cura da resina.

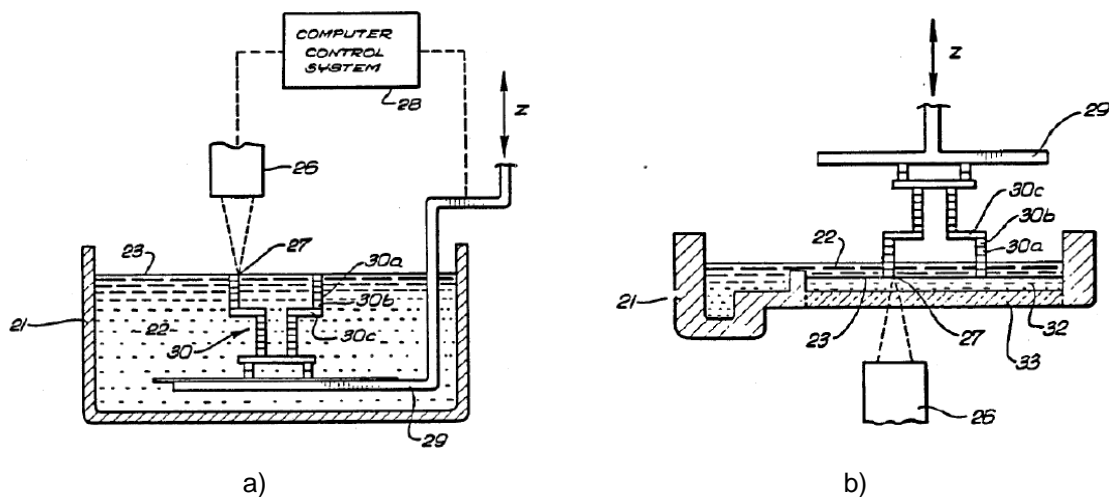


Figura 2.2 – (a) Processo estereolitográfico de construção descendente; (b) Processo estereolitográfico de construção ascendente (9)

Como a construção de protótipos em estereolitografia é efetuada num meio líquido, existe a necessidade de construir suportes estruturais que garantam a replicação da geometria do modelo 3D sem limitações, apoiando convenientemente as camadas solidificadas, que de outra forma se encontrariam em suspensão (9).

2.2. Sinterização Seletiva por Laser (SLS)

O processo de sinterização, vulgarmente designado por sinterização seletiva por laser (SLS – *Selective Laser Sintering*), foi desenvolvido na Universidade do Texas por Deckard e Bourell, e consiste na utilização de um feixe de laser, geralmente de baixa potência (CO_2 de 150W) para, através de mecanismos de amolecimento/fusão, agregar partículas de material em pó (6). A energia do feixe de laser sinteriza seletivamente as zonas onde incide, permanecendo as zonas circundantes sob a forma de pó. Após a construção de uma camada um êmbolo sobe fornecendo uma determinada quantidade de material em pó (fase de alimentação). Um rolo encarrega-se de o distribuir pela zona de trabalho criando uma camada uniforme (operação de nivelamento) e o processo recomeça com o laser a promover a solidificação e consequente adesão à camada anterior. O material não sinterizado serve de suporte ao modelo em construção (construção em cama de pó).

Em alguns equipamentos existe um sistema de pré-aquecimento por radiação infravermelha para elevar a temperatura da câmara de construção um pouco abaixo do ponto de fusão do material, reduzindo deste modo o valor da contração do protótipo.

O equipamento é complexo, permitindo no entanto obter modelos funcionais, em materiais semelhantes aos pretendidos para as peças finais e portanto com propriedades mecânicas aproximadas. Os modelos obtidos por este processo apresentam uma superfície áspera e de elevada rugosidade (6). A Figura 2.3 ilustra de forma esquemática o processo.

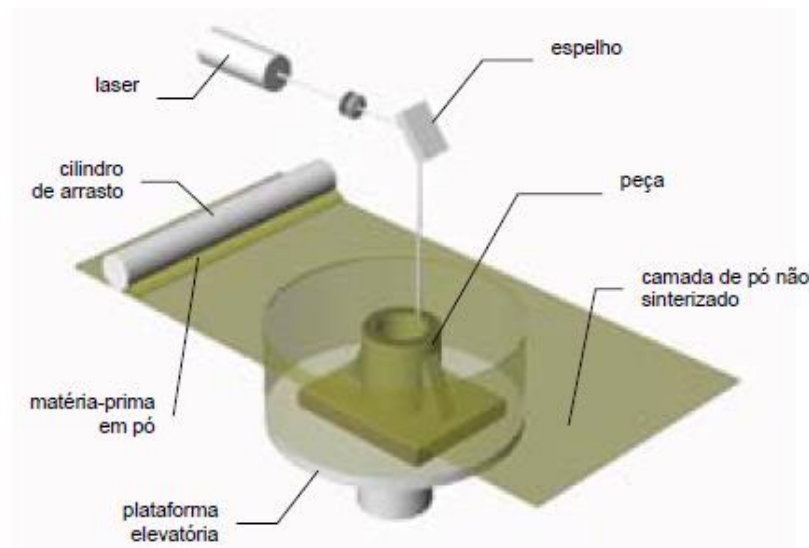


Figura 2.3 – Desenho esquemático do processo de prototipagem rápida por SLS.
(1)

2.3. Impressão 3D (Processo *Colorjetprinting*)

Ao contrário das outras tecnologias de prototipagem rápida, a designação de impressão 3D começou por ser utilizada para designar um conjunto de equipamentos que usam a tecnologia de "jato de tinta". Atualmente o termo de impressão 3D é frequentemente utilizado para designar o conjunto de processos aditivos que permitem a obtenção de modelos físicos a partir de modelos digitais. O processo *Colorjetprinting* começou por ser inicialmente conhecido com a designação de *ZPrinter*, tendo este sido comercializado pela empresa *ZCorporation*, USA que entretanto foi adquirida pela *3DSystem* que alterou a sua designação. Neste processo, os protótipos são construídos sobre uma plataforma onde é colocada uma fina camada de material em pó, posteriormente uma cabeça de impressão faz a deposição seletiva de um ligante líquido que aglomera o pó nas áreas desejadas. O pó solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo durante a fase de fabrico. A plataforma desce e torna-se a adicionar mais pó e o processo repete-se. No final a peça resultante é limpa, removendo-se o pó excedente. Considerando algumas variantes do processo, podem ser utilizados materiais poliméricos, cerâmicos, ceras e metálicos. Esta tecnologia tem tido recentemente um enorme desenvolvimento, atendendo à maior rapidez do processo, sendo bastante utilizada no fabrico de protótipos não funcionais, pois ainda apresenta algumas limitações de acabamento superficial e precisão comparativamente com os outros processos de PR (1). A Figura 2.4 ilustra esquematicamente o processo de impressão tridimensional.

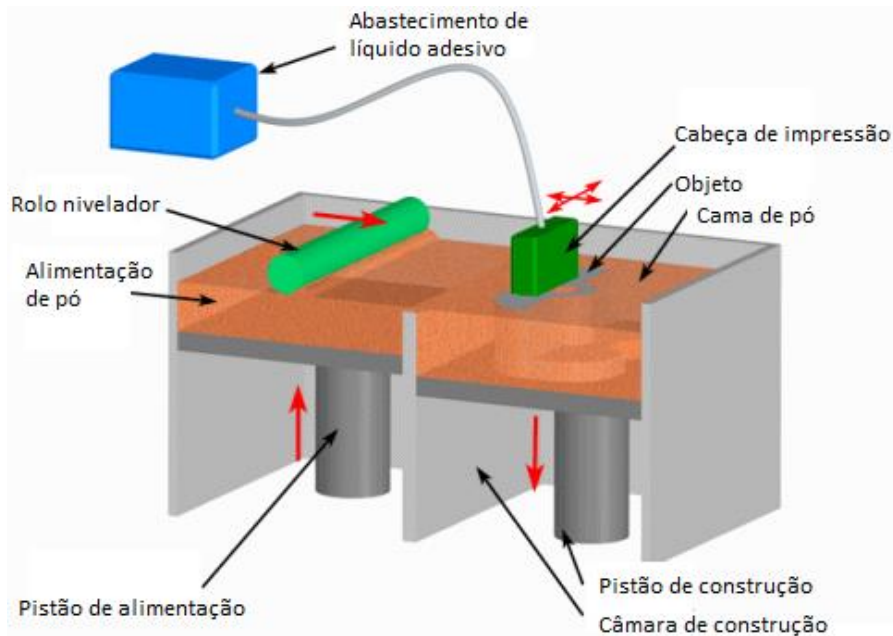


Figura 2.4 – Processo de impressão tridimensional *colorjetprinting*.
[adaptado de <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>]

2.4. Impressão 3D (Processo MultiJetPrinting - Polyjet)

A primeira impressora 3D baseada na tecnologia multijetprinting da Polyjet foi introduzida no mercado em Abril de 2000 pela empresa Objet que atualmente é detida pela Stratasys. Esta tecnologia funciona num sistema semelhante ao jato de tinta de impressão de documentos. Mas em vez de depositar gotas de tinta sobre papel, este processo deposita, por jato, camadas de um fotopolímero líquido sobre uma bandeja de construção que é imediatamente curado com luz UV. Os modelos curados podem ser manipulados e utilizados imediatamente, sem pós-cura adicional. Juntamente com a deposição do material estrutural da peça, a impressora 3D deposita igualmente o material de suporte, especialmente concebido para apoiar e suportar saliências e geometrias complexas. O material de suporte é facilmente removido à mão e com água. Esta tecnologia de impressão 3D tem muitas vantagens, incluindo a qualidade e velocidade superiores, alta precisão e uma ampla variedade de materiais.

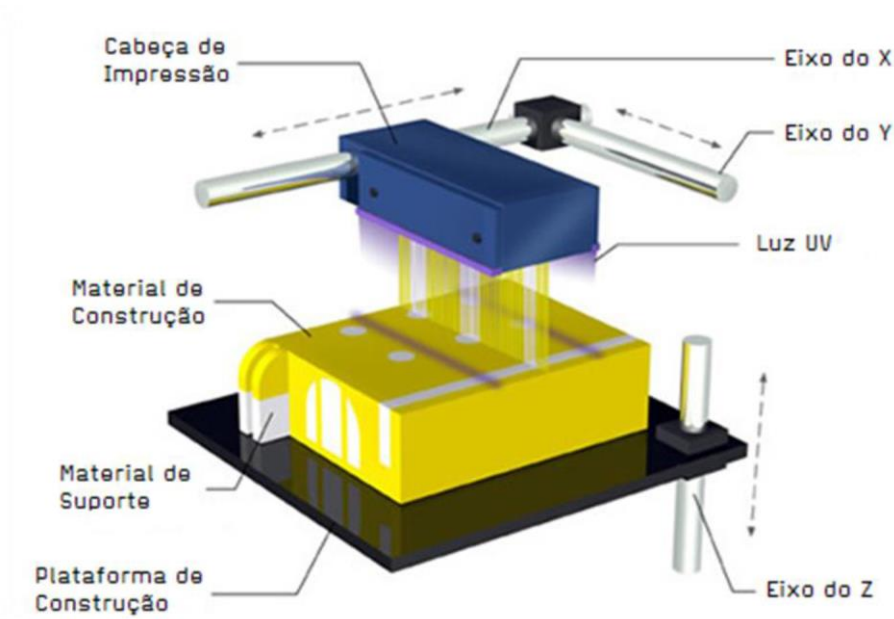


Figura 2.5 – Processo de Polyjet, Pjet
[adaptado de <http://www.emsproto.it/HOW.html>]

2.5. Impressão 3D (Digital Light Processing - DLP)

Desenvolvido pela empresa ENVISIONTEC, as impressoras 3D DLP utilizam um polímero fotopolimerizável curado por luz UV. Este processo utiliza uma tecnologia de projeção denominada de DLP (Digital Light Processing), que utiliza cerca de 1,5 milhões de micro espelhos que podem ser controlados individualmente, para criar a projeção de um plano de secção do objeto a construir. A luz é emitida para a superfície do líquido, endurecendo-o. Este sistema funciona com voxels individuais, ou pixels volumétricos, em vez de camadas, o que significa que as superfícies das peças obtidas são consideravelmente mais suaves do que os sistemas convencionais baseados em camadas.

O processo é consideravelmente mais rápido do que a estereolitografia e outros sistemas semelhantes. Peças DLP são construídas de forma invertida, com o modelo suspenso do lado de baixo da plataforma de construção.

O material de apoio é adicionado para auxiliar a produção de áreas suspensas, podendo ser removido rapidamente, e não tem um impacto importante sobre o tempo de pós-processamento.

- Luz UV - 1
- Base translúcida - 2
- Reservatório de polimerização - 3
- Polímero fotopolimerizável - 4
- Plataforma de construção - 5
- Material de construção - 6
- Material de suporte - 7

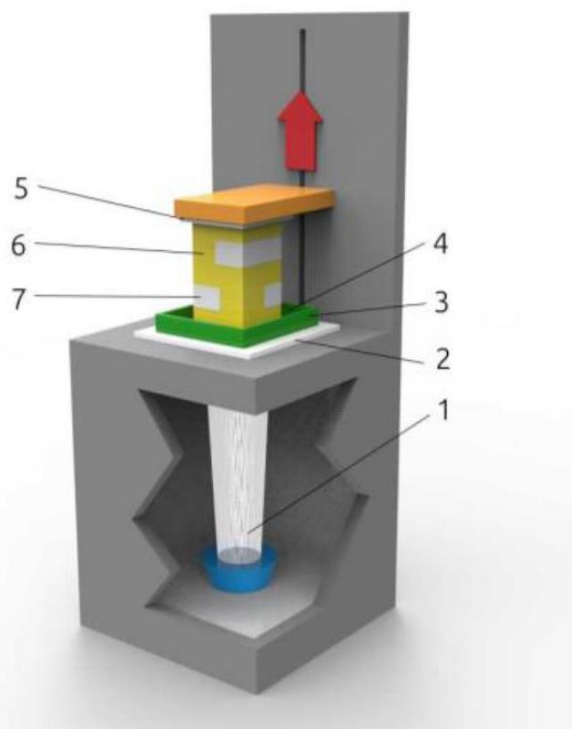


Figura 2.6 – Desenho ilustrativo do processo DLP

[adaptado de <http://www.crucible-design.co.uk/images/uploaded/news-downloads/3d-printing-for-manufacture-a-basic-design-guide-download-original.pdf>]

2.6. Fabrico de objetos por laminados (LOM)

O processo de fabricação de objetos por laminados, designado por LOM (*Laminated Object Manufacture*) foi inventado por Michael Feygin em 1985, tendo a primeira máquina aparecido no mercado em 1992, comercializada pela empresa Helisys. Este processo foi descontinuado mas recuperou o seu interesse com o lançamento recentemente de um equipamento comercializado pela empresa Mcor © Technologies Ltd. A tecnologia LOM utilizava o papel como matéria-prima, com cola numa das faces, este era alimentado intermitentemente a partir de uma bobine. A cola do papel após ativada por uma fonte de calor permite efetuar a união entre as sucessivas camadas do modelo. A espessura da camada é determinada pela espessura do papel. A geometria de cada camada é recortada com um laser de CO₂ de baixa potência (25 a 50 W). Adicionalmente, o laser corta sob a forma de um quadriculado o material em excesso do interior e exterior à figura geométrica, de modo a permitir a extração da peça no final. Este processo permite obter protótipos para a sua visualização estética, ensaio de formas, ajustes e interferências, podendo nalguns casos servirem como protótipos funcionais. Este processo era utilizado no fabrico de modelos de grandes dimensões, uma vez que as matérias-primas eram de relativamente baixo custo. O fabrico deste tipo de modelos encontrava grande utilização na indústria de fundição (1). A Figura 2.7 ilustra esquematicamente o processo de prototipagem rápida por LOM.

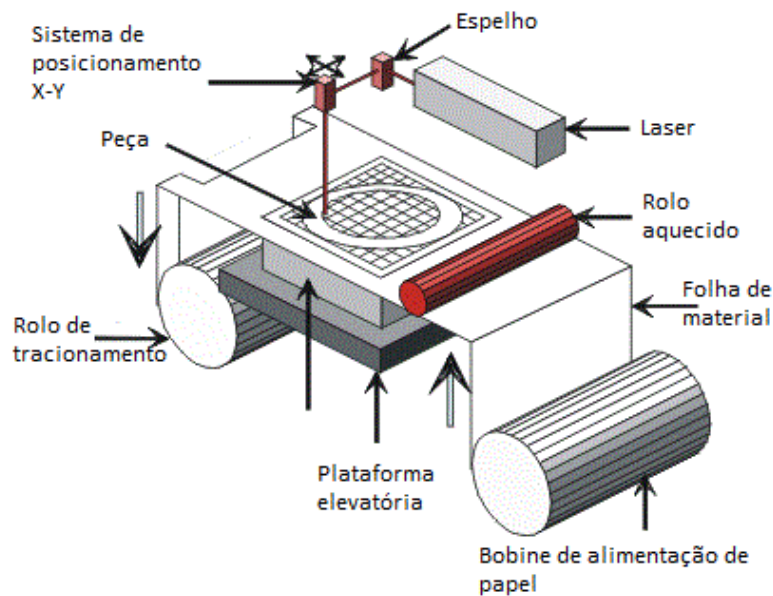


Figura 2.7 – Desenho esquemático da prototipagem por LOM.
[adaptado de <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>]

2.7. Fusão por feixe de elétrons (EBM)

O processo de fusão por feixes de elétrons (*EBM-Electron Beam Melting*) cria objetos metálicos sólidos a partir de pó metálico. O pó é distribuído uniformemente na área de trabalho, depois é pré aquecido até uma temperatura específica (dependendo do material) e por fim um feixe de elétrons faz o varrimento da geometria exata do modelo 3D. O processo é repetido camada a camada. Os modelos são construídos em ambiente de vácuo a elevadas temperaturas o que permite ao material aliviar as tensões internas obtendo assim melhores propriedades do que peças obtidas por fundição. O pó que não é fundido serve de estrutura de suporte. A tecnologia EBM garante grande capacidade de fusão do material tendo assim grande produtividade (10). A Figura 2.8 ilustra o processo EBM.

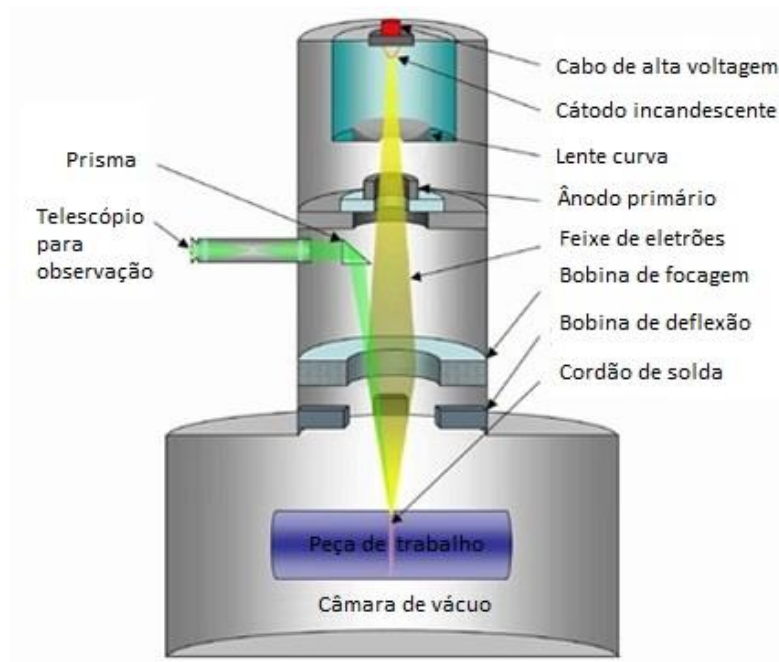


Figura 2.8 – Desenho ilustrativo do processo EBM.
 [adaptado de <http://www.popular3dprinters.com/electron-beam-melting-ebm/>]

2.8. A tecnologia FFF

O processo modelação por fusão e deposição (FDM) foi inventado por S. Scott Crump em 1989 e comercializado em 1990 pela Stratasys. Com a expiração de pelo menos uma das suas patentes permitiu a empresas como a RepRap desenvolver os próprios sistemas de extrusão e utilizar a designação *Fused Filament Fabrication* (FFF) para fornecer um termo legalmente irrestrito na sua utilização (11).

Este processo de prototipagem rápida é baseado na deposição por extrusão de termoplásticos aquecidos, apesar dos fundamentos do processo permitirem a sua aplicação a uma grande variedade de materiais, tais como: ceras, resinas, termoplásticos, metais e vidro. O processo consiste em aquecer o material até uma temperatura ligeiramente acima da temperatura de fusão, o que permite que o material flua facilmente e solidifique assim que entre em contacto com uma superfície sólida. A camada correspondente à secção do modelo é construída pela deposição por varrimento de um filamento de material extrudido. No final da construção de uma camada a plataforma desce e o processo repete-se até o protótipo estar completo. Durante o fabrico do protótipo pode haver a necessidade de criar suportes estruturais, que serão posteriormente removidos. O processo pode ocorrer dentro de uma câmara aquecida para minimizar deformações decorrentes da variação da temperatura. Na Figura 2.9 é apresentado de forma esquemática o processo FFF.

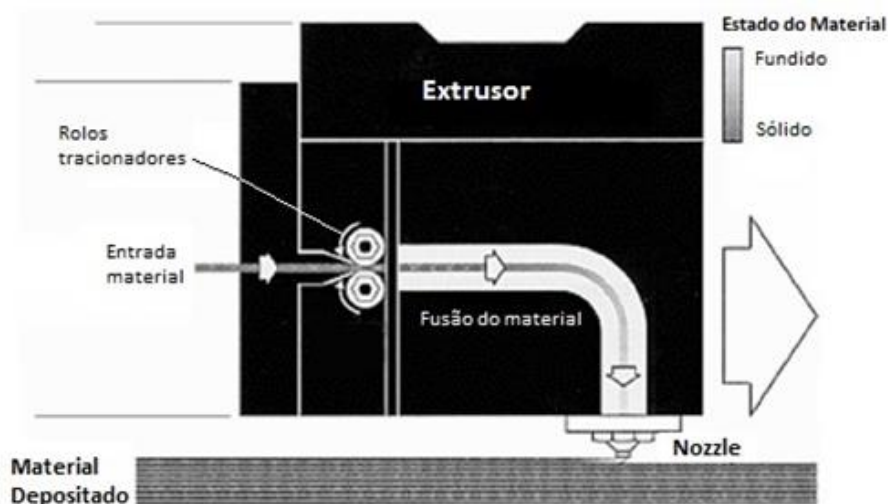


Figura 2.9 – Ilustração representativa do processo FFF.
[adaptado de (12)]

2.8.1. Fatores que influenciam a qualidade e acabamento superficial do processo FFF

O efeito de escada é uma consequência inevitável quando se fabricam peças com base em técnicas aditivas (construção camada a camada), resultando numa excessiva rugosidade superficial. Investigações experimentais têm demonstrado que os fatores predominantes na qualidade do produto final são (13):

- Trajetória de deposição;
- Espessura da camada;
- Orientação da peça
- Material;

A trajetória de deposição de material é definida pelo *software* do equipamento utilizado, o qual fatia o ficheiro STL proveniente do modelo CAD 3D em camadas e gera o caminho do bocal para a construção do objeto. Segundo Pandey et al., (2004) a orientação da trajetória bem como a espessura das camadas são as duas variáveis que mais afetam o acabamento superficial, assim como a distância entre cordões depositados na mesma camada afeta a resistência do produto.

A espessura da camada, para além de influenciar a geometria e a rugosidade superficial, influencia diretamente o tempo de construção, uma vez que camadas mais finas levam a uma menor rugosidade na superfície mas a tempos de construção mais elevados e vice-versa.

A orientação do modelo na mesa de impressão tem influência na rigidez, tempo de construção e no acabamento superficial, uma vez que esta tecnologia apresenta direções preferenciais de deposição do material. Para diminuir o tempo de fabrico a peça deve ser orientada no sentido de diminuir a necessidade de criação de suportes estruturais (15).

No processo FFF, maioritariamente são utilizados dois tipos de materiais termoplásticos, o acrílico butadieno estireno, comercialmente denominado por ABS e o ácido polilático (PLA). O ABS apresenta uma estrutura amorfa, logo não tem um ponto de fusão específico, no entanto, 230°C é o valor de referência para impressão. A temperatura de transição vítrea é de aproximadamente 105°C, o que permite encurtar alguns problemas resultantes do mecanismo de alimentação, uma vez que a diferença entre a temperatura de operação recomendada e a temperatura de transição vítrea do ABS é bastante superior relativamente ao PLA. O ABS requer menos força para ser extrudido, pois apresenta um baixo coeficiente de atrito. Isso faz com que as suas características de extrusão sejam melhores relativamente ao uso de PLA.

O PLA é um polímero biodegradável que pode ser produzido a partir do ácido láctico, proveniente do amido do milho. A temperatura de fusão é cerca de 180°C a 220°C e apresenta uma

temperatura de transição vítrea entre 60°C a 65°C. Este material quando fundido não apresenta o cheiro característico de plástico derretido, como no caso do ABS o que torna este material mais interessante para o uso de equipamentos em ambientes residenciais ou em espaços pouco ventilados.

Existem outros fatores que podem condicionar geometricamente a solução final, como a existência de câmara e mesa de impressão aquecidas, que proporcionam um melhor controlo no processo de arrefecimento do material e diminuem o empeno. Esta solução é particularmente utilizada quando a matéria-prima é ABS, uma vez que este material devido às suas propriedades termofísicas apresenta maior propensão a empenos que o PLA quando sujeitos às mesmas condições de operação.

2.9. Novos desenvolvimentos e perspetivas atuais do mercado “*desktop*”

O mercado de impressão tridimensional tem crescido a um ritmo acelerado, apresentando produtos acessíveis e competitivos para utilizadores particulares. Nesta secção são apresentados os principais desenvolvimentos da impressão 3D ao nível dos equipamentos e da tecnologia disponível.

2.9.1. 3D Systems

A 3D Systems foi fundada em 1986 e começou por criar e desenvolver o processo de estereolitografia (SLA), sendo atualmente uma das empresas líder de mercado, tendo vindo a adquirir outras empresas e as tecnologias por elas comercializadas, nomeadamente a tecnologia de sinterização seletiva a laser (SLS), impressão de jato de cor (CJP), modelagem por fusão e deposição (FDM) ou FFF, impressão multi-jet (MJP) e sinterização direta de metal (DMLS). Na tecnologia FFF para o mercado de impressoras *desktop* apresenta a gama *The Cube* e a impressora 3D Touch. Para o processo de FDM ou FFF utiliza a designação de Plastic Jet Printing (PJP) para evitar conflito de patentes (16).

a) CubeX

Este equipamento, presente na Figura 2.10 permite impressões num volume de 275 x 265 x 240mm, com uma resolução máxima de 100µm. Possui duas unidades extrusoras que podem funcionar com PLA ou ABS (17).

Em relação à unidade extrusora, a fusão do filamento é efetuada pela resistência colocada próxima do canal de extrusão (Figura 2.11), abdicando do bloco de alumínio utilizado por outras soluções construtivas. Para arrefecimento recorre à utilização de alhetas com ventilação forçada.



Figura 2.10 – Impressora CubeX.
Fonte: (17)



Figura 2.11 – Canal de extrusão CubeX.
[Fonte: <http://www.cdg.uk.com/3d/cubex-3d-printer-accessories/1476-extruder-hotend-assembly.html>]

b) Cube2

A Cube2 (Figura 2.12) permite a construção de objetos até 140 x 140 x 140mm com resolução máxima de 250µm em PLA ou ABS. A temperatura de operação recomendada é de 16-29°C (18).

c) Cube® 3

A Cube® 3 (Figura 2.13) é a última tecnologia lançada no mercado pela 3D Systems, é constituída por duas unidades extrusoras que permitem um volume de impressão de 152 x 152 x 152mm com uma resolução máxima de 70µm, podendo o utilizador optar na escolha do filamento entre ABS ou PLA (19).



Figura 2.12 – Equipamento Cube2.
Fonte: (18)



Figura 2.13 – Equipamento Cube® 3.
[Fonte: <http://cubify.com/en/Cube>]

d) 3D Touch

Também pertencente à 3D Systems a 3D Touch (Figura 2.14) é uma impressora maior, de produção descontinuada, com maior capacidade de impressão mas também destinada ao mercado doméstico, educacional e escritório. Com tecnologia FDM, pode conter entre uma e três cabeças de impressão, no caso de ter duas ou três cabeças uma delas pode conter material de suporte. A 3D Touch permite um volume de impressão máximo de $275 \times 275 \times 210\text{mm}$ com uma resolução de camada máxima de $125\mu\text{m}$ e PLA ou ABS como matéria-prima (20).

A unidade extrusora (Figura 2.15) apresenta um mecanismo diferente de fusão do material, relativamente às restantes soluções construtivas apresentadas, fazendo a separação e o isolamento da zona quente relativamente à zona fria. Ao nível do arrefecimento do canal este apresenta geometria simples e recorre à utilização de dois ventiladores para arrefecimento das três unidades extrusoras.



Figura 2.14 – Equipamento 3D Touch.
Fonte: (21)

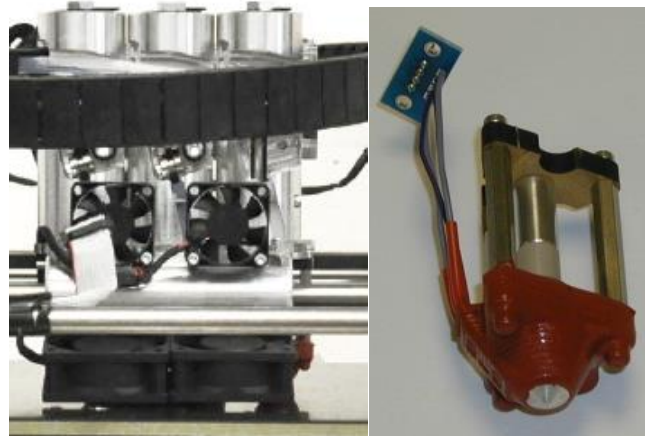


Figura 2.15 – Unidades extrusoras 3D Touch e pormenor do sistema de fusão.

[Fonte: <http://www.cdg.uk.com/3d/3dtouch-accessories/1343-hotend-v11.html>]

2.9.2. Stratasys Ltd.

A Stratasys foi fundada em 1989, tendo uma forte vertente no desenvolvimento de equipamentos de prototipagem industriais. É atualmente com a 3D System, um dos maiores líderes de mercado, tendo adquirido recentemente a MakerBot. Em janeiro de 2010, assinou um acordo com a Hewlett Packard (HP) para a fabricação de impressoras 3D da marca HP, tendo este cessado em agosto de 2012, mas que permitiu lançar para o mercado a HP Designjet 3D Printing, seguindo-se o lançamento da Mojo, uma impressora mais acessível em relação à gama profissional desenvolvida pela Stratasys (22).

a) Mojo

Este equipamento possui duas unidades extrusoras, uma que imprime com ABSplus em nove cores disponíveis, a segunda unidade efetua a deposição do material de suporte num volume máximo de $127 \times 127 \times 127 \text{ mm}$, com uma resolução de $177.8 \mu\text{m}$. Uma das inovações deste produto são as recargas de material de impressão, de fácil montagem e cada recarga é acompanhada de uma nova cabeça de impressão (Figura 2.16) para se obter máxima qualidade e precisão. A impressora inclui também um equipamento de limpeza para remover o material de suporte, ilustrado na Figura 2.17. A impressão é feita em ambiente fechado com controlo da temperatura para minimizar empenos (23).



Figura 2.16 – Cabeça de impressão Mojo.
[Fonte:<http://www.rapidreadytech.com/2012/05/stratasys-reveals-its-mojo-3d-printer/>]



Figura 2.17 – Impressora Mojo e equipamento de remoção do material de suporte.
[Fonte:<http://www.stratasys.com/br/impressora-s-3d/idea-series/mojo#content-slider-1>]

2.9.3. MakerBot

A Makerbot Industries é uma empresa sediada em Nova Iorque e fundada em janeiro de 2009. Nesse mesmo ano, em Março, lançou a primeira impressora, a *Cupcake CNC*, seguindo-se a *Thing-O-Matic* em Setembro de 2010, a *Replicator* em janeiro de 2012 e a *Replicator 2* em Setembro de 2012. Em 19 de junho de 2013 foi adquirida pela Stratasys, continuando a operar como uma empresa separada mas subsidiada pela Stratasys, servindo os segmentos de consumo e mercado *desktop*. Em Janeiro de 2014 lançou para o mercado a *MakerBot Replicator Desktop 3D*.

a) MakerBot Replicator 2

A MakerBot Replicator 2 (Figura 2.18) é uma impressora com uma cabeça de impressão alimentada por PLA, possibilita um volume de construção de 285 x 153 x 155mm com uma resolução de camada até 100 μ m, e a temperatura ambiente de operação recomendada é de 15°C a 32°C (24).

A respetiva cabeça de impressão (Figura 2.19) para além dos restantes elementos é constituída por um bloco de arrefecimento que recorre à utilização de superfícies alhetadas para otimizar a transferência de calor.

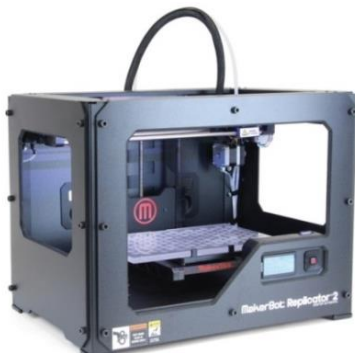


Figura 2.18 – MakerBot Replicator 2.
[Fonte:<http://www.creativetools.se/makerbot-industries-replicator-2-se>]

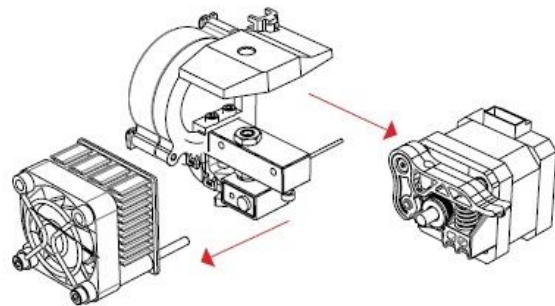


Figura 2.19 – Cabeça de impressão Replicator 2.
[adaptado de (24)]

b) MakerBot Replicator Desktop 3D Printer

A MakerBot Replicator de 5ª geração ilustrada na Figura 2.20 permite um volume de construção de 252 x 199 x 150mm, com resolução máxima de 100µm, também utiliza PLA como matéria-prima e apresenta vários extras relativamente à Replicator 2, nomeadamente uma câmara embutida para facilitar a monitorização e a partilha do resultado impresso, quatro formas de conexão: USB *stick*, USB *cable*, *ethernet cable* e Wi-Fi (25).

Ao nível da cabeça de impressão, é constituída pela MakerBot Replicator Smart Extruder (Figura 2.21), uma solução compacta que apresenta facilidade de substituição, possui sistema de deteção de ausência de filamento que automaticamente suspende a impressão e envia uma notificação para o *software* e para uma aplicação móvel. Com a utilização da aplicação móvel é possível monitorizar o estado da impressão através da câmara existente na impressora, bem como controlar o processo de impressão.

Esta cabeça de impressão abdica do tradicional bloco de arrefecimento, efetuando o arrefecimento diretamente no canal com recurso a alhetas e ventilação forçada. O bloco de aquecimento é provido de um material isolante (*kapton tape*) que diminui as perdas de calor.



Figura 2.20 – Equipamento MakerBot Replicator Desktop 3D Printer.
[Fonte: <http://www.r3dprinter.com/product/makerbot-replicator-5th-generation-desktop-3d-printer/>]

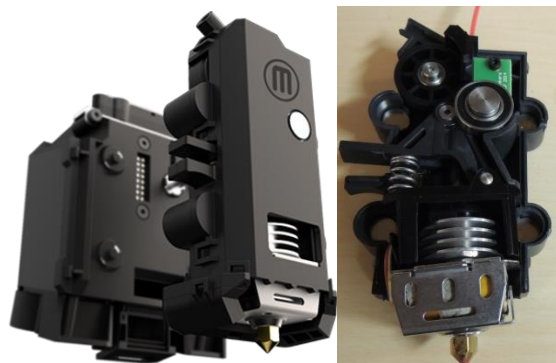


Figura 2.21 – Unidade extrusora MakerBot Replicator Smart Extruder.
[Fonte: <http://intentional3d.com/wp-content/uploads/2014/04/DSCN9517.jpg>]

2.9.4. Ultimaker

A Ultimaker foi fundada em 2011 e em Maio do mesmo ano lançou o primeiro produto. Os fundadores da empresa começaram como participantes do projeto RepRap. A primeira impressora 3D desenvolvida pela Ultimaker foi a Protobox Ultimaker, passados alguns meses lançou no mercado a Ultimaker Original, sob uma licença de código aberto e em setembro de 2013 lançou a Ultimaker2 (26).

a) Ultimaker Original

A Ultimaker Original (Figura 2.22) é uma impressora com uma cabeça de impressão alimentada por PLA ou ABS, possibilita um volume de construção de 210 x 210 x 205mm, com uma resolução até 20 μ m e a temperatura ambiente de operação recomendada é de 15°C a 32°C (27).

A cabeça de extrusão (Figura 2.23) não apresenta bloco de dissipação nem nenhum outro sistema de arrefecimento do canal.

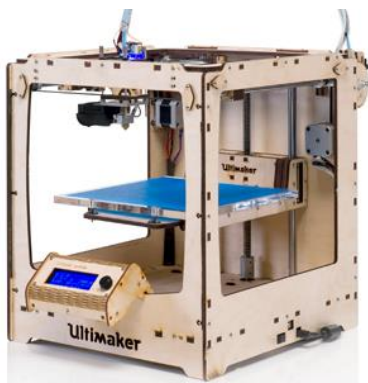


Figura 2.22 – Ultimaker Original.
[Fonte:<https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-original>]

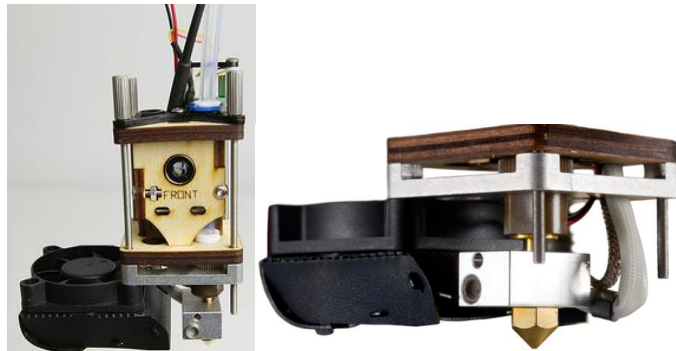


Figura 2.23 – Cabeça de impressão Ultimaker Original.
[Fonte:<https://www.flickr.com/photos/ultimaker/8643121414/>]

b) Ultimaker2

A Ultimaker2, ilustrada na Figura 2.24 é alimentada por PLA ou ABS, possibilita um volume de construção de 230 x 225 x 205mm com uma resolução até 20 μ m. A mesa de impressão pode ser aquecida de 50°C a 100°C, sendo a temperatura ambiente de operação recomendada é de 15°C a 32°C (28).

Ao nível da unidade extrusora (Figura 2.25), em relação à sua antecessora, a Ultimaker2 já apresenta um ventilador para arrefecimento do filamento à entrada e é constituída por dois ventiladores para arrefecimento do material extrudido.

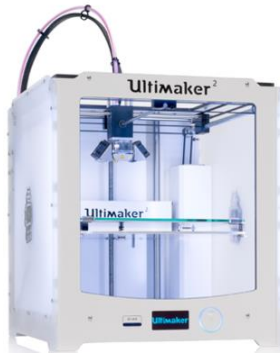


Figura 2.24 – Equipamento Ultimaker 2.
[Fonte:<https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-2>]

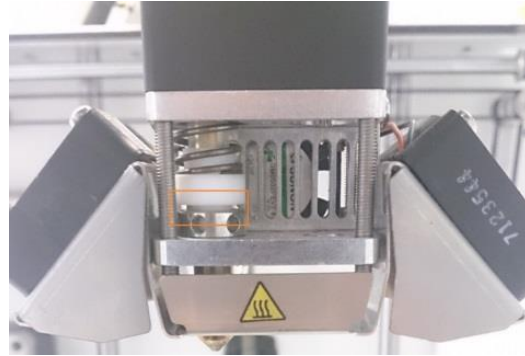


Figura 2.25 – Cabeça de impressão Ultimaker 2.
[Fonte:<https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-2>]

2.9.5. Denford

A Denford, empresa sediada no Reino Unido, tem uma grande tradição em engenharia e fabrico de máquinas-ferramentas CNC tipo “desktop”. Recentemente lançou-se no mercado das impressoras 3D com a impressora UP! 3D Plus (Figura 2.26). Esta impressora tem um volume de impressão de 140 x 140 x 135mm, com uma espessura de camada até 150 μ m e possibilita o uso de PLA e ABS como matéria-prima (29).

Relativamente à unidade extrusora (Figura 2.27), é constituída apenas por um ventilador que tem a função de baixar a temperatura do filamento à entrada e ao mesmo tempo faz o arrefecimento do material fundido para posterior adesão à camada.

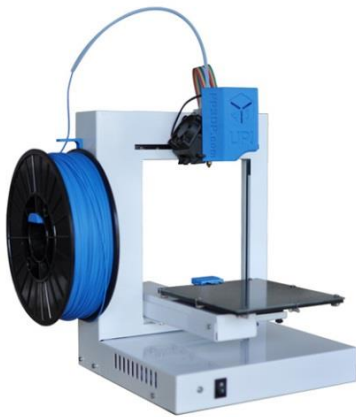


Figura 2.26 – Equipamento UP! 3D Plus.
[Fonte:http://www.dynamism.com/3d-printers/up_plus_2.shtml]

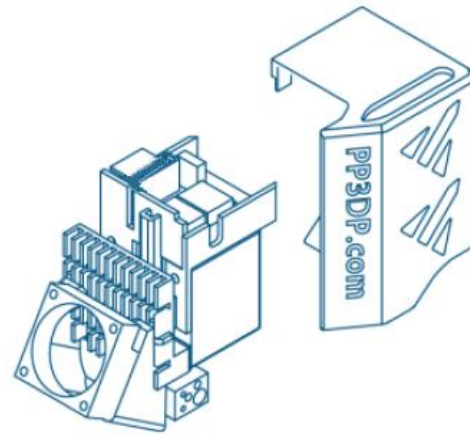


Figura 2.27 – Cabeça extrusora UP! 3D Plus.
Fonte: (29)

2.9.6. Leapfrog Creatr

A impressora 3D Leapfrog Creatr (Figura 2.28) permite utilizar uma ou duas unidades extrusoras, em que uma delas pode funcionar com material de suporte. Apresenta um volume de construção de 230 x 270 x 200mm e uma resolução máxima de 50 μ m com mesa aquecida. Relativamente às impressoras concorrentes, suporta uma vasta gama de materiais, ABS, PLA, Nylon e PVA que é solúvel em água e pode ser usado como material de suporte (30).

A cabeça de impressão é composta por duas unidades extrusoras (Figura 2.29) que são refrigeradas por um bloco de arrefecimento no qual incide ventilação mecânica.



Figura 2.28 – Impressora Leapfrog Creatr.
Fonte: (30)



Figura 2.29 – Unidade extrusora da Leapfrog Creatr.
[Fonte:<http://www.3d-printers.com.au/2013/01/17/leapfrog-creatr-3d-fdm-printer-review/>]

2.9.7. Open-source RepRap Project

O projeto *RepRap* é uma iniciativa para desenvolver uma impressora 3D que pode imprimir a maioria dos seus próprios componentes. Focado no método aditivo de fabricação por filamento fundido (FFF) foi fundado em 2005 pelo Dr. Adrian Bowyer, professor de engenharia mecânica na Universidade de Bath, no Reino Unido.

Tratando-se de um projeto aberto os resultados desenvolvidos são utilizados através de uma licença de *software* livre e permite aos utilizadores e investigadores partilhar novas soluções construtivas ou melhorias relativamente às existentes.

2.9.8. Formlabs

A Formlabs foi fundada em 2012 por uma equipa de engenheiros e *designers* pertencentes ao projeto *MIT Media Lab and Center for Bits and Atoms*, lançando para o mercado em 2013 o primeiro produto de impressão tridimensional, a Form1 (Figura 2.30). Com processo aditivo de fabrico SLA, a Form1 é uma impressora desktop que apresenta a qualidade dos equipamentos industriais a um preço reduzido. Este equipamento direciona um laser para um reservatório de resina líquida, fazendo a camada solidificar. As dimensões máximas de construção são 125 × 125 × 165mm e a resolução mínima de camada é de 25µm, sendo a espessura da camada substancialmente mais baixa, relativamente à generalidade dos equipamentos *desktop* que operam por FFF (31).



Figura 2.30 – Equipamento Form1.

[Fonte: <http://www.shapeways.com/contests/prototype-to-product-formlabs>]

2.10. A impressora BEETHEFIRST da BEEVERYCREATIVE

A BEETHEFIRST ilustrada na Figura 2.31 é a primeira impressora 3D desenvolvida e fabricada em Portugal. Pertencente à BEEVERYCREATIVE, é uma impressora 3D *desktop* de baixo custo, lançada em 2013. Este equipamento utiliza a tecnologia de impressão FFF, fazendo extrudir a matéria-prima (PLA), proveniente de um rolo de filamento de 1.75mm de diâmetro, na mesa de impressão não aquecida. As dimensões de impressão são 190 x 135 x 125mm e possibilita ao utilizador seleccionar duas gamas de resolução de camada, alta (100µm) ou média (300µm) estando esta directamente relacionada com a qualidade superficial do protótipo e com o tempo de fabrico. A temperatura ambiente de funcionamento recomendada é situada no intervalo 15°C a 30°C (32).

O invólucro exterior (400 x 400 x 140mm) é composto por metal nas faces laterais, garantindo o suporte e rigidez e por acrílico nas restantes faces.

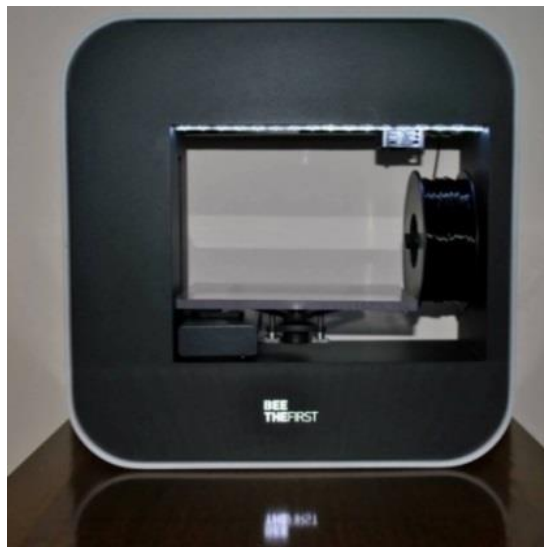


Figura 2.31 – Impressora BEETHEFIRST.

[Fonte: <http://www.3ders.org/articles/20131026-beethefirst-a-beautiful-3d-printer-made-in-portugal.html>]

Na parte superior do equipamento encontra-se a cabeça extrusora, possível de observar na Figura 2.32, composta pelo mecanismo de alimentação do material, o sistema de fusão do PLA e o sistema de refrigeração, que é composto por dois ventiladores, o *blower*, um ventilador destinado ao arrefecimento do material extrudido, para adesão e solidificação à camada precedente, e um segundo ventilador para arrefecimento do canal extrusor à entrada.

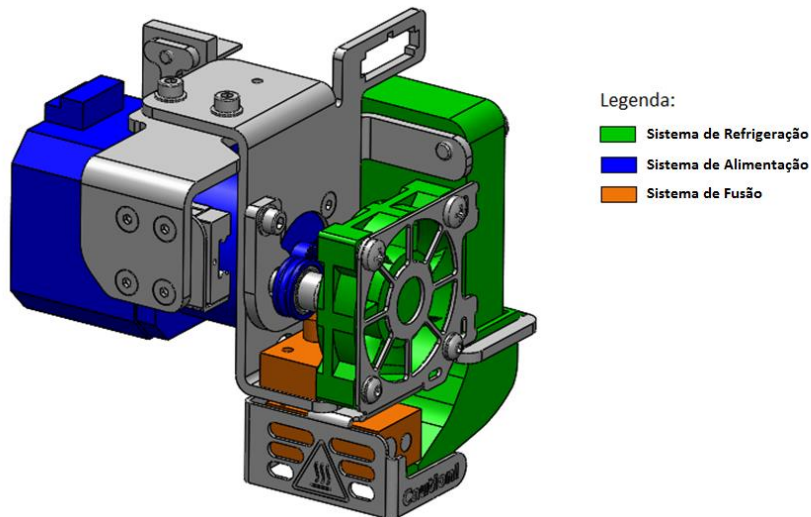


Figura 2.32 – Cabeça extrusora.

O sistema de fusão do material (Figura 2.33) é o elemento fulcral no qual reside um certo grau de complexidade, uma vez que o canal na parte superior tem que apresentar uma temperatura baixa, abaixo da temperatura de transição vítrea do material (PLA), para que exista alimentação contínua, e na parte inferior a temperatura terá de ser superior à temperatura de fusão do material a extrudir. Este sistema é conseguido através de dois blocos de alumínio envolventes no canal de aço, no qual o bloco superior tem como finalidade arrefecer o canal, à custa da ventilação mecânica, e o bloco inferior aquece o material até à temperatura de fusão através de uma resistência de aquecimento de 30W incorporada. O controlo da temperatura é efetuado através da sonda de temperatura (sonda NTC) também esta incorporada no loco de aquecimento.

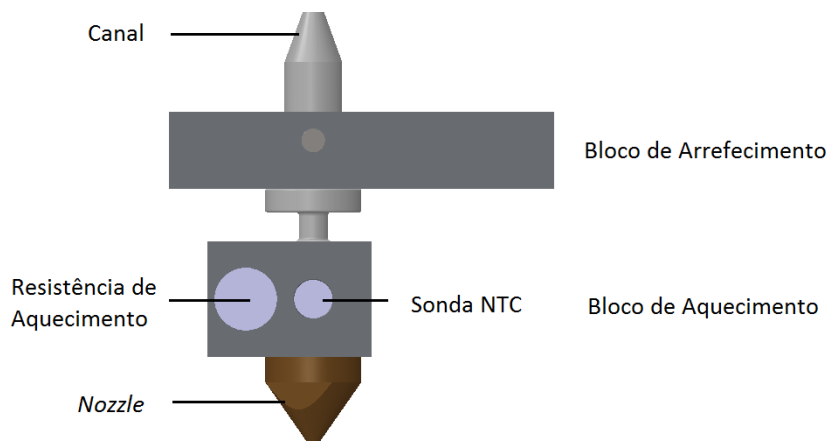


Figura 2.33 – Sistema de fusão.

A alimentação do filamento é efetuada por duas rodas motrizes que tracionam a matéria-prima. Uma das rodas apresenta estrias e está ligada a um motor de passo que é responsável por tracionar o filamento. A outra roda apresenta rotação livre através de um rolamento e tem a finalidade de guiar e oferecer resistência ao tracionamento do filamento.

Na parte inferior do equipamento encontram-se a fonte de alimentação e as placas de circuitos, responsáveis pela coordenação e normal funcionamento do sistema.

2.10.1. Desenvolvimento de estudos numéricos

Alguns investigadores têm apresentado desenvolvimentos na criação de modelos de simulação numérica com recurso a elementos finitos, utilizando a dinâmica de fluidos para estudar o comportamento dos materiais durante o processo de fusão.

Ramanath et al. (33)(34) investigaram o comportamento da fusão do biopolímero *polycaprolactone* (PCL) na câmara de fusão do processo FDM utilizando a modelação de elementos finitos no ANSYS. O comportamento térmico e o escoamento na câmara de fusão foram estudados pela variação das condições de entrada, analisando a velocidade e os perfis da queda de pressão em diferentes zonas da câmara de extrusão.

Nikzad et al. (35) investigaram o comportamento da fusão de compósitos de ferro / ABS na câmara de fusão do processo FDM, considerando a temperatura, a velocidade e a queda de pressão como os principais parâmetros de análise. Os resultados fornecem avanços promissores no desenvolvimento do escoamento de materiais compósitos metal / polímero e na otimização dos parâmetros FDM para uma melhor qualidade da peça final obtida.

Zhang e Chou (36) desenvolveram um modelo de elementos finitos para simular o processo de deposição do material. O modelo é utilizado para estudar os efeitos dos parâmetros de deposição na criação de tensões residuais e empenos gerados devido ao aquecimento e arrefecimento cíclicos durante o processo FDM.

3. Transferência de calor

Devido à revolução da tecnologia da informação nas últimas décadas, o forte aumento da produtividade industrial conduziu a uma melhoria da qualidade de vida. Muitas descobertas foram viabilizadas por avanços da engenharia térmica que garantiram o controle preciso da temperatura desde sistemas de nano escala a equipamentos de elevadas dimensões.

Sempre que existe uma diferença de temperaturas num meio ou entre meios, haverá necessariamente transferência de calor. Esta enquadra-se num dos três modos de transferência de calor, condução, convecção ou radiação.

3.1. Calor por condução

Condução de calor pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas. Desta forma, a troca de energia tem lugar da região de alta temperatura para a de baixa temperatura, pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas no caso de fluidos, ou pelo movimento de elétrons no caso dos materiais sólidos (37).

Para a condução de calor a equação que quantifica o fluxo de calor é conhecida pela *Lei de Fourier*, e apresenta a seguinte forma para uma distribuição de temperatura num processo unidimensional (37):

$$q_{cond}'' = -K \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde o fluxo de calor $q_{cond}'' \left(\frac{W}{m^2} \right)$ é a taxa de calor transferido na direção x por unidade de área, perpendicular à direção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$ nessa direção e $K \left(\frac{W}{m.K} \right)$ é a condutividade térmica do material.

3.2. Calor por convecção

Este modo de transferência de calor é composto por dois mecanismos. Para além da energia transferida devido ao movimento aleatório das moléculas (difusão), a energia é também transferida pelo movimento global do fluido. De acordo com a natureza do fluido, a convecção pode ser classificada de duas formas:

- Convecção forçada – quando existe escoamento do fluido no meio exterior;
- Convecção natural – escoamento provocado por forças internas, criadas pela diferença de densidade devido a diferença de temperatura do fluido, em pontos distintos.

A equação que define a convecção é conhecida pela Lei de Newton do arrefecimento e é dada por (37):

$$q_{conv}'' = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde q_{conv}'' ($\frac{W}{m^2}$) é o fluxo de calor por convecção, o parâmetro h ($\frac{W}{m^2.K}$) é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s e T_∞ as temperaturas da superfície e do fluido, respetivamente.

3.3. Calor por radiação

Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. Todas as superfícies emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Mesmo no vazio, existe troca de energia entre corpos a diferentes temperaturas.

O fluxo de calor emitido por uma superfície a uma dada temperatura é dado por (37):

$$q_{rad}'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Eq. 3}$$

A expressão seguinte apresenta a diferença entre a energia térmica que é emitida e a que é absorvida (37).

$$q_{rad}'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

ε – Emissividade, $0 \leq \varepsilon \leq 1$

σ – Constante de Stefan-Boltzman, 5.67×10^{-8} ($\frac{W}{m^2.K^4}$)

T_s – Temperatura absoluta da superfície (K)

T_{viz} – Temperatura da vizinhança (K)

3.4. Resistência térmica de contacto

Em sistemas compostos por vários componentes, pode haver uma queda de temperatura entre as superfícies dos vários materiais. Esta variação de temperatura é atribuída à resistência térmica de contacto, $R_{t,c}$. O efeito é ilustrado na Figura 3.1 e, para uma área unitária, a resistência é definida na Equação 5.

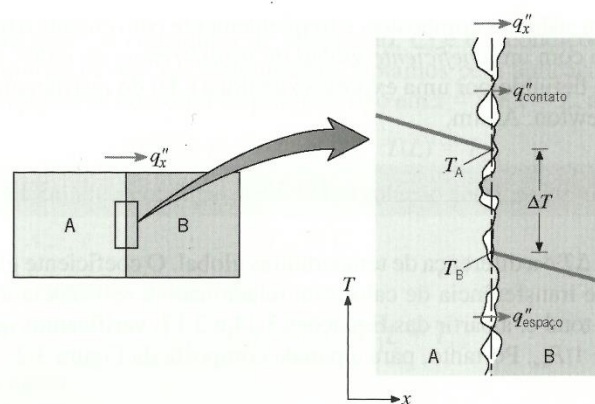


Figura 3.1 – Queda de temperatura devido a uma resistência térmica de contacto.
Fonte: (37)

$$R_{t,c}'' = \frac{T_A - T_B}{q_x''} \quad \text{Eq. 5}$$

A existência de uma resistência de contacto não-nula deve-se principalmente aos efeitos da rugosidade superficial. Na ligação entre os componentes, existem pontos de contacto entre as superfícies, intercalados por lacunas que na maior parte dos casos são preenchidas por ar. A transferência de calor dá-se portanto através da condução da área de contacto real e à condução e/ou radiação através das lacunas.

Com vista a reduzir a resistência térmica de contacto, para sólidos cujas propriedades térmicas são superiores à do fluido que preenche as lacunas, a redução pode ocorrer através do aumento da área de contacto. Tal aumento pode ser obtido através do aumento de pressão de contacto e/ou pela redução da rugosidade das superfícies em contacto. A resistência de contacto pode também ser reduzida pela aplicação de um fluido de elevada condutividade térmica entre as superfícies. Desta forma, qualquer substância que preencha as lacunas entre superfícies em

contacto e cuja condutividade térmica seja superior à do ar irá provocar uma redução da resistência térmica de contacto.

3.5. Mecanismos que potenciam o aumento da transferência de calor

Normalmente, a taxa de transferência de calor pode ser aumentada de duas formas. Através do coeficiente convectivo h , pelo aumento da velocidade do fluido e/ou através da manipulação da temperatura do fluido. No entanto, há situações nas quais o aumento de h até ao valor máximo possível não é suficiente para obter a taxa de transferência de calor desejada, ou os custos associados constituem um entrave. Contudo, a taxa de transferência de calor pode ser elevada pelo aumento da área da superfície através da qual ocorre a convecção. Uma forma de aumentar a área, com o objetivo específico de aumentar a taxa de transferência de calor entre um sólido e um fluido é através da inserção de superfícies alhetadas ilustrada na Figura 3.2. Porém, a alheta em si representa uma resistência condutiva à transferência de calor na superfície original. Para tal, é necessário avaliar o desempenho da alheta através da determinação da efetividade da alheta (ε_a) (37).

$$\varepsilon_a = \frac{q_a}{hA_{tr,b}\theta_b} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde q_a é a taxa de transferência de calor da alheta, $A_{tr,b}$ é a área da secção transversal da alheta na base e θ_b a diferença entre a temperatura da base da alheta e a temperatura do fluido (T_∞).

Assim para qualquer projeto racional, a utilização de alhetas justifica-se para $\varepsilon_a \geq 2$.

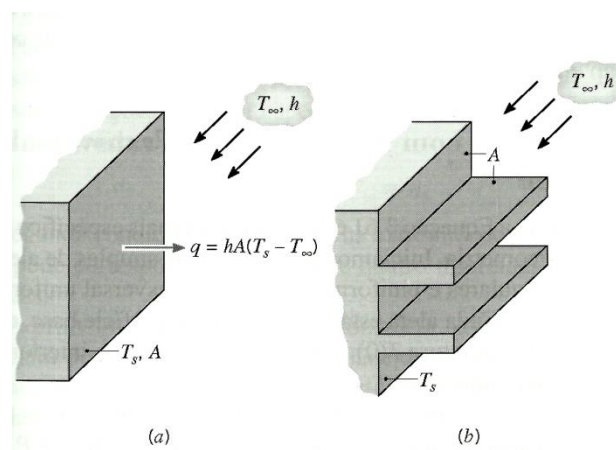


Figura 3.2 – Utilização de alhetas para melhorar a transferência de calor numa parede plana. (a) Superfície sem alhetas. (b) Superfície alhetada.

Fonte: (37)

As propriedades termofísicas do material apresentam também influência na taxa de transferência de calor. Materiais com baixa condutividade térmica apresentam características isolantes, sendo este um parâmetro a ter em consideração na escolha do material.

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão expostos os procedimentos experimentais pela sua ordem cronológica de acordo com o trabalho realizado. Primeiro irá ser abordada a fase de recolha de dados da impressora, seguidamente a construção de um modelo de simulação numérica, a simulação de soluções de melhoria e, por último, a implementação de soluções de otimização seguidas de nova medição experimental.

4.1. Aquisição dos parâmetros gerais de funcionamento do equipamento

Numa primeira fase, no sentido de recolher os parâmetros representativos do processo para a criação do modelo virtual foi efetuada a recolha das condições de funcionamento do equipamento, através da colocação de termopares em locais estratégicos da unidade extrusora com o propósito de efetuar a aquisição de temperatura na realização de diferentes testes. O princípio de funcionamento dos termopares baseia-se no efeito de Seebeck (38). Sempre que dois metais com propriedades termoelétricas diferentes se encontram ligados através de uma das extremidades (junção de medição), e esta é exposta a uma variação de temperatura, na outra extremidade (junção de referência) é gerada uma força eletromotriz térmica, que é função da diferença de temperatura entre o ponto de contacto e o ponto de medição (39). Com o auxílio de um conversor é possível converter a variação de tensão em variação de temperatura.

Nesta fase, recorreu-se também à utilização de termografia através de uma câmara termográfica existente no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Esta técnica de medição à distância transforma a radiação infravermelha invisível ao olho humano numa imagem visível.

4.1.1. Colocação de termopares

A colocação dos termopares foi maioritariamente na unidade extrusora. Devido às limitações impostas por este tipo de tecnologia, tratando-se de uma técnica de medição por contacto, foi necessário efetuar pequenas alterações à geometria do equipamento, através de um furo no canal frio e no bloco de arrefecimento, e um rasgo lateral no bloco de aquecimento para posicionamento

e fixação dos termopares 3, 5 e 2, respetivamente. Para um melhor controlo e rigor de medição foi utilizada pasta térmica (Ref. HT5025) no contacto entre a superfície e o termopar. A Figura 4.1 ilustra de forma esquemática a disposição adotada dos termopares. Na Tabela 1 apresentam-se os termopares utilizados e as suas características. Para aquisição de dados utilizou-se o equipamento *Data Logger USB TC-08* (Ref. A0830/856).

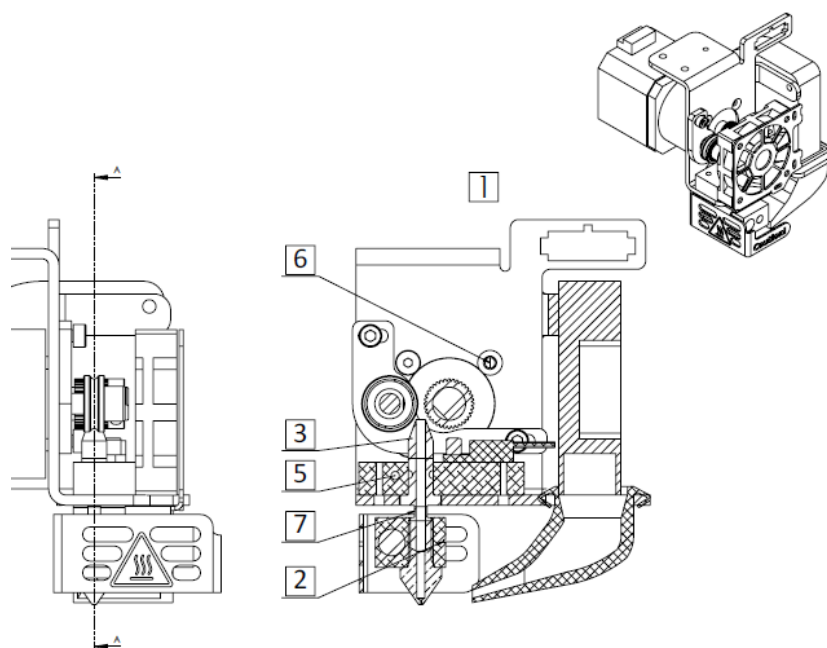


Figura 4.1 – Desenho ilustrativo da colocação dos termopares.

Tabela 1 – Características dos termopares utilizados.

Nº	Designação	Referência	Precisão	Gama de med.
1	Temperatura da “nuvem”	K 409-4908	($\pm 1.5^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$)	-100 até 250 ^o C
2	Boco de aquecimento	T 621-2164	($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $T \leq 125^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times T^{\circ}\text{C}$, $T > 125^{\circ}\text{C}$)	-200 até 350 ^o C
3	Canal frio	K 409-4908	($\pm 1.5^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$)	-100 até 250 ^o C
4	Temperatura ambiente	Type K Air Probe		-50 até 250 ^o C
5	Bloco de arrefecimento	K 409-4908	($\pm 1.5^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$)	-100 até 250 ^o C
6	Suporte	K 409-4908	($\pm 1.5^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$)	-100 até 250 ^o C
7	Transição	K 409-4908	($\pm 1.5^{\circ}\text{C} \pm 0.25\%$)	-100 até 250 ^o C

4.1.2. Testes realizados

Os testes realizados tiveram como objetivo obter o mapeamento térmico do canal e permitir analisar a influência dos sistemas de alimentação e ventilação, bem como verificar a influência da temperatura ambiente no processo. Para alterar os parâmetros normais de funcionamento do equipamento, foi utilizado o *software* de controlo e desenvolvimento do equipamento fornecido pela empresa, o qual, entre outras funções, permite a inserção do valor da temperatura de fusão bem como o controlo do *blower*. Foram então realizados os seguintes testes:

Teste 1.1 - Este teste teve como objetivo prever o funcionamento do equipamento quando sujeito a um aumento da temperatura ambiente, para valores próximos do limite de funcionamento recomendados para o equipamento. Uma vez que a temperatura ambiente condiciona o arrefecimento do equipamento, este teste foi realizado na câmara de testes existente na empresa com aumento da temperatura do ar (com incrementos de 10s) até aos 4760s. Este teste foi executado sem recurso à extrusão e com o *blower* desativado, à temperatura de 150°C, sendo a duração do teste de 6650s.

Teste 1.2 - Neste teste, o objetivo passa por avaliar o efeito da extrusão na carga térmica global do sistema. Para tal, colocou-se o equipamento em aquecimento até aos 220°C. Assim que todo o sistema de fusão do filamento estabilizou, deu-se início à fase de medição com a duração de 500s, testando-se dois cenários diferentes: *blower* desligado com e sem extrusão e *blower* ligado com e sem extrusão. Para permitir analisar este efeito separadamente sem a inserção de mais variáveis durante o processo, este e os restantes testes foram realizados em espaço fechado e amplo no sentido da temperatura ambiente não variar ao longo do teste, uma vez que a câmara de testes utilizada apenas permitia aquecimento, sendo um volume fechado e de dimensões reduzidas, implicando a normal utilização do equipamento a alterações da temperatura do ar dentro da câmara.

Teste 1.3 - Este teste teve como objetivo analisar a influência do *blower* no canal, sendo este teste executado nos mesmos parâmetros do teste 1.2 mas sem extrusão. Este teste teve a duração de 500s, sendo desativado o *blower* a partir dos 250s.

Teste 1.4 - Com o mesmo objetivo do teste 1.3, este teste ocorreu nas mesmas condições do teste anterior, mas com variação da temperatura. O teste iniciou à temperatura de 150°C até aos 9300s, alternando o funcionamento do *blower*. De seguida foi inserido no *software* o valor de aquecimento de 220°C, fazendo-se alternar também o funcionamento do *blower* até finalizar o teste, com a duração de 10220s.

Ao longo dos testes foram adquiridas imagens termográficas. Na impossibilidade de recolha de informação através de meios opacos, esta tecnologia foi utilizada com o objetivo de obter o mapeamento térmico do invólucro exterior do equipamento.

Uma condição fundamental foi garantir a realização dos diferentes testes nas condições iniciais, isto é, garantir que o equipamento se encontra à temperatura ambiente aquando da realização do teste, conduzindo a longos intervalos de interrupção entre testes.

A Figura 4.2 ilustra o aparato experimental, assim como os equipamentos utilizados durante a atividade experimental.



Figura 4.2 – Aparato experimental.

4.1.3. Resultados obtidos e discussão

Para uma melhor compreensão dos testes realizados na fase primordial de recolha de dados, a Tabela 2 descreve resumidamente os principais parâmetros alterados.

Tabela 2 - Sumário dos testes realizados na fase de aquisição de parâmetros.

Designação	Temperatura de operação da resistência [°C]	Recurso à extrusão	Utilização do blower
Teste 1.1	150	Não	Não
Teste 1.2	220	Parcial	Parcial
Teste 1.3	220	Não	Parcial
Teste 1.4	150/220	Não	Parcial

O resultado obtido no Teste 1.1 é apresentado na Figura 4.3. Neste teste verifica-se que o aumento da temperatura ambiente leva a um aumento da temperatura da unidade extrusora, como era de prever, justificado pela diminuição da variação da temperatura entre a superfície e o fluido, que se traduz na diminuição da troca de calor por convecção.

A temperatura no canal frio e no bloco frio situam-se próximas de 47°C quando o equipamento opera em condições de temperatura ambiente limite recomendadas (30°C).

Neste teste verifica-se um lento processo de estabilização da temperatura nos componentes que não estão diretamente em contacto com a fonte, que é o caso de todos os componentes monitorizados, à exceção do bloco de aquecimento e a zona inferior do canal, denominada por transição.

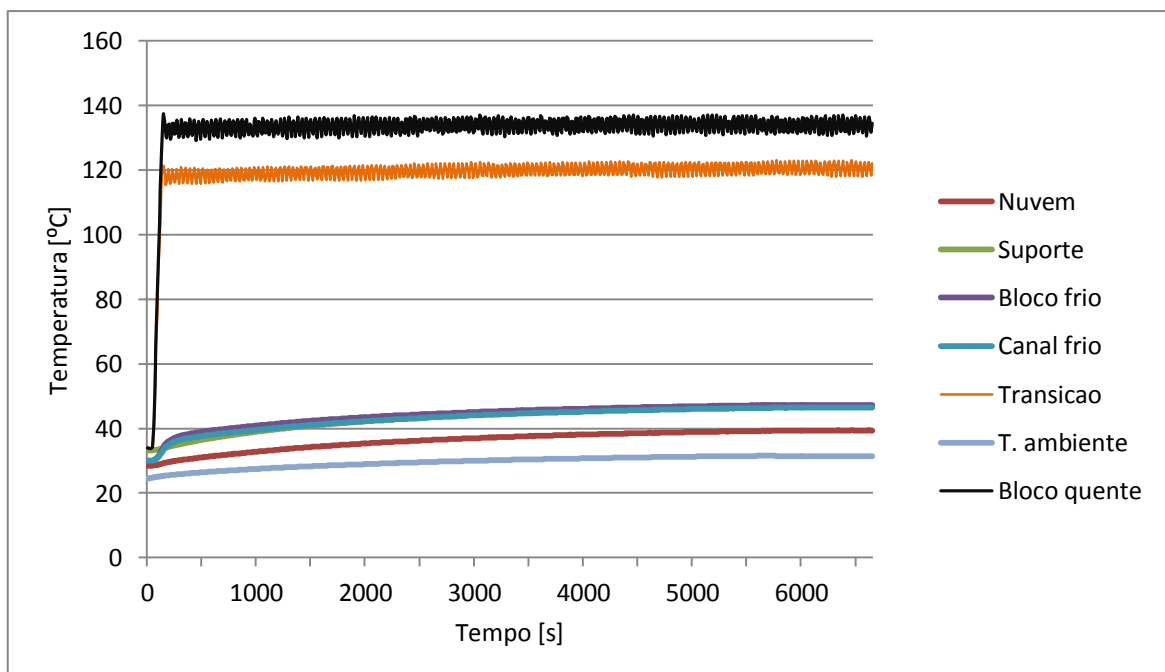


Figura 4.3 – Resultados do Teste 1.1.

Na Figura 4.4 apresenta-se o resultado obtido no Teste 1.2. No teste 1.2 verifica-se uma ligeira diminuição da temperatura no bloco frio (2°C), na transição (4°C) e no canal frio (1.5°C) quando o *blower* é ativado, ocorrendo uma forte descida da leitura da temperatura no bloco de aquecimento devido à trajetória do ar proveniente do *blower* se dar diretamente na face onde foi colocado o termopar. Estando o termopar colocado por encosto à face lateral do bloco de aquecimento, a junção de medição apresenta uma pequena área em contacto com a superfície a medir, justificando-se desta forma o erro na leitura. Neste ponto, seria de esperar uma ligeira diminuição da temperatura no bloco de aquecimento, mas nunca inferior ao valor da leitura efetuada no termopar colocado no ponto de transição.

Relativamente ao processo de extrusão não há alteração significativa na leitura recolhida à exceção da leitura efetuada no termopar colocado no ponto de transição, onde há uma pequena diminuição da temperatura, fruto da introdução de material a uma temperatura próxima da temperatura ambiente e a leitura passa a ter um comportamento irregular justificado pela fusão do filamento. Desta forma, o processo de extrusão apresenta uma contribuição mínima relativamente ao aquecimento/arrefecimento da unidade extrusora.

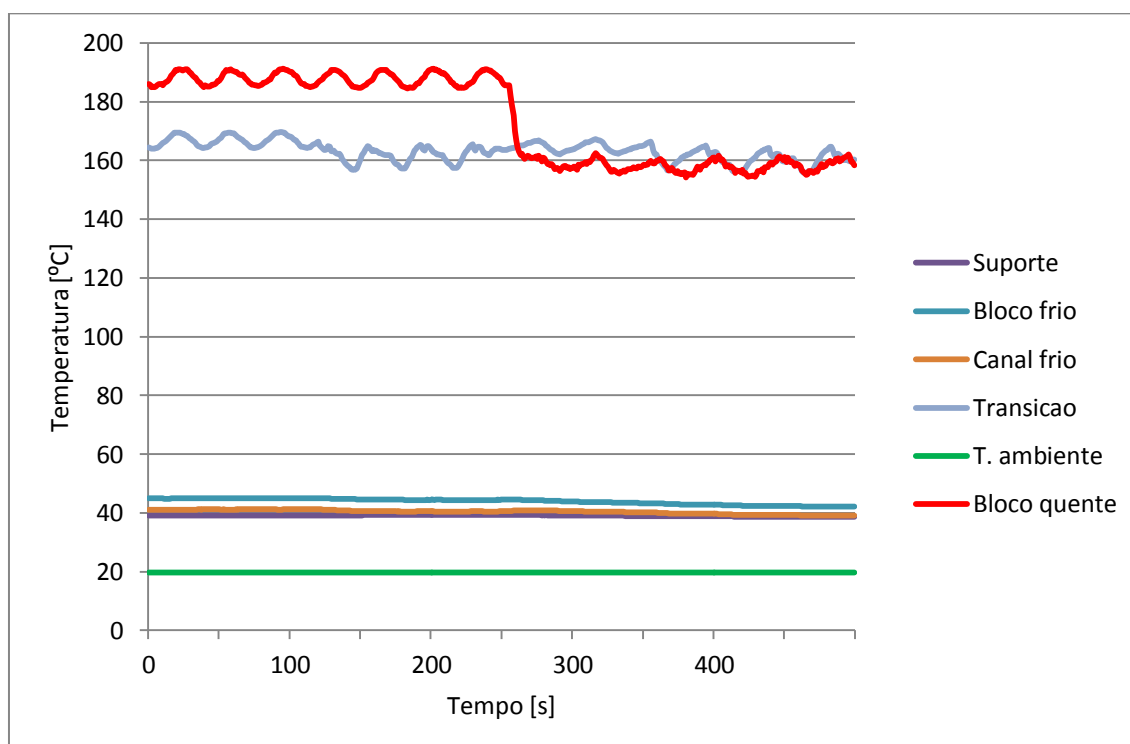


Figura 4.4 – Resultados do Teste 1.2.

A Figura 4.5 apresenta o resultado do Teste 1.3. Neste teste verifica-se novamente a influência do *blower*, através do aumento da temperatura no bloco frio, bloco quente, suporte e canal frio, quando o *blower* é desativado. Assim, verifica-se ao fim de 250s com o *blower* desativado um

aumento da temperatura de 2.64°C no bloco de arrefecimento, 1.8°C no canal frio e 0.94°C no suporte.

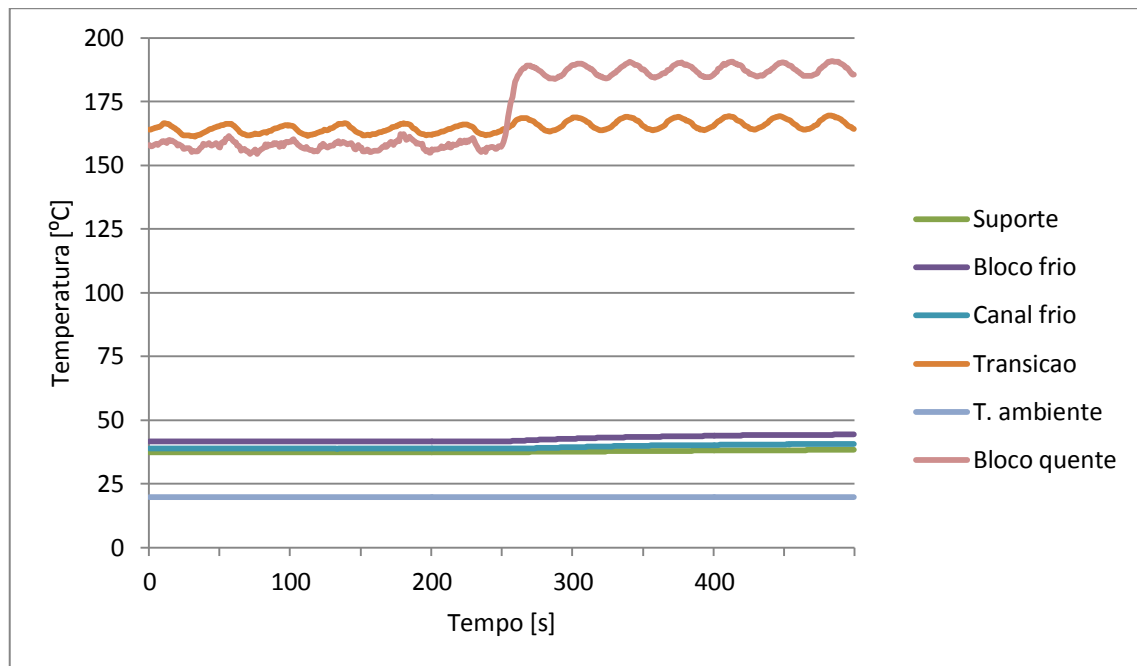


Figura 4.5 – Resultados do Teste 1.3.

Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados obtidos no Teste 1.4. Neste teste verifica-se que o aumento da temperatura da resistência de aquecimento conduz a um aumento da temperatura de todos os componentes da unidade extrusora através dos fenómenos de condução, convecção e radiação presentes.

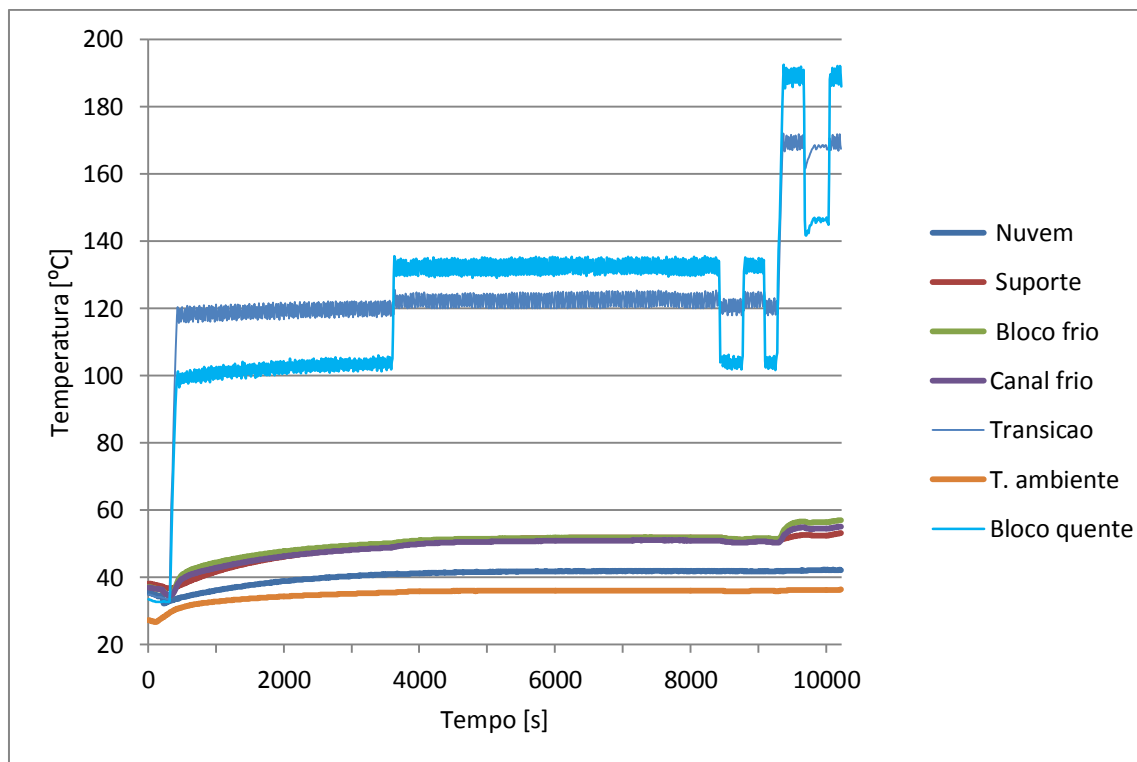


Figura 4.6 – Resultados do Teste 1.4.

Em suma, os principais parâmetros relevantes são o valor da temperatura da resistência e os valores de controlo, a temperatura ambiente e a utilização dos ventiladores, sendo que a extrusão não apresenta uma contribuição significativa no aumento/diminuição da temperatura da unidade extrusora.

4.2. Criação do modelo de simulação

A segunda fase consistiu na criação de um modelo virtual recorrendo ao *software* de simulação Solidworks®, no qual foi criado um modelo de simulação numérica onde foram implementados os parâmetros de funcionamento do equipamento recolhidos na fase anterior. A criação deste modelo virtual visa traduzir as características de operação do equipamento referentes ao processo de aquecimento do mesmo, para numa fase posterior se testar e implementar soluções de melhoria.

Numa fase inicial, foi também utilizado um outro módulo de simulação presente no *software*, o módulo *Thermal Analysis* em conjunto com o módulo *Flow Simulation* atuando separadamente os fenómenos de transferência de calor do tipo de escoamento externo envolvido respetivamente, tendo mais tarde conduzido à utilização apenas do módulo *Flow Simulation*. Este propósito surgiu

do facto do módulo *Flow Simulation* passar a atuar de forma estacionária, não permitindo uma análise em regime transiente.

A escolha deste *software* recaiu sobre o facto deste combinar os fenómenos de transferência de calor com dinâmica de fluidos, permitindo alterações à geometria dos componentes, o que torna a criação deste modelo de simulação bastante útil no apoio ao desenvolvimento de novas soluções construtivas.

4.2.1. Funcionamento do *software* adotado

O *software* SolidWorks® apresenta dois módulos de simulação térmica: *Flow Simulation* e *Thermal Analysis*. O módulo *Flow Simulation* é um módulo mais completo que conjuga o escoamento envolvido com transferência de calor. Por sua vez o módulo *Thermal Analysis* apenas resolve fenómenos de transferência de calor, possibilitando a inserção do resultado da simulação proveniente do módulo *Flow Simulation*. Neste módulo é necessário inserir todas as cargas térmicas existentes, sendo uma fragilidade neste caso em concreto, uma vez que existem cargas térmicas que são o objeto de estudo, como por exemplo a convecção, restringindo-se assim a utilização deste módulo de simulação neste caso de estudo.

O módulo *Flow Simulation* resolve as equações de Navier-Stokes, que são formulações de massa, momento e leis de conservação de energia para o escoamento de fluidos. As equações são complementadas por equações de estado do fluido que definem a sua natureza, e por dependências empíricas da densidade do fluido, viscosidade e condutividade térmica dependentes da temperatura (40).

As leis de conservação de massa, momento angular e energia no sistema cartesiano, com velocidade angular Ω em torno de um eixo, passando pela origem do sistema de coordenadas são descritas da seguinte forma (40):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{Eq. 7}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1,2,3 \tag{Eq. 8}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \tag{Eq. 9}$$

$$\text{em que } H = h + \frac{u^2}{2}$$

onde u é a velocidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, S_i é uma força externa distribuída em massa por unidade de massa, devido a uma resistência ao meio poroso (S_i^{porous}), a capacidade de sustentação ($S_i^{\text{gravity}} = -\rho g_i$, em que g_i é a componente de aceleração gravitacional, ao longo das três direções) e coordenadas do sistema de rotação (S_i^{rotation}), ou seja, $S_i = S_i^{\text{porous}} + S_i^{\text{gravity}} + S_i^{\text{rotation}}$, h é a entalpia, Q_H é uma fonte de calor por unidade de volume, τ_{ik} é o tensor da tensão de corte.

Quando o número de Lewis, que representa a razão entre as difusividades térmica e mássica, obtém o valor unitário ($Le=1$), o fluxo de calor é definido por:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1,2,3 \quad \text{Eq. 10}$$

Onde a constante $\sigma_c = 0.9$ e Pr é o número de Prandtl.

A resolução do sistema é finalmente determinada pela definição da geometria, limite e condições fronteira do modelo de estudo. O módulo *Flow Simulation* foi desenvolvido principalmente para simular e estudar escoamentos turbulentos. Para prever escoamentos turbulentos, são utilizadas as equações *Favre-averaged Navier-Stokes*, onde são considerados os parâmetros de fluxo através da média temporal da turbulência do fluxo. Para fechar o sistema de equações, são utilizadas as equações de transporte para a energia cinética turbulenta e a respetiva taxa de dissolução, denominado por modelo de $k-\varepsilon$.

Este módulo compreende um sistema de equações para descrever fluxos laminar e turbulentos. Além disso, a transição de um estado laminar para turbulento e / ou vice-versa, é possível.

O módulo *Flow Simulation* permite prever a transferência simultânea de calor em meios sólidos e fluidos com troca de energia entre eles. A transferência de calor nos fluidos é descrita pela equação de conservação de energia (Equação 7), onde o fluxo de calor é definido pela Equação 8. O fenómeno de condutividade térmica anisotrópica em meios sólidos é descrito pela seguinte equação:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad \text{Eq. 11}$$

onde e é a energia interna específica, $e = c \cdot T$, c é o calor específico, Q_H é a libertação de calor específico (ou absorção) por unidade de volume, e λ_i são os valores próprios do tensor de

condutividade térmica. Supõe-se que o tensor de condutividade de calor é diagonal no sistema de coordenadas considerado.

A troca de energia entre o meio fluido e sólido é calculada através do fluxo de calor na direção normal para a interface sólido/fluido, tendo em conta a temperatura da superfície do sólido e as características fronteira da camada do fluido, se necessário.

Malha computacional

A malha computacional é retangular em todo o domínio de cálculo, sendo as células da malha ortogonais aos eixos específicos do sistema de coordenadas cartesianas, não estão equipados com a interface sólido/fluido. Desta forma, a interface sólido / fluido corta as células da malha na fronteira. No entanto, devido a medidas especiais, os fluxos de massa e calor são tratados adequadamente nestas células denominadas de células parciais.

O domínio computacional retangular é gerado, assim que o corpo sólido é englobado e apresenta planos fronteira ortogonais aos eixos específicos do sistema de coordenadas cartesianas. Em seguida, a malha computacional é construída nas seguintes etapas.

Em primeiro lugar, uma malha de base é construída. Para isso, o domínio computacional é dividido em fatias pelos planos de malha de base, ortogonais aos eixos do sistema de coordenadas cartesianas. A malha de base é determinada unicamente pelo domínio computacional e não depende das interfaces sólido / fluido.

Em seguida, as células da malha de base que se intersectam com a interface sólido / fluido são divididas uniformemente em células menores, a fim de capturar a interface sólido / fluido com células de malha com o tamanho especificado. O procedimento utilizado é o seguinte: cada uma das células de malha de base onde se verifica interseção é dividida uniformemente em oito células menores. Cada uma destas células que se intersectam com a fronteira, está por sua vez dividida em oito células de nível seguinte, e assim por diante, até que o tamanho de célula específico seja atingido.

Uma vez que todos os procedimentos acima mencionados são realizados antes do cálculo, a malha obtida não é capaz de resolver a totalidade da solução apresenta. Para superar esta desvantagem, a malha computacional pode ser novamente refinada durante o cálculo de acordo com os gradientes espaciais de solução. Como resultado, nas regiões de baixo gradiente, as células são fundidas, enquanto que nas regiões de elevado gradiente, as células são divididas. Os momentos do refinamento da malha computacional durante o cálculo são prescritos automaticamente ou manualmente.

Aproximação espacial na fronteira sólido / fluido

Para células de malha parciais (ou seja, para as células de malha cortadas pela interface sólido / fluido), são introduzidas faces de fronteira adicionais que têm em conta as condições limite e a geometria (Figura 4.7), assim como é utilizado um procedimento de cálculo especial. Desta forma, o resultado da influência da fronteira sólido / fluido sobre a solução do problema, tanto no fluido como no sólido é calculado com precisão.

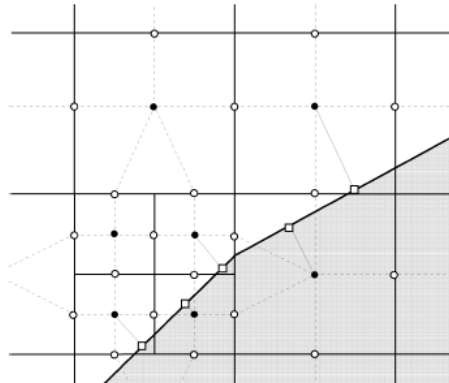


Figura 4.7 – Células da malha computacional na interface sólido/fluido.

Forma do algoritmo numérico

O caractere “ n ” indica o nível de tempo, e “ $*$ ” indica valores intermediários dos parâmetros de fluxo. O seguinte algoritmo numérico é aplicado para calcular os parâmetros de fluxo no nível de tempo ($n + 1$) usando valores conhecidos no nível de tempo (n):

$$\frac{\mathbf{U}^* - \mathbf{U}^n}{\Delta t} + A_h(\mathbf{U}^n, p^n)\mathbf{U}^* = S^n \quad \text{Eq. 12}$$

$$L_h \delta p = \frac{\mathbf{div}_h(\rho \mathbf{u}^*)}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\rho^* = \rho(p^n + \delta p, T^*, \mathbf{y}^*) \quad \text{Eq. 14}$$

$$\rho \mathbf{u}^{n+1} = \rho \mathbf{u}^* - \Delta t \cdot \mathbf{grad}_h \delta p \quad \text{Eq. 15}$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p \quad \text{Eq. 16}$$

$$\rho T^{n+1} = \rho T^*, \rho k^{n+1} = \rho k^*, \rho \varepsilon^{n+1} = \rho \varepsilon^*, \rho \mathbf{y}^{n+1} = \rho \mathbf{y}^* \quad \text{Eq. 17}$$

$$\rho^{n+1} = \rho(p^{n+1}, T^{n+1}, \mathbf{y}^{n+1}) \quad \text{Eq. 18}$$

Onde $\mathbf{U} = (\rho \mathbf{u}, \rho T, \rho k, \rho \varepsilon, \rho \mathbf{y})^T$ é o conjunto completo de variáveis básicas, excluindo a pressão p , $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T$ é o vetor velocidade, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$ é o vetor de concentração de componentes em mistura de fluidos, e $\delta p = p^{n+1} - p^n$ é uma variável auxiliar denominada de correção da pressão. $A_h, \mathbf{div}_h, \mathbf{grad}_h$ e $L_h = \mathbf{div}_h \mathbf{grad}_h$ são operadores discretos que aproximam os operadores diferenciais correspondentes com uma precisão de segunda ordem.

A Equação 12 corresponde ao primeiro passo do algoritmo quando as equações de convecção / difusão são resolvidas para obter os valores intermédios de energia e os valores finais dos parâmetros de turbulência, temperatura e concentrações da mistura.

A Equação 13 é utilizada para calcular a pressão correção (δp). Esta equação é definida de tal maneira que o parâmetro $\rho \mathbf{u}^{n+1}$, calculado a partir da Eq. 12, satisfaz a equação da continuidade. Os valores finais dos parâmetros de fluxo são definidos pelas equações 15 - 18.

4.2.2. Cargas térmicas

Antes de passar à elucidação da criação do modelo virtual, torna-se condição necessária identificar os fenômenos de transferência de calor envolvidos neste processo. O presente subcapítulo é dedicado a este tema.

Como é possível observar na Figura 4.8, sendo a imagem captada após um longo intervalo de tempo com o equipamento ligado, verifica-se que as zonas onde o equipamento apresenta temperatura mais elevada é na zona onde está localizada a cabeça extrusora e uma grande contribuição é dada na parte inferior pela fonte de alimentação.

Devido à moldura exterior ser fechada e só apresentar abertura nas zonas de deslocação da cabeça extrusora e da mesa, o fluido proveniente da refrigeração da fonte de alimentação, com carga térmica, é expelido seguindo uma trajetória ascendente, conduzindo à formação de uma “nuvem” na parte superior do equipamento. Esta “nuvem” condiciona o processo de dissipação de energia na unidade extrusora, uma vez que ao aumentar a temperatura do fluido nesta zona, sendo o mesmo fluido insuflado pelos ventiladores, o fluido perde poder dissipativo. Desta forma, justifica-se a inserção da contribuição da fonte no modelo de simulação.

As restantes cargas térmicas dizem respeito à unidade extrusora, através da resistência de aquecimento e dos ventiladores, estando presentes os três fenómenos de transferência de calor, condução, convecção e radiação.

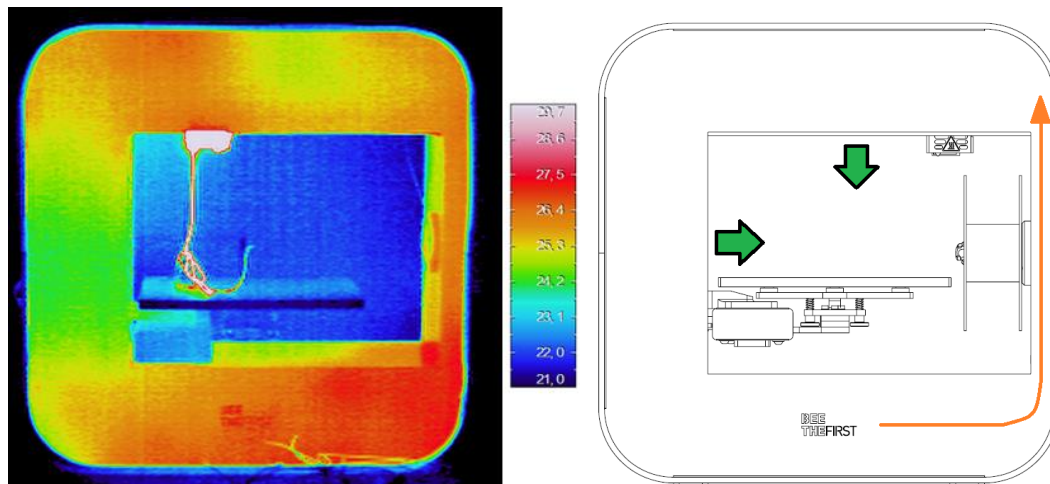


Figura 4.8 – Imagem termográfica e desenho ilustrativo da trajetória de saída do fluido.

4.2.3. Implementação do modelo virtual

Após identificados os fenómenos de calor envolvidos estão reunidas as condições para passar à fase da criação do modelo virtual. Neste subcapítulo será descrita pormenorizadamente a conceção do modelo.

O processo iniciou com a definição da geometria, que foi alvo de ligeiras simplificações por forma a melhorar o desempenho, descritas no próximo subcapítulo.

Foram introduzidas as cargas térmicas presentes na Figura 4.9, apresentando as cargas térmicas do motor e da fonte de alimentação um valor estimado. O controlo da temperatura do bloco de aquecimento é efetuado na sonda NTC, tendo a função de operar como termostato ao ativar ou desativar o funcionamento da resistência de 30W aos 220°C e 225°C, respetivamente. Nos ventiladores foi colocada a informação presente na ficha técnica dos componentes, disponível no Anexo 1.

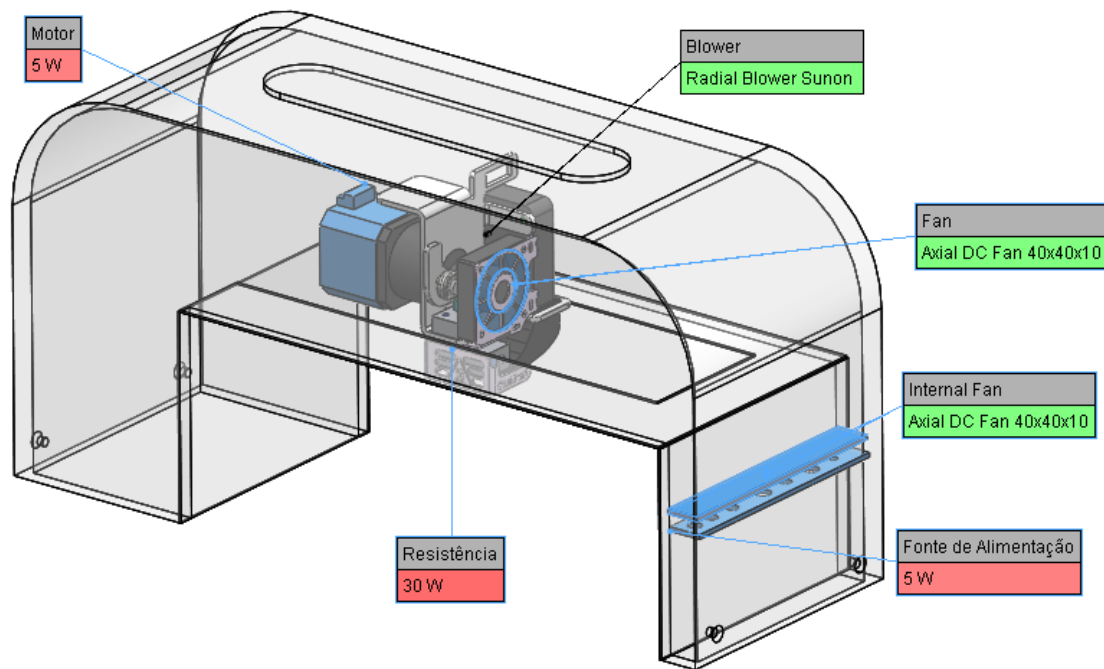


Figura 4.9 – Cargas térmicas definidas no modelo de simulação.

A segunda etapa consistiu na atribuição dos diferentes materiais. Estes foram definidos com a informação presente na biblioteca do *software*.

O fluido operante foi definido como sendo ar, sendo as propriedades existentes na biblioteca do *software* definidas no Anexo 2.

A temperatura inicial do sólido e a temperatura ambiente foram estabelecidas como sendo 25°C, operando em conformidade com o valor utilizado na medição experimental.

Os pontos de controlo foram colocados em conformidade com a localização dos termopares, sendo feito o controlo da temperatura nos blocos de aquecimento e arrefecimento e no canal frio.

O estudo foi feito como que tratando-se de uma análise externa. Desta forma, o ar insuflado nos ventiladores apresenta as características do fluido ao longo do tempo, contrapondo com o modo de análise interna que limita os parâmetros de insuflação a uma condição inicial.

A malha de cálculo utilizada passível de observar na Figura 4.10 obteve 398114 células, das quais 107872 referentes ao fluido, 145498 referentes ao sólido e as restantes 144744 parciais.

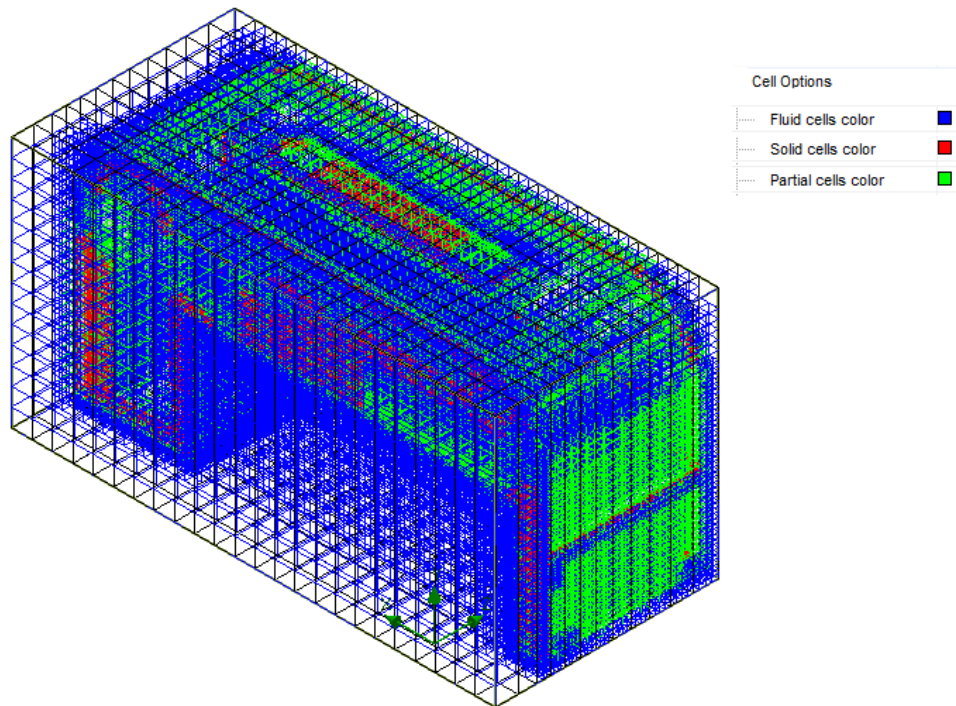


Figura 4.10 – Malha e domínio de cálculo utilizados.

4.2.4. Simplificações efetuadas ao modelo

Por forma a reduzir o tempo de simulação do modelo, sem perder o rigor, foram efetuadas algumas simplificações no sentido de diminuir o recurso computacional. Esta simplificação deu-se maioritariamente ao nível da geometria CAD, ao qual foram retirados componentes como parafusos e anilhas que apresentam um contributo pouco relevante para a simulação, ficando apenas os elementos próximos da zona de análise que de alguma forma condicionam o escoamento do fluido.

Uma outra simplificação efetuada foi ao nível da geometria externa do equipamento, ao qual foi utilizada apenas parte da geometria superior do invólucro exterior, uma vez que a geometria da parte inferior não apresenta informação adicional. Tendo em conta que na parte inferior se encontra a fonte de alimentação, apresentando esta uma contribuição considerável, este contributo foi dado no ponto de ligação entre ambas as geometrias através da colocação de uma fonte de calor de $5W$, com recurso a ventilação forçada. Ainda na geometria exterior foi reduzido o número de componentes, não alterando a forma, mas reduzindo o número de elementos, o que implicou tratar toda a moldura exterior como um único bloco do mesmo material.

Na parte superior do equipamento houve a remoção de todo o conteúdo interno, à exceção do objeto de análise que é a unidade extrusora. Esta simplificação apresenta consequências mais

significativas ao nível do desenvolvimento do escoamento do fluido. Por forma a minimizar este parâmetro, a simulação e as medições efetuadas deram-se com a unidade extrusora colocada numa posição intermédia em relação à origem, isto é, foi dado um avanço inicial à unidade extrusora, mantendo-a nesta posição durante todo o teste. Desta forma o erro é mínimo, uma vez que ao afastar a unidade extrusora da origem, esta passa a estar distanciada de barreiras que influenciem o escoamento.

4.3. Validação dos resultados

Após obtidos os resultados do modelo de simulação numérica, é necessário validar os mesmos. Esta operação é indispensável pois só assim é possível comprovar a eficiência e o rigor do modelo de simulação. Neste sentido, foram simulados dois testes nas mesmas condições de operação dos testes 1.1 e 1.3 realizados experimentalmente.

Na Figura 4.11 e Figura 4.12 é feita a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente no Teste 1.1 e os resultados provenientes do modelo de simulação. Por forma a facilitar a leitura gráfica foi adotada a nomenclatura “[S]” para designar o resultado obtido através de simulação.

Na Figura 4.11 é possível verificar que o modelo de simulação representa com bastante fiabilidade o comportamento do bloco de aquecimento, assim como a parte inferior do canal, no qual está representado pela zona de transição.

Relativamente ao bloco frio e ao canal (Figura 4.12) existe uma ligeira discrepância de 2°C do modelo em relação aos resultados obtidos experimentalmente.

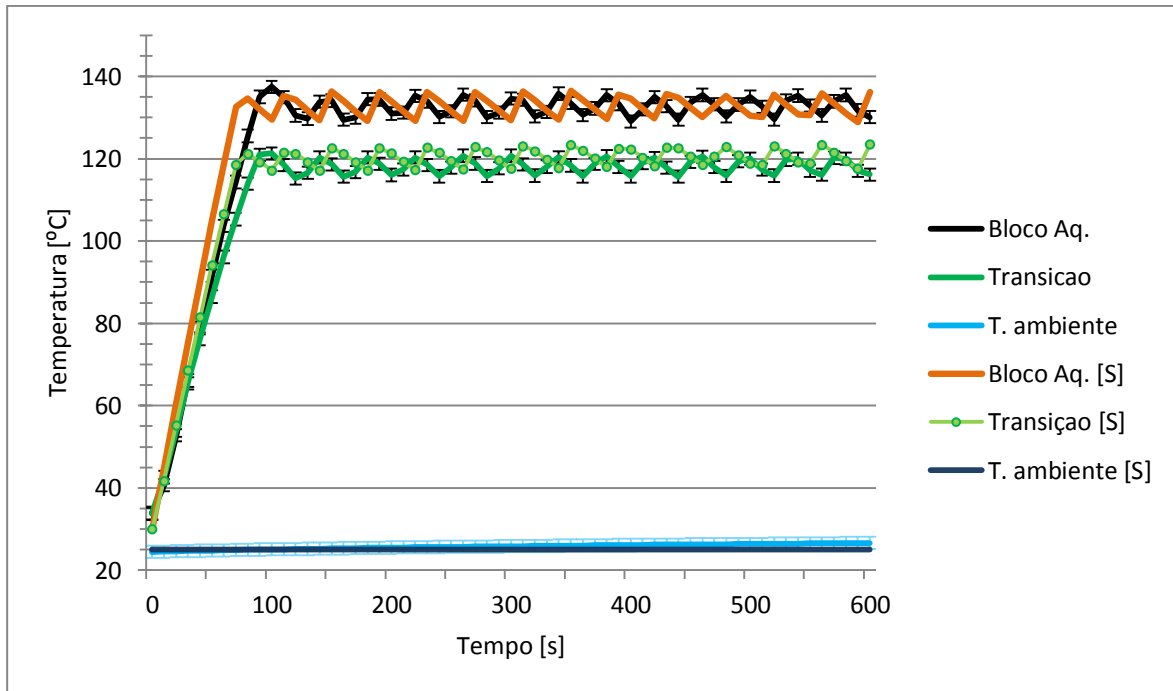


Figura 4.11 – Sobreposição dos resultados do Teste 1.1 aos resultados do modelo de simulação - parte 1.

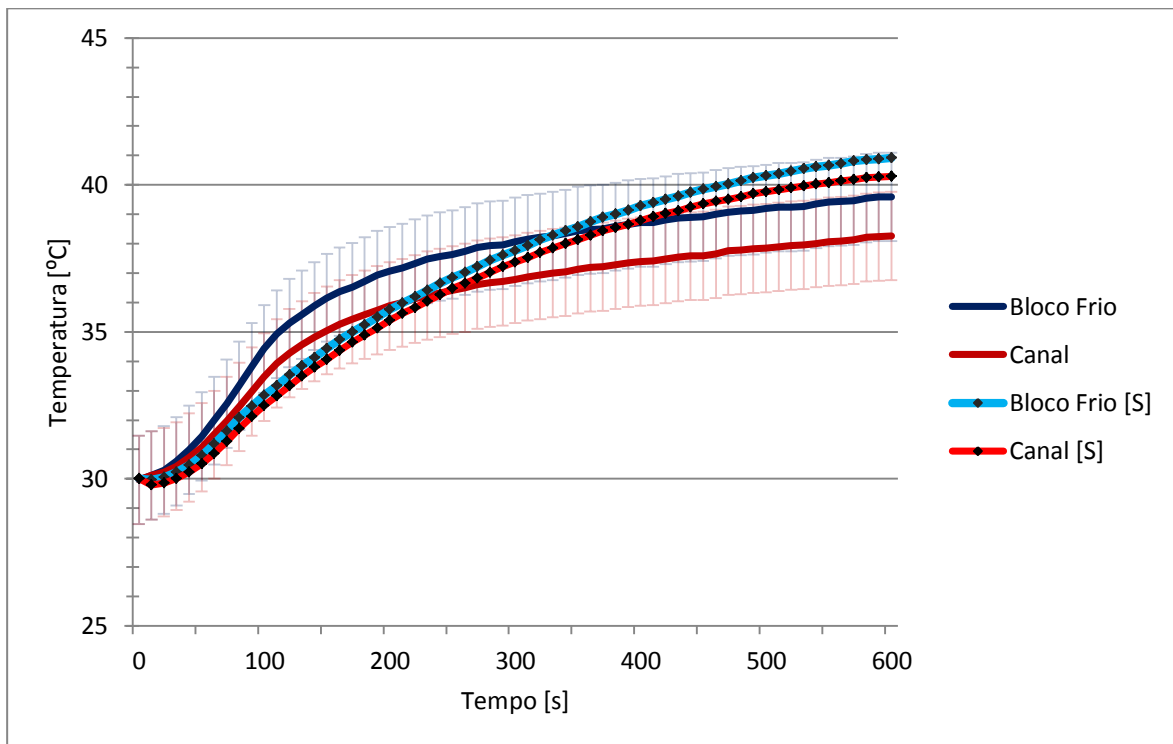


Figura 4.12 – Sobreposição dos resultados do Teste 1.1 aos resultados do modelo de simulação - parte 2.

Analogamente, na Figura 4.13 e Figura 4.14 é feita a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente no Teste 1.3 e os resultados provenientes do modelo de simulação.

Na Figura 4.13 é possível verificar que o modelo de simulação representa com bastante fiabilidade o comportamento da zona de transição, apresentando um erro de 1.5%.

Na Figura 4.14 é possível verificar que para temperaturas mais elevadas da resistência de aquecimento, maior é o desfasamento entre os valores provenientes da simulação e os valores medidos experimentalmente. Esta divergência tende a diminuir com o *blower* desativado.

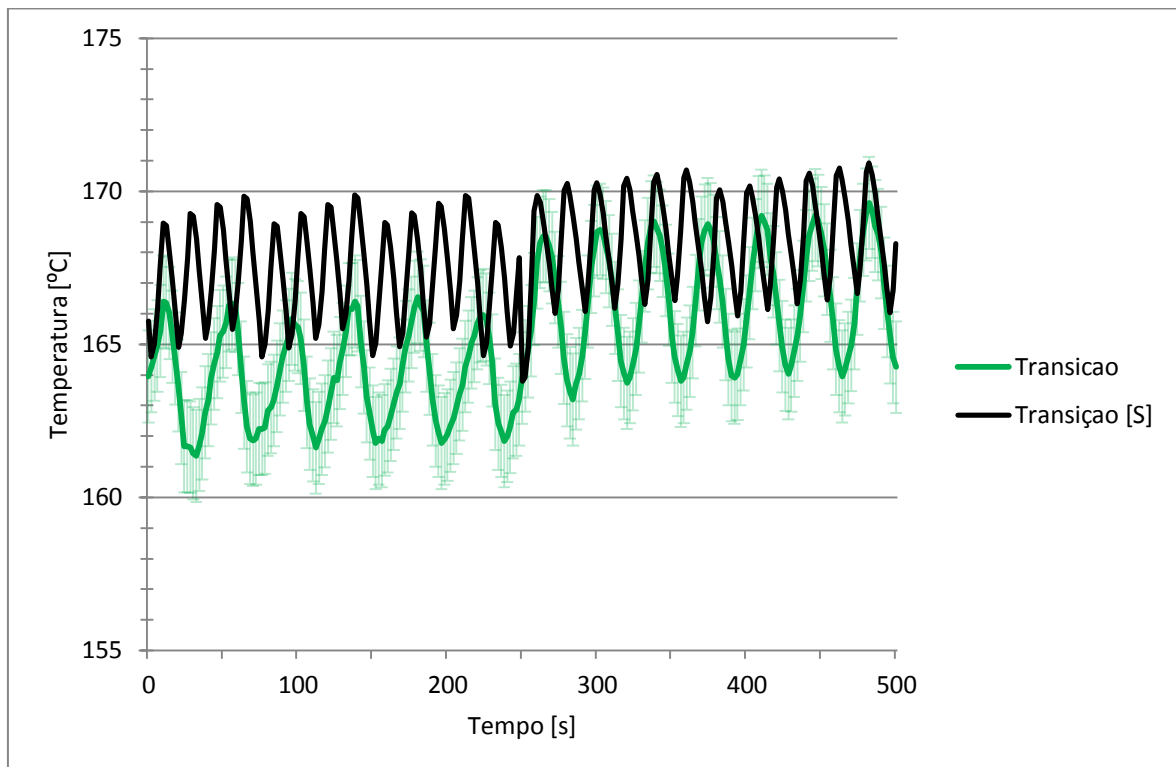


Figura 4.13 – Sobreposição dos resultados do Teste 1.3 aos resultados do modelo de simulação – parte 1.

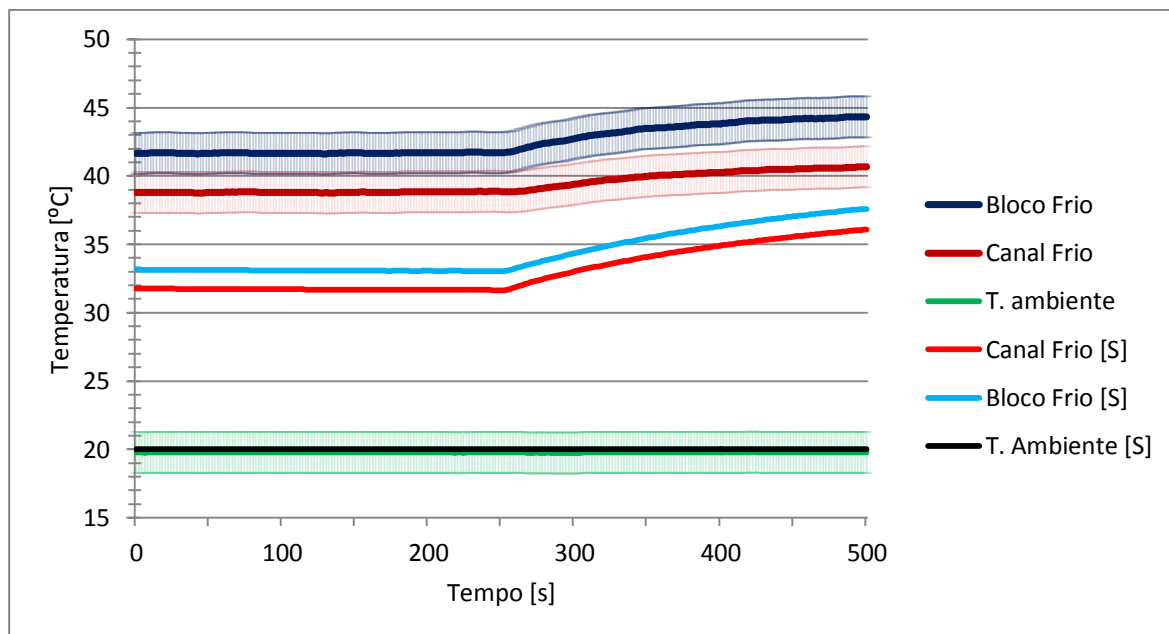


Figura 4.14 – Sobreposição dos resultados do Teste 1.3 aos resultados do modelo de simulação – parte 2.

4.4. Desenvolvimento de soluções de melhoria

Nesta fase foram postuladas soluções que conduzam a uma diminuição da temperatura à entrada do canal. Tendo em conta que os materiais utilizados apresentam boas propriedades termofísicas, o estudo concentrou-se no desenvolvimento de novas soluções construtivas, através da alteração da geometria dos componentes.

Como base comparativa entre as diferentes soluções construtivas, foi desenvolvido em simulação um teste a operar nas mesmas condições de funcionamento do modelo normal.

4.4.1. Solução construtiva A - Aumento da área de transferência de calor por convecção no bloco de arrefecimento

Por forma a aumentar a área exposta à convecção no bloco dissipativo, foram efetuados pequenos furos circulares de 2.5mm . Esta medida baseia-se na Equação 2 da convecção de calor definida no capítulo 3 deste documento, onde se verifica que o aumento da transferência de calor é potenciado diretamente pelo aumento da área exposta à convecção.

A Figura 4.15 ilustra a alteração implementada no bloco dissipativo em oposição ao bloco normal. Na Tabela 3 estão presentes os resultados obtidos.

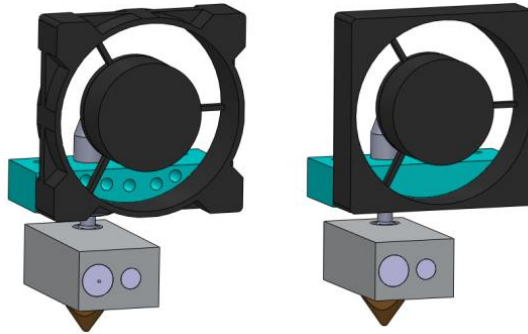


Figura 4.15 – Ilustração representativa da solução construtiva A e modelo normal.

Tabela 3 – Resultados obtidos pela solução construtiva A.

	Temperatura de referência [°C]	Temperatura após melhoria [°C]
Bloco dissipativo	36.57	36.35 (0.6%)
Canal	35.25	35.07 (0.5%)

4.4.2. Solução construtiva B – Temperatura de insuflação constante de 25°C

Tratando-se de uma medida pouco exequível em termos experimentais, foi testada no modelo de simulação. Nesta proposta de solução o modelo foi forçado a insuflar o ar nos ventiladores a uma temperatura constante de 25°C. Desta forma, pretende-se analisar a influência do fluido envolvente. A tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 – Resultados obtidos pela solução construtiva B.

	Temperatura de referência [°C]	Temperatura após melhoria [°C]
Bloco dissipativo	36.57	35.67 (2.4%)
Canal	35.25	34.35 (2.5%)

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o fluido ao ser insuflado à temperatura constante permite baixar a temperatura dos componentes. Não sendo possível fazer o tratamento do fluido operante à entrada dos ventiladores, resta criar as condições para que este seja insuflado à temperatura mais baixa, próxima da temperatura ambiente.

4.4.3. Solução construtiva C – Afastamento do bloco de aquecimento do ventilador

Tendo por base os resultados obtidos na solução construtiva anterior, procedeu-se à rotação do bloco de aquecimento por forma a afastar o bloco do ventilador, uma vez que, parte do calor dissipado no bloco, é insuflado no ventilador.

A Figura 4.16 ilustra a alteração implementada no bloco de aquecimento em oposição ao modelo normal. Na Tabela 5 estão presentes os resultados obtidos.

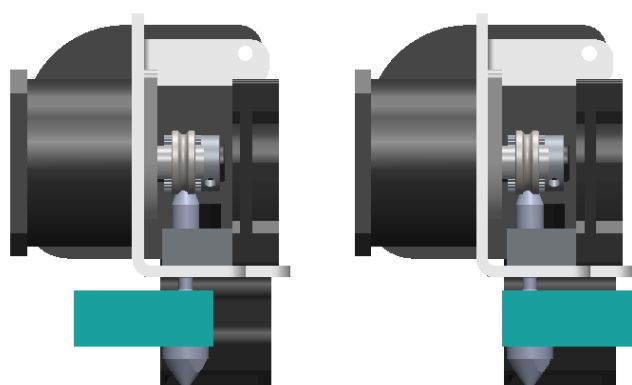


Figura 4.16 – Ilustração representativa da solução construtiva C e modelo normal.

Tabela 5 – Resultados obtidos pela solução construtiva C

	Temperatura de referência [°C]	Temperatura após melhoria [°C]
Bloco dissipativo	36.57	35.12 (3.9%)
Canal	35.25	34.35 (2.5%)

4.4.4. Solução construtiva D – Colocação de um divergente em conjunto com uma nova geometria do canal no *blower*

A partir dos resultados da solução construtiva B e C, provou-se que o bloco de aquecimento é quem apresenta uma maior contribuição no aumento da temperatura no canal e no bloco de arrefecimento. Deste modo, foi estudada uma nova solução construtiva no sentido de eliminar a contribuição do bloco de aquecimento na ventilação e impedir a transferência de calor do bloco para os restantes componentes. A solução adotada consistiu na criação de um novo canal para o *blower* (Anexo 3), apresentando duas saídas, uma para a sua função normal de arrefecimento do material depositado e outra para a criação de uma cortina de ar a operar em conjunto com um divergente (Anexo 4) por forma a impedir a transferência de calor do bloco de aquecimento para os componentes acima localizados.

A Figura 4.17 ilustra a alteração implementada em oposição ao modelo normal. Na Tabela 6 estão presentes os resultados obtidos.

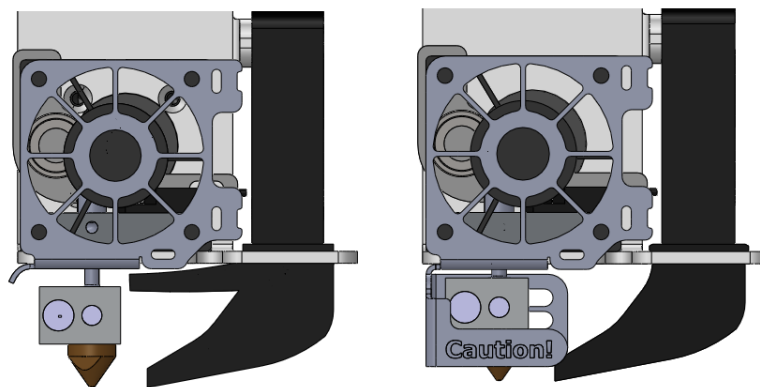


Figura 4.17 – Ilustração representativa da solução construtiva D e modelo normal.

Tabela 6 – Resultados obtidos pela solução construtiva D

	Temperatura de referência [°C]	Temperatura após melhoria [°C]
Bloco dissipativo	36.57	29.80 (19%)
Canal	35.25	29.27 (17%)

4.5. Implementação de melhorias

Após analisados os resultados provenientes do modelo de simulação, verificou-se que a solução que melhor responde ao desafio colocado é a solução construtiva D, sendo a mesma implementada na unidade extrusora.

O novo canal para o *blower* foi fabricado na impressora e o divergente foi concebido através de chapa fina.

4.6. Nova medição experimental

Após implementadas as soluções de melhoria preconizadas, procedeu-se a uma nova medição experimental à semelhança da efetuada previamente, no sentido de comprovar a fiabilidade do modelo virtual e verificar o impacto da nova solução construtiva no equipamento.

Por forma a ser possível tirar elações relativamente à solução construtiva adotada, foram realizados ensaios antes e depois da implementação da solução nas mesmas condições de operação.

4.6.1. Testes realizados

Teste 2.1 – Este teste teve a duração de 1800s e foi realizado com o objetivo de prever o funcionamento normal do equipamento. Foi executado sem recurso à extrusão, com o *blower* ativado, sendo a temperatura da resistência de aquecimento de 220°C.

Por último, foi realizado o Teste 2.2, onde se procedeu à remoção do invólucro de acrílico que protege a parte superior do equipamento, no sentido de não contabilizar a contribuição da fonte de alimentação e analisar separadamente a influência da nova solução construtiva. Neste teste, a sonda utilizada para medir a temperatura ambiente foi colocada no ponto de saída do ventilador responsável pela dissipação de energia do bloco de arrefecimento, passando assim a medir-se a temperatura do ar insuflado.

5. Resultados obtidos e discussão

O presente capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos através da solução construtiva D, sendo analisados os resultados do modelo de simulação numérica e os resultados obtidos experimentalmente.

5.1. Resultados de simulação numérica

Perfil de temperatura do fluido

Um dos parâmetros que permite visualizar a influência da alteração efetuada na unidade extrusora é o perfil de temperatura do fluido, presente na Figura 5.1, onde se verifica um decréscimo de 4.8°C na temperatura média do fluido que preenche a parte superior do equipamento, designado anteriormente por temperatura da “nuvem”. Dos resultados obtidos, verifica-se que há um arrasto do fluido que apresenta carga térmica mais elevada devido à dissipação de energia do bloco de aquecimento, sendo o fluido conduzido para fora do equipamento, em oposição ao sucedido anteriormente à implementação da solução de melhoria.

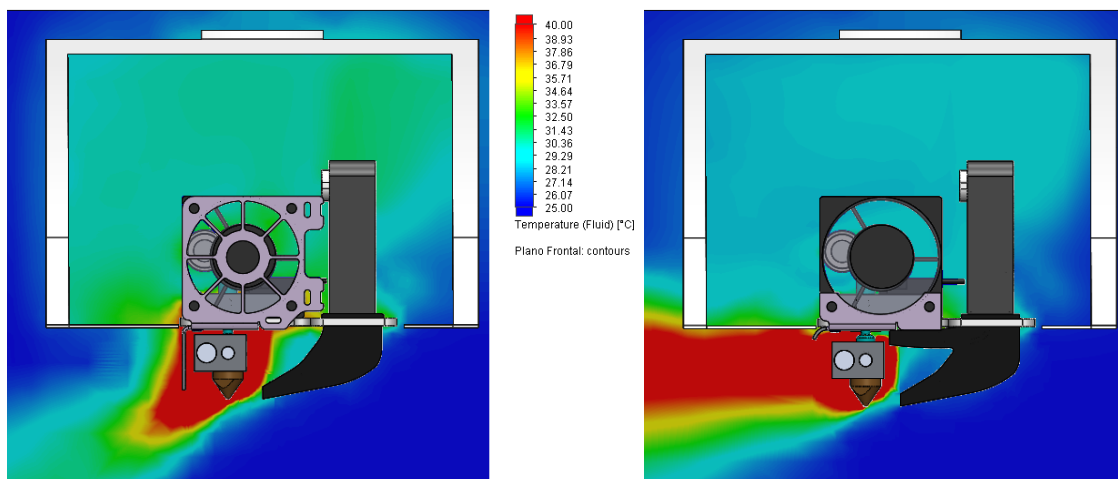


Figura 5.1 – Perfil de temperatura do fluido resultante da simulação do modelo antes e após melhoria, plano frontal.

A Figura 5.2 apresenta o perfil de temperatura numa vista lateral. Os resultados obtidos permitem verificar que a temperatura do fluido na zona do bloco de arrefecimento, após implementada a melhoria, é inferior, onde se verifica também a não ocorrência da insuflação por parte do ventilador do fluido proveniente do bloco de aquecimento.

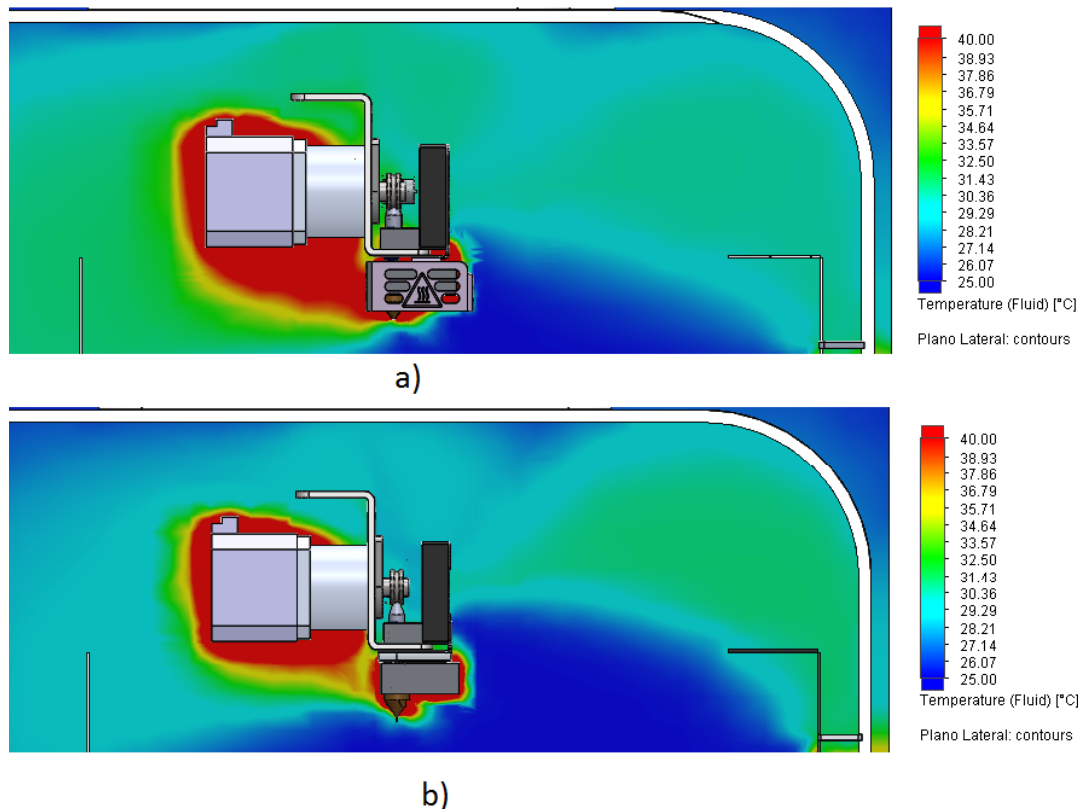


Figura 5.2 – Perfil de temperatura do fluido resultante da simulação do modelo a) antes da implementação de proposta de melhoria; b) após implementação de melhoria, vista lateral.

Perfil de Velocidade

Na Figura 5.3 é estabelecida a comparação entre os resultados obtidos antes e após a implementação da proposta de melhoria do perfil de velocidade do escoamento. É possível verificar que, a colocação da segunda saída de ar do *blower* aumenta a circulação do fluido entre a face superior do bloco de aquecimento e a face inferior do suporte. A colocação do divergente é responsável pela nova trajetória do escoamento, forçando o fluido a ter um comportamento descendente com destino ao exterior do equipamento.

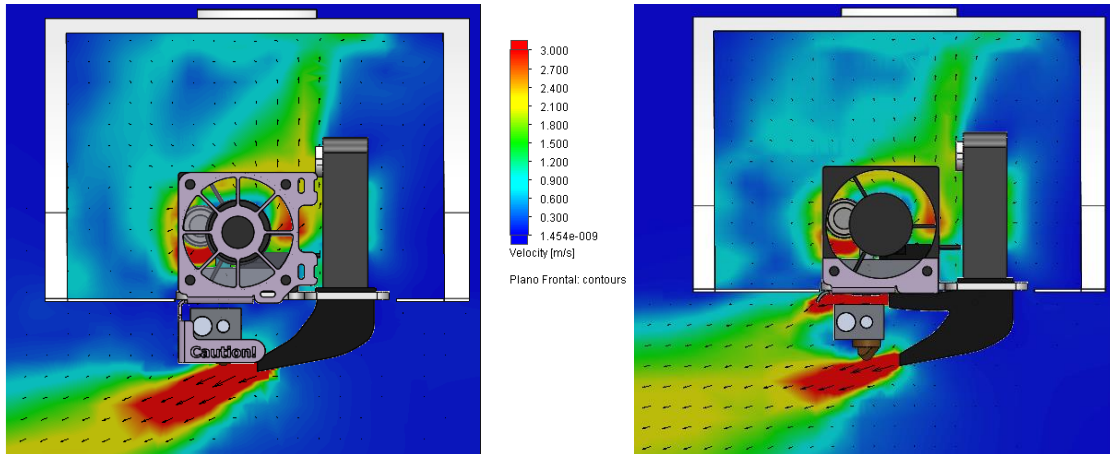


Figura 5.3 – Perfil de velocidade resultante da simulação do modelo antes e após melhoria.

5.2. Resultados obtidos experimentalmente

Por forma a facilitar a leitura gráfica foi adotada a nomenclatura “[M]” para designar o ensaio realizado após a melhoria, da mesma forma “[n]” designa teste realizado com unidade extrusora normal. Analogamente foi adotada a nomenclatura “[SM]” e “[Sn]” para designar o resultado obtido através da simulação do modelo com melhoria e do modelo normal, respetivamente.

5.2.1. Repetibilidade

Após o sistema calibrado torna-se necessário averiguar a repetibilidade dos resultados obtidos. A repetibilidade é um fator indispensável à garantia de fiabilidade dos resultados experimentais. O termo repetibilidade da medida significa a aproximação entre os diferentes resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições, sendo um indicador da estabilidade das medidas, ou seja, quanto menor é a dispersão dos valores experimentais obtidos em torno do seu valor médio, maior é a repetibilidade da medida.

Na Figura 5.4 à Figura 5.7 apresentam-se os resultados que visam estabelecer a repetibilidade da medição para um teste de 600s após implementada a solução de melhoria. Todos os ensaios tiveram início com a unidade extrusora à temperatura ambiente próxima dos 25°C. Os restantes resultados de repetibilidade encontram-se nas Figuras 1 a 4 do Anexo 5.

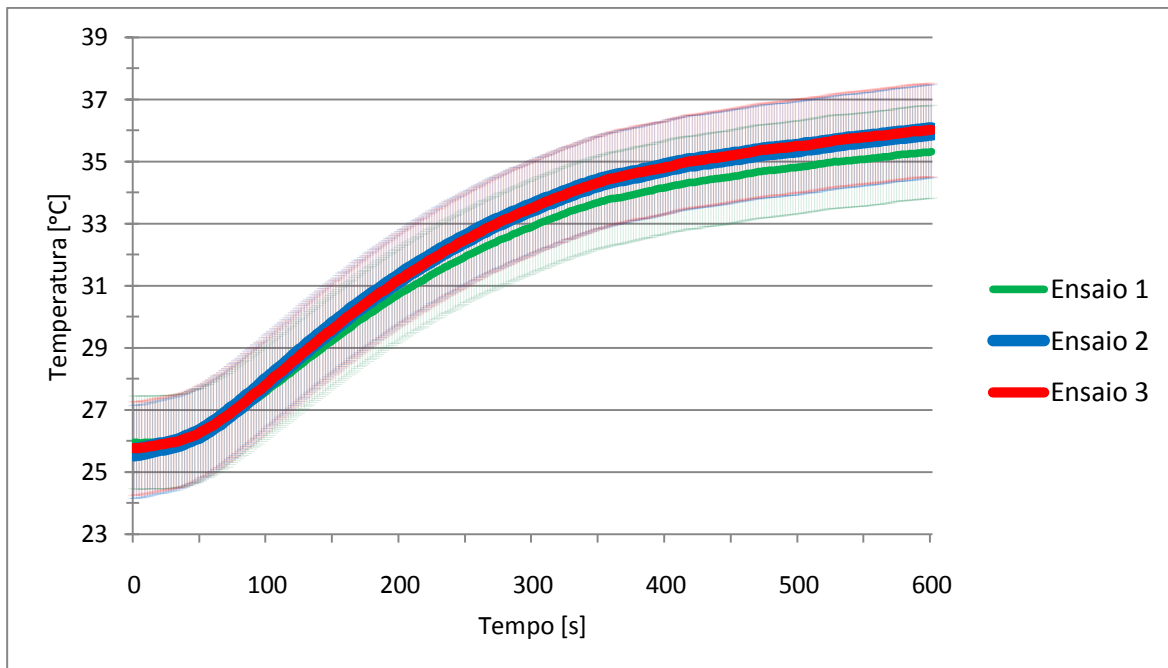


Figura 5.4 – Temperatura do Canal, para teste realizado após melhoria.

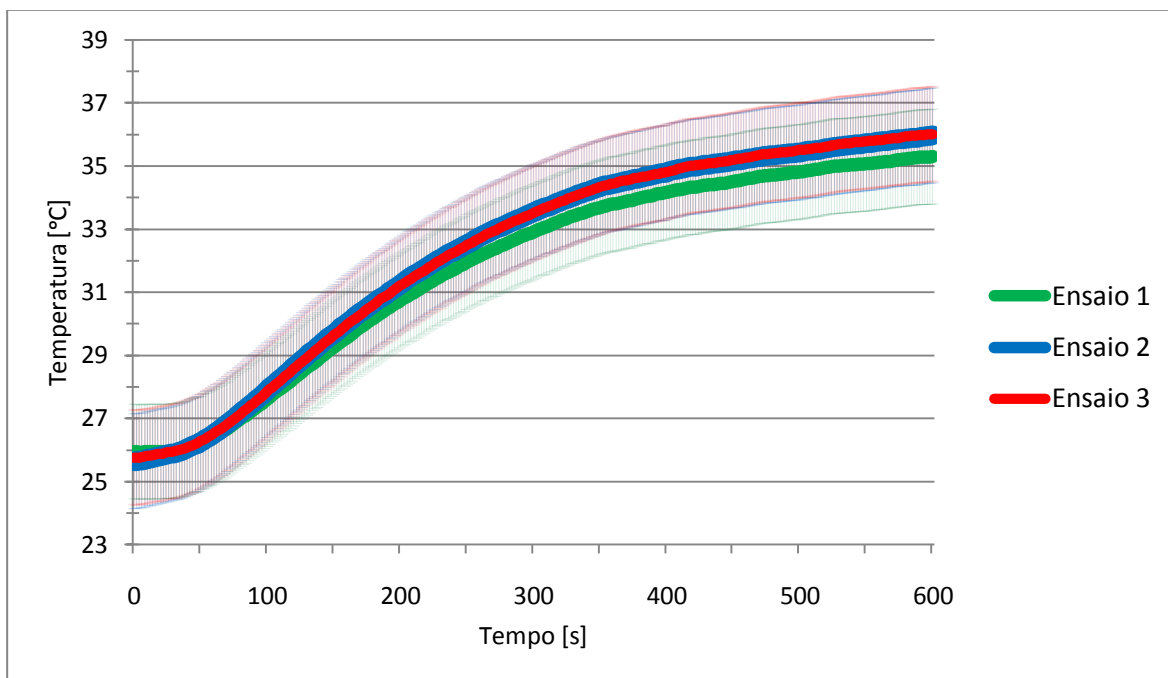


Figura 5.5 – Temperatura do bloco de arrefecimento, para teste realizado após melhoria.

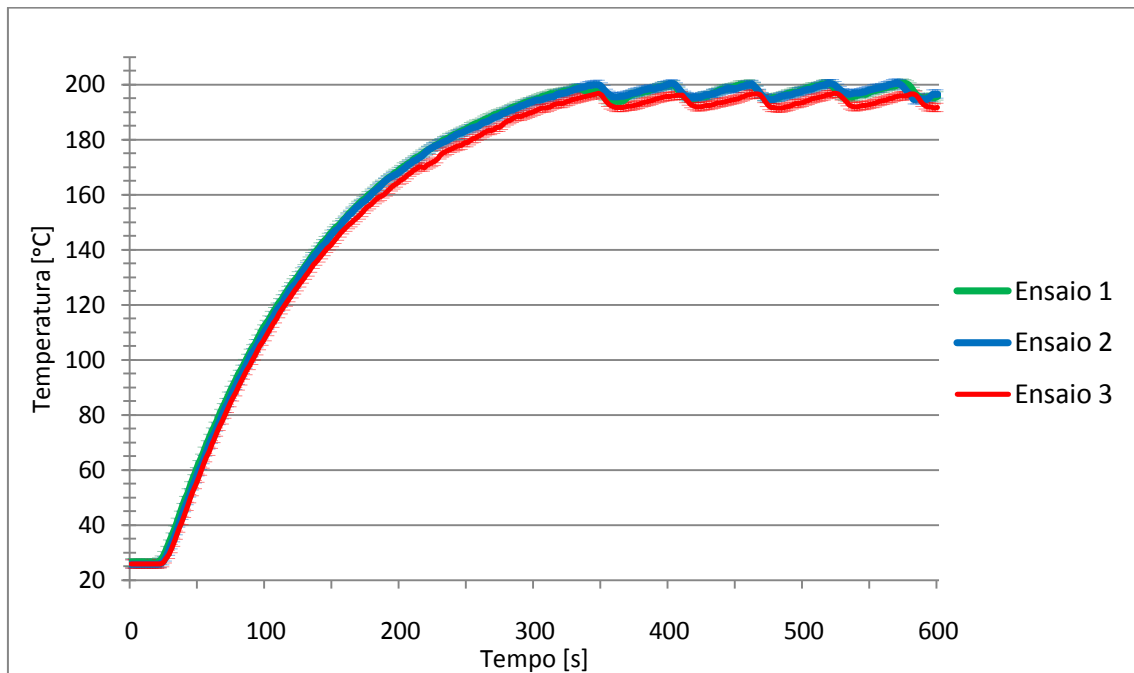


Figura 5.6 – Temperatura do bloco de aquecimento, para teste realizado após melhoria.

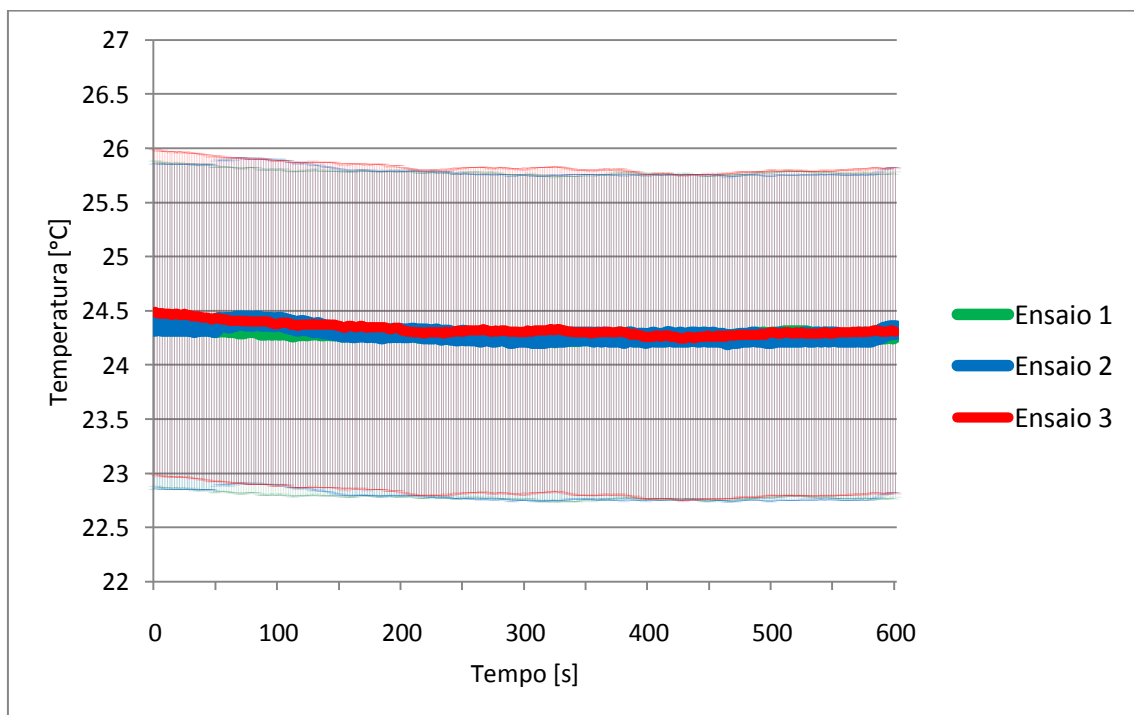


Figura 5.7 – Temperatura ambiente, para teste realizado após melhoria.

5.2.2. Resultados do Teste 2.1

Os resultados do Teste 2.1 são apresentados no gráfico da Figura 5.8. No mesmo gráfico, é feita a comparação entre os resultados do modelo de simulação [Sn] e a medição experimental antes de implementar soluções de melhoria [n].

Da análise dos resultados obtidos, verifica-se um comportamento idêntico entre o valor da temperatura do canal medida experimentalmente [n] e o valor recolhido através da simulação [Sn], sendo o erro médio inferior a 0.5%.

Relativamente à leitura efetuada no bloco frio, verifica-se um decréscimo médio de 0.8°C entre o valor experimental [n] e o valor da simulação [Sn], sendo este bastante inferior ao erro de medição do equipamento utilizado.

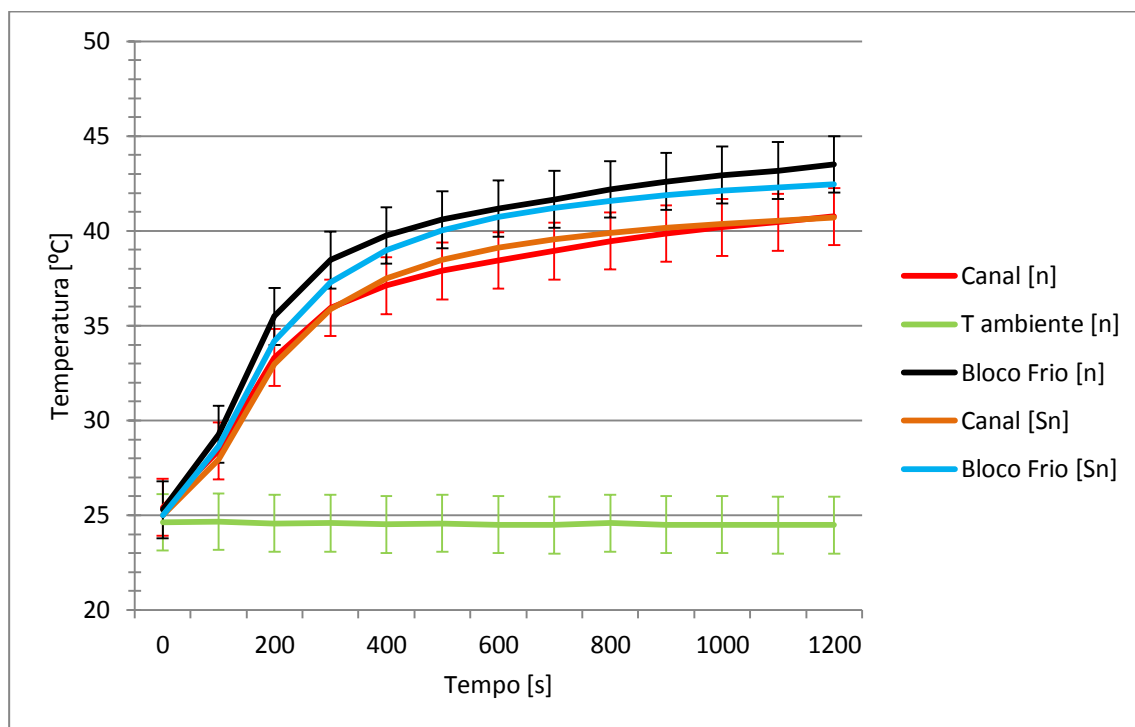


Figura 5.8 – Resultados comparativos entre modelo de simulação numérica e medição experimental antes de implementar melhorias.

Na Figura 5.9 é feita a comparação entre os resultados do modelo de simulação e a medição experimental após implementar a solução construtiva D.

Os valores de temperatura recolhidos através da simulação numérica são inferiores aos recolhidos via experimental, onde se verifica um desvio de 2°C ao fim de 1200s. O erro associado deve-se essencialmente aos parâmetros de insuflação colocados no *blower*, os quais são valores teóricos. Desta forma, um parâmetro que no modelo normal representava pouca influência no processo de arrefecimento da unidade extrusora, assume agora um papel preponderante.

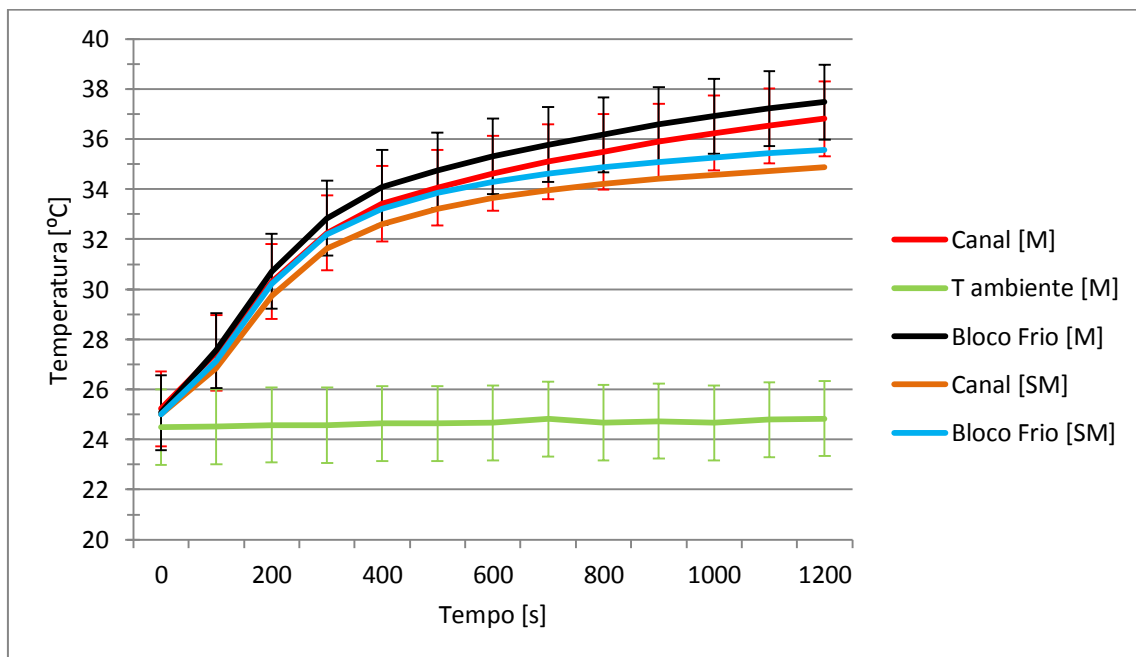


Figura 5.9 – Resultados comparativos entre modelo de simulação numérica e medição experimental após implementada melhoria.

Comparando-se os resultados do teste 2.1 antes de implementação de melhorias (Figura 5.8) com os resultados após implementação de melhorias (Figura 5.9), verifica-se que a alteração efetuada provocou uma diminuição da temperatura no canal, atingindo desta forma o objetivo inicial.

5.2.3. Resultado do Teste 2.2

Na Figura 5.10 apresentam-se os resultados do teste 2.2 obtidos via experimental, para ensaio realizado antes e após implementação de melhoria.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma descida da temperatura em todos os pontos de medição após implementada a nova solução construtiva.

A temperatura do bloco frio [M] e do canal [M], apresenta um comportamento idêntico, havendo uma proximidade entre os valores, em oposição aos recolhidos antes de implementar a solução de melhoria. Esta proximidade do valor da leitura é devida ao escoamento imposto pelo novo canal do *blower* efetuar o varrimento, impedindo que parte da energia dissipada pelo bloco de aquecimento seja absorvida pelo bloco de arrefecimento, ou bloco frio. Esta afirmação é corroborada através da leitura da temperatura do fluido insuflado (T. ventilador), onde há uma diminuição de cerca de 2.5°C.

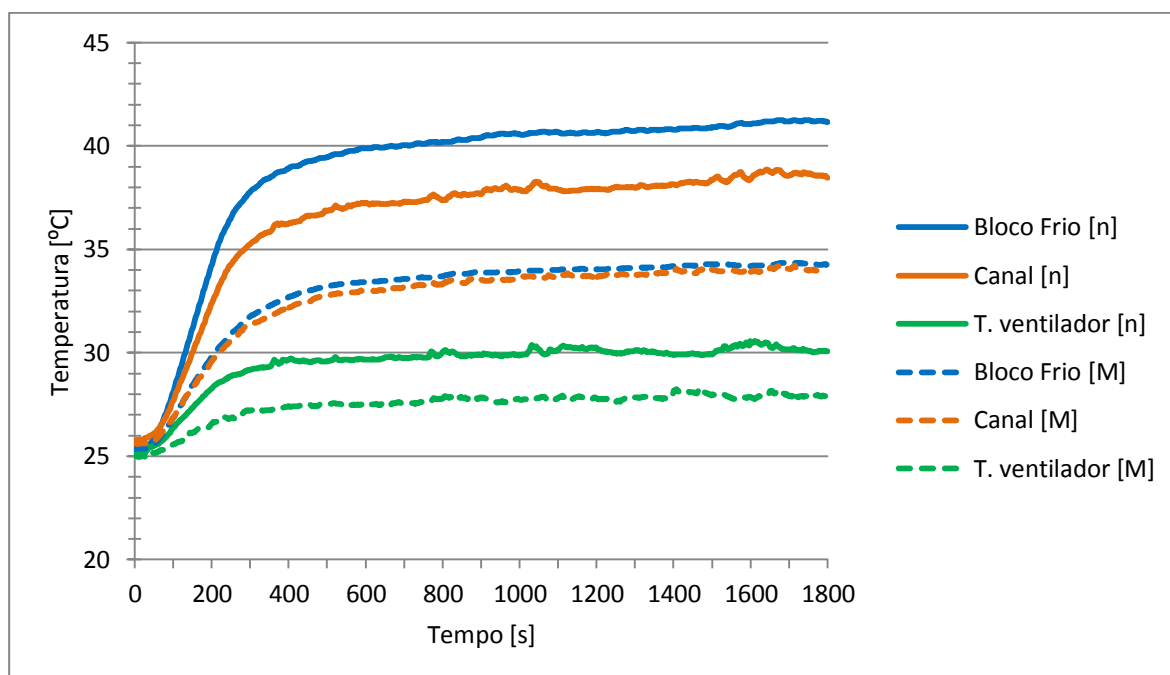


Figura 5.10 – Resultados do teste 2.2 obtidos experimentalmente.

O presente teste, permite verificar que a solução construtiva aliada a uma nova geometria exterior do equipamento que potencie a circulação do fluido de arrefecimento, neste caso o ar, para um intervalo de funcionamento de trinta minutos permite baixar a temperatura do canal até 8°C e 11°C no bloco de arrefecimento, a que correspondem melhorias na ordem dos 20% e 24% respetivamente. Estes valores sofrem melhorias contínuas ao longo do tempo de funcionamento do equipamento.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1. Conclusões

O trabalho realizado no âmbito desta tese, teve como objetivo a análise e otimização do processo FFF de um equipamento específico. Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário efetuar a recolha dos parâmetros de funcionamento do equipamento, desenvolver uma metodologia de otimização, testá-la e validá-la através da medição experimental com recurso a termopares. As soluções analisadas tiveram em conta a comercialização do equipamento. Desta forma, foram desenvolvidas no sentido de incorporar o mecanismo existente, apresentando uma interferência mínima em relação ao estado atual do equipamento.

Com o objetivo de emular o equipamento aquando em serviço, foi desenvolvido um modelo de simulação numérica onde foram introduzidos os parâmetros normais de funcionamento do equipamento em análise. A utilização do modelo de simulação numérica torna-se uma importante ferramenta no apoio ao desenvolvimento de novos equipamentos, permitindo atuar antecipadamente na resolução de problemas, bem como um desenvolvimento mais sustentável assente na eficiência dos componentes.

No modelo criado verificou-se que a emulação do mesmo permitiu representar o funcionamento do equipamento no que concerne à definição das cargas térmicas geradas durante a sua operação, sendo o erro médio máximo inferior a 5% para a simulação após implementada a solução de melhoria e 3% para a simulação do modelo com a geometria normal, sem implementação de melhorias.

A solução construtiva adotada, permite responder ao desafio inicialmente colocado, verificando-se uma diminuição de 10% na temperatura do canal onde é efetuada a alimentação do filamento e uma diminuição de 14% na temperatura do bloco de arrefecimento após trinta minutos da utilização do equipamento.

Os resultados obtidos permitiram verificar que a solução adotada em simultâneo com uma nova geometria exterior que potencie a extração do fluido produz resultados mais significativos. Assim como, um melhor isolamento da fonte de calor (bloco de aquecimento), para além de reduzir o consumo de energia, reduz também o contributo no aumento da temperatura dos restantes componentes.

6.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros seria interessante desenvolver novas soluções construtivas de base, utilizando o modelo de simulação como suporte ao desenvolvimento. Uma outra abordagem passaria pelo desenvolvimento do modelo de simulação ao nível da fusão do filamento, passando a contemplar também o processo de fusão e escoamento do material, o que permitiria uma análise mais completa de todo o processo.

Referências

1. Relvas CAM, Simões J. Apontamentos da disciplina de Concepção e Fabrico Assistidos por Computador (2º ano MIEM). Universidade de Aveiro; 2009.
2. Karin J. The Future of 3D Printing [Livro eletrónico]. 2011 [Consult. 2014 Abril 2]. Disponível na internet: <http://thefutureofthings.com/4664-the-future-of-3d-printing/>
3. Graça DFL. Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por TDP. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro; 2012.
4. Chua CK, Leong KF, Lim CS. Rapid Prototyping: Principles and Applications [Livro eletrónico]. 2ª ed. USA: World Scientific; 2003 [Consult. 2014 Março 25]. Disponível na internet: <http://books.google.com/books?id=dd5ddgDOsGMC&pgis=1>
5. Noorani R. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 1ª ed. New York: Wiley; 2006.
6. Venuvinod PK, Ma W. Rapid Prototyping: Laser-Based and Other Technologies. Springer; 2010.
7. International. Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) [Livro eletrónico]. 2011. Disponível na internet: http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/AMF_V0.47.pdf
8. Rodrigues JC de M. Estudo da Influência do Ficheiro STL na Obtenção de Modelos Tridimensionais. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro; 2010.
9. Matias JM. Simulação e Otimização de Processos Esteriolitográficos. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro; 2007.
10. Arcam. Electron Beam Melting - in the forefront of Additive Manufacturing [Livro eletrónico]. 2012 [Consult. 2014 Abril 10]. Disponível na internet: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
11. Langnau L. A closer look at extrusion-based 3D printers. 2012;
12. Ahn S-H, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal [revista Em linha]. 2002 [Consult. 2014 Maio 27];8(4):248–57. Disponível na internet: <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13552540210441166>
13. Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyping Journal [revista Em linha]. 2008

- [Consult. 2014 Maio 26];14(2):72–80. Disponível na internet:
<http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13552540810862028>
14. Thrimurthulu K, Pandey PM, Reddy NV. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [revista Em linha]. 2004 Maio [Consult. 2014 Maio 27];44(6):585–94. Disponível na internet:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503003262>
 15. Hashmi S. *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier Science; 2014 [Citado em 2014 Maio 21]. Disponível na internet: <http://books.google.pt/books?id=OV9-AgAAQBAJ>
 16. Systems 3D. About 3D Systems [Em linha]. 2014 [Consult. 2014 Maio 19]. Disponível na internet: <http://www.3dsystems.com/about-us>
 17. CubeX. CubeX - User Guide; 2012 [Citado em 2014 Maio 21]. Disponível na internet:
http://cubify.s3.amazonaws.com/public/cubex/cubex_user_guide.pdf
 18. Cube2. Cube 2nd Generation - User Guide; 2013 [Citado em 2014 Maio 21]. Disponível na internet: http://cubify.s3.amazonaws.com/public/cube/cube_user_guide.pdf
 19. Systems 3D. Cube® 3 Personal 3D Printer [Em linha]. [Consult. 2014 Junho 4]. Disponível na internet: <http://www.3dsystems.com/3d-printers/personal/cube-3>
 20. Green H, Estate I, Tel UK. 3D TOUCH; 2011 [Citado em 2014 Maio 21]. p. 2–3. Disponível na internet: http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/0911_touch_uk_3ds.pdf
 21. 3D Touch. 3D Touch Set Up and Operations Manual; 2011 [Citado em 2014 Maio 21]. Disponível na internet:
http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/3dtouch_setup_operations_manual.pdf
 22. Stratasys. About Stratasys [Em linha]. 2014 [Consult. 2014 Junho 4]. Disponível na internet:
<http://www.stratasys.com/corporate/about-us>
 23. Mojo. Mojo 3D Printer; 2013 [Citado em 2014 Maio 21]. Disponível na internet:
http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/System_Spec_Sheets-SS/MojoProductSpecs/MojoSellSheet-INTL-ENG-10-13 Web.pdf
 24. MakerBot. MakerBot Replicator2 - User manual; 2013 [Citado em 2014 Maio 26]. Disponível na internet:
http://downloads.makerbot.com/replicator2/MakerBot_Replicator2_user_manual.pdf
 25. MakerBot. MakerBot Replicator Desktop 3D Printer - User Manual; 2013 [Citado em 2014 Maio 26]. Disponível na internet:
http://download.makerbot.com/replicator/MB_Replicator_UserManual.pdf
 26. Ultimaker. Ultimaker About Us [Em linha]. [Consult. 2014 Maio 14]. Disponível na internet:
<https://www.ultimaker.com/pages/company/about-us>

27. Ultimaker. Ultimaker Original [Em linha]. [Consult. 2014 Maio 14]. Disponível na internet: <https://www.ultimaker.com/pages/our-printers/ultimaker-original>
28. Ultimaker. Ultimaker2 - User Manual V1.08; 2013 [Citado em 2014 Maio 26]. Disponível na internet: https://www.ultimaker.com/spree/uploads/36/original/Ultimaker_2_User_Manual_V1.08.pdf
29. Denford. UP Plus 3D Printer User Manual; 2013 [Citado em 2014 Maio 28]. Disponível na internet: [http://www.bilbycnc.com.au/machines/UP Plus 3D Printer Manual.pdf](http://www.bilbycnc.com.au/machines/UP%20Plus%203D%20Printer%20Manual.pdf)
30. Bv L. Manual Leapfrog Creatr; 2013 [Citado em 2014 Maio 28]. p. 1–88. Disponível na internet: <https://www.lpfrg.com/wp-content/uploads/2012/04/Leapfrog-3D-Printers-Creatr-Manual-Simplify3D-v1.0.1.pdf>
31. Formlabs. Form 1+ Printer — Formlabs [Em linha]. 2014 [Consult. 2014 Junho 30]. Disponível na internet: <http://formlabs.com/products/form-1-plus/>
32. BEEVERYCREATIVE. BEETHEFIRST Características Técnicas; 2013 [Citado em 2014 Maio 28]. Disponível na internet: <https://www.beeverycreative.com/client/files/0000000001/1260.pdf>
33. Ramanath, H. S. Chandrasekaran M, Chua CK, Leong KF, Shah KD. Modeling of Extrusion Behavior of Biopolymer and Composites in Fused Deposition Modeling. *Key Eng. Mater*; 2007. p. 334–5.
34. Ramanath HS, Chua CK, Leong KF, Shah KD. Melt Flow Behaviour of Poly-E-caprolactone in Fused Deposition Modelling. *Modelling. J. Mater*; 2008. p. 2541–50.
35. Nikzad M, Masood SH, Sbarski I, Groth A. A Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition Modelling Process. *Technol.*; 2009. p. 29–37.
36. Zhang Y, Chou K. A Parametric Study of Part Distortions in Fused Deposition Modelling Using Three-dimensional Finite Element Analysis. 2008. p. 222, 959–67.
37. Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentos de Transferencia de Calor e de Massa*. 6th ed. Genio; 2007.
38. National Instruments. *Medições de temperatura com termopares: Guia prático*. 2013.
39. Controle AI e. *Fundamentos e Recomendações para Calibração de Termopares*. 2013. p. 1–9.
40. Systemes D. *SolidWorks Flow Simulation 2013 Technical Reference*. 2013.
41. Rapid Prototyping - Three Dimensional Printing [Em linha]. [Consult. 2014 Maio 20]. Disponível na internet: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>

Anexos

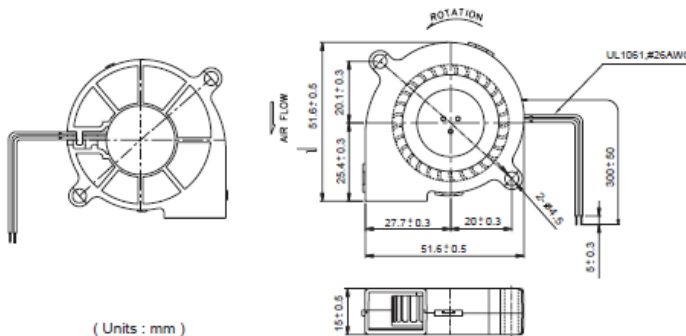
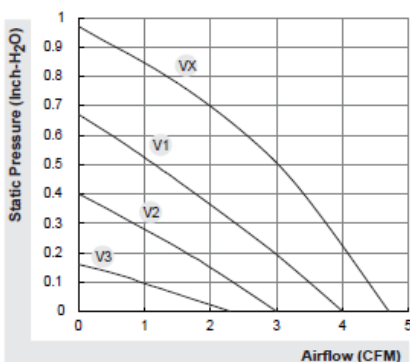
Anexo 1

50X50X15 mm SUNON

MagLev Green Motor Blower
2.3~4.7 CFM



Model	P/N	Bearing ● VAP0 ○ 2BALL	Rating Voltage (VDC)	Power Current (AMP)	Power Consumption (WATTS)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (Inch-H ₂ O)	Noise (dBA)	Weight (g)
GB1205PHVX-8AY	GN	●	12	0.17	2.0	6000	4.7	0.97	42.2	30
GB1205PHV1-8AY	GN	●	12	0.10	1.2	5000	4.0	0.67	39.8	30
GB1205PHV2-8AY	GN	●	12	0.06	0.7	4000	3.0	0.40	33.4	30
GB1205PHV3-8AY	GN	●	12	0.044	0.5	3000	2.3	0.16	27.0	30



DC FAN

JAMICON®

40X40X10 mm

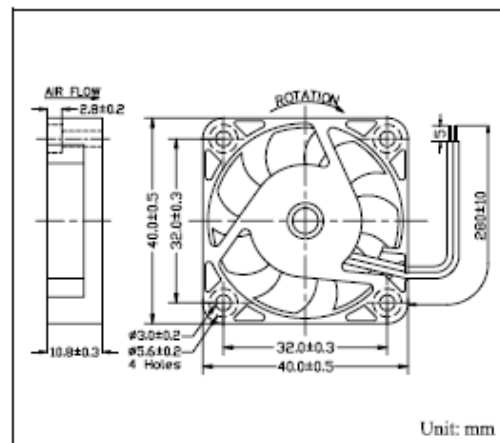
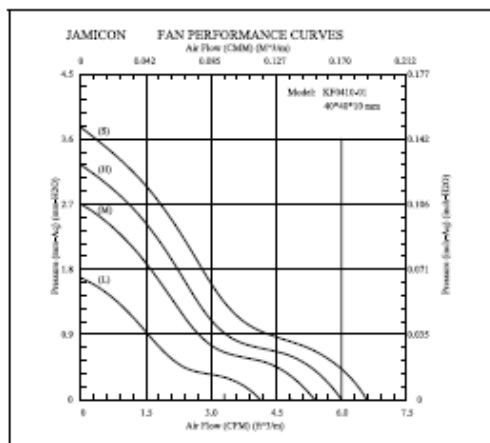
KF0410-01 Series



- **Frame** : Plastic Material UL 94V-0
- **Impeller** : Plastic Material UL 94V-0
- **Speed Range** : ±10%

SPECIFICATIONS											
Model	Bearing	Rated Voltage (V)	Operating Voltage (V)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (inchH ₂ O)	Speed (R.P.M.)	Input Current (Amp)	Input Power (Watt)	Nominal Power (Watt)	Noise (dBA)	Weight (g)
KF0410B5H-01	Dual Ball	5	4.25~5.75	6.00	0.128	6000	0.13	0.65	0.8	28.0	14
KF0410B5M-01				5.38	0.106	5400	0.09	0.45	0.5	25.7	
KF0410B5L-01				4.12	0.066	4200	0.07	0.35	0.4	20.9	
KF0410-5H-01	S,H			6.00	0.128	6000	0.20	1.00	1.2	28.0	
KF0410-5M-01				5.38	0.106	5400	0.10	0.50	0.8	25.7	
KF0410-5L-01				4.12	0.066	4200	0.08	0.40	0.6	20.9	
KF0410B1H-01	Dual Ball	12	10.2~13.8	6.00	0.128	6000	0.07	0.84	0.8	28.0	
KF0410B1M-01				5.38	0.106	5400	0.06	0.72	0.7	25.7	
KF0410B1L-01				4.12	0.066	4200	0.05	0.60	0.6	20.9	
KF0410-1H-01	S,H			6.00	0.128	6000	0.08	0.96	1.2	28.0	
KF0410-1M-01				5.38	0.106	5400	0.07	0.84	0.8	25.7	
KF0410-1L-01				4.12	0.066	4200	0.06	0.72	0.7	20.9	
KF0410B2S-01	Dual Ball	24	20.4~27.6	6.58	0.148	6600	0.06	1.44	1.4	30.6	
KF0410B2H-01				6.00	0.128	6000	0.05	1.20	1.2	28.0	
KF0410B2M-01				5.38	0.106	5400	0.04	0.96	1.0	25.7	
KF0410B2L-01	S,H			4.12	0.066	4200	0.03	0.72	0.8	20.9	
KF0410-2H-01				6.00	0.128	6000	0.05	1.20	1.2	28.0	
KF0410-2M-01				5.38	0.106	5400	0.04	0.96	1.0	25.7	
KF0410-2L-01	4.12	0.066	4200	0.03	0.72	0.8	20.9				

Specifications subject to change without notice



Anexo 2

Propriedades do ar

Temperatura (K)	Cp (J/(kg*K))
100	1029.11
110	1022.42
120	1018.23
130	1014.88
140	1012.79
150	1011.11
160	1009.86
170	1009.02
180	1008.18
190	1007.34
200	1006.51
210	1006.51
220	1006.51
230	1006.09
240	1006.09
250	1006.09
260	1006.09
270	1006.09
280	1006.51
290	1006.51
300	1006.92
350	1009.86
400	1014.88
450	1022
500	1030.37
550	1040.84
600	1052.14
650	1063.87
700	1075.84
750	1087.81
800	1099.45
850	1111.18
900	1122.06
950	1132.95
1000	1143
1200	1180.26

Temperatura (K)	Condutividade Térmica (W/(m*K))
83.15	0.00779229
93.15	0.00869946
103.15	0.00959499
113.15	0.0105021
123.15	0.0114209
173.15	0.0158637
223.15	0.0201669
273.15	0.0243073
373.15	0.031867
473.15	0.0387289
573.15	0.0447766
673.15	0.0504754
773.15	0.0561743
873.15	0.0615242
973.15	0.0666415
1073.15	0.0719915
1500	0.1
2000	0.137
2500	0.222
3000	0.486

Temperatura (K)	Viscosidade dinâmica (Pa*s)
85	6.04E-06
100	7.11E-06
200	1.33E-05
300	1.85E-05
400	2.30E-05
500	2.70E-05
800	3.70E-05
1000	4.24E-05
1500	5.57E-05
2000	6.89E-05
2300	7.66E-05
2500	8.18E-05
3000	9.55E-05

Anexo 3

Anexo 4

Anexo 5

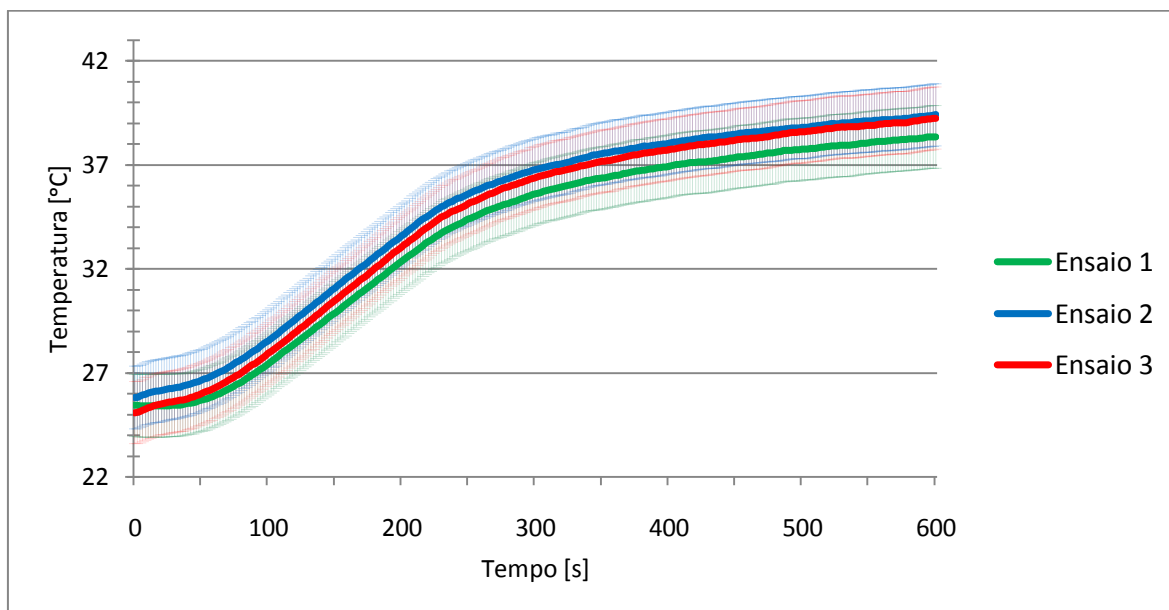


Figura 1 – Temperatura do Canal, para teste realizado antes de implementada solução de melhoria

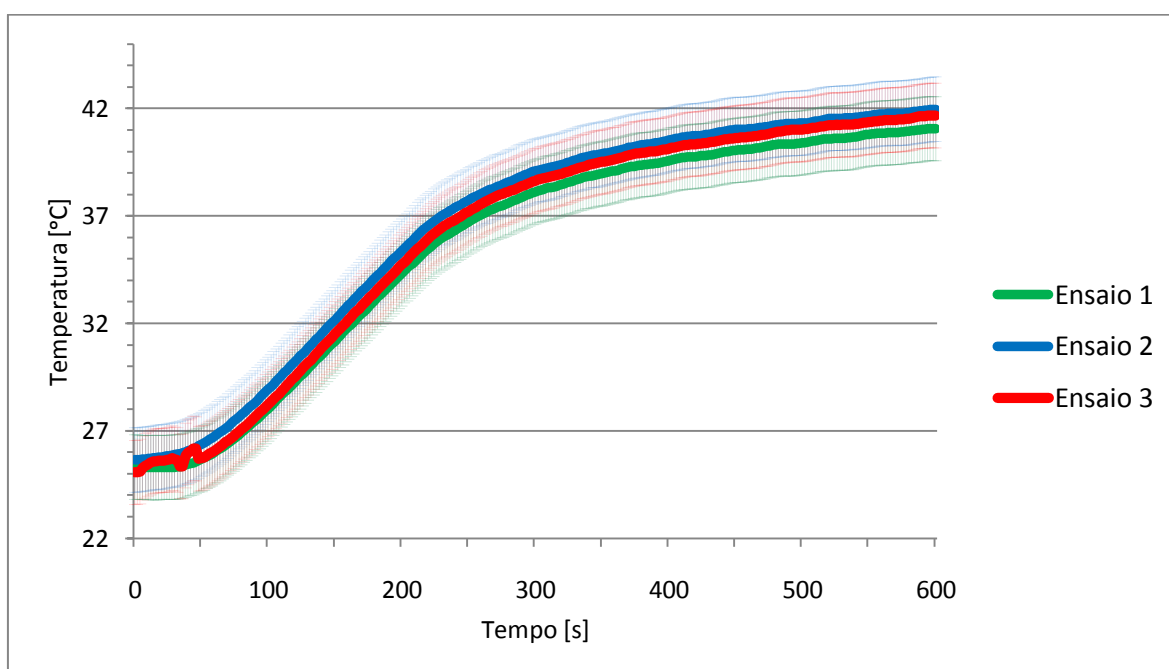


Figura 2 – Temperatura do bloco de arrefecimento, para teste realizado antes de implementada solução de melhoria

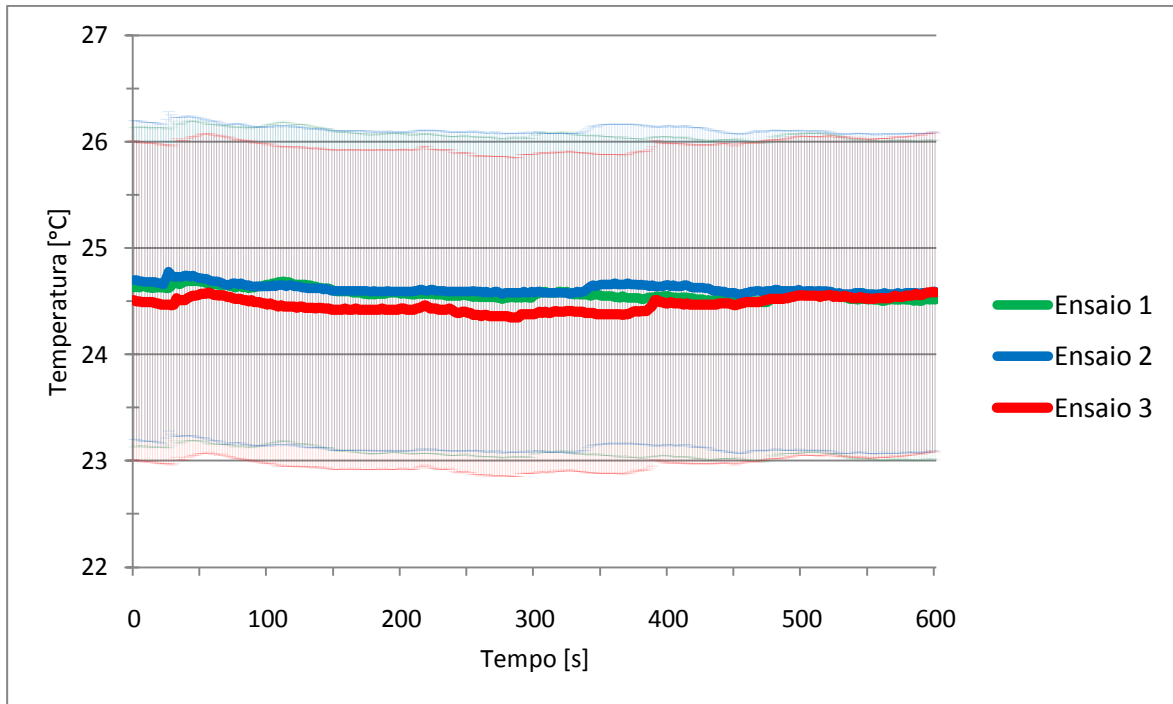


Figura 3 – Temperatura ambiente, para teste realizado antes de implementada solução de melhoria

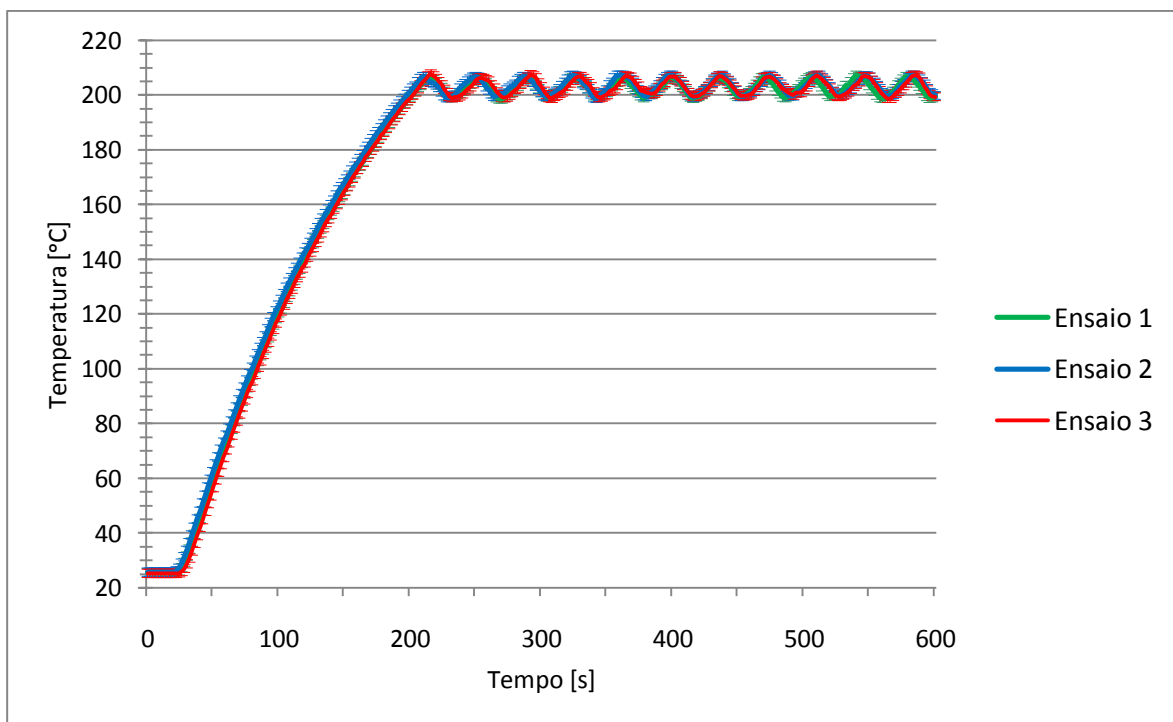


Figura 4 – Temperatura do bloco de aquecimento, para teste realizado antes de implementada solução de melhoria