



Marco Amandla Paulo Airola

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE FABRICO POR FUSÃO DE FILAMENTO

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António Manuel F. R. A. Gonçalves Coelho
Professor Catedrático

Presidente: Doutor António José Freire Mourão.
Vogais: Doutor João Manuel Vicente Fradinho,
Doutor António Manuel Flores Romão de Azevedo Gonçalves Coelho.



Dezembro de 2015

Avaliação de um Equipamento de Fabrico por Fusão de Filamento

Copyright ©, 2015, Marco Amandla Paulo Airola, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação, o meu eterno agradecimento, em especial:

A toda a minha família, em especial ao meu pai, Engenheiro João Airola, pelo apoio e incentivo sempre presente.

À minha namorada, Enfermeira Andreia Santos, durante anos passados juntos com paciência e compreensão.

Ao Doutor António Gonçalves Coelho pelo conhecimento e sabedoria que me foram transmitidos e disponibilidade que demonstrou sempre ao longo deste trabalho.

À amiga, Professora Maria Pires, pela presença e auxílio na revisão deste trabalho.

Aos meus amigos sempre disponíveis.

Resumo

Esta dissertação diz respeito à manufatura por adição, onde são avaliadas as capacidades para diferentes condições de funcionamento de uma impressora 3D por fusão de filamento, de modo a poder quantificar as respectivas vantagens em comparação com outras opções actualmente disponíveis no mercado.

Num contexto de inovação tecnológica, este trabalho tem em vista a validação e a possível aplicação deste tipo de equipamentos de fabrico no mercado empresarial e industrial.

Realizaram-se ensaios de fabrico que permitem identificar diferentes áreas de aplicação através das características de funcionamento, como o tempo de fabrico, a precisão dimensional, a variação mínima da precisão e a rugosidade de superfícies verticais e horizontais.

O equipamento utilizado foi uma impressora Leapfrog Creatr14.

Nesta avaliação caracterizaram-se os três tipos de qualidade de impressão disponíveis (baixa, média e alta).

Cada componente foi concebido para analisar um único aspecto da qualidade de impressão, mantendo todos os outros constantes.

O conhecimento assim adquirido poderá servir como possível base de comparação dos equipamentos de fabrico por fusão de filamento, dado que é uma tecnologia em crescimento e em desenvolvimento constante.

Palavras-chave: Manufatura por Adição, Fabricação por Fusão de Filamento, Controlo Numérico Computorizado.

Abstract

This thesis is about additive manufacturing, and assesses some capabilities at different operating conditions of a 3D printer by filament fusion, in order to quantify the benefits relating to other options currently available in the market.

In the context of technological innovation, this work aims the validation and development of this type of manufacturing equipment in the current and future application in research, business and industrial market.

This study intends to perform tests of manufacturing capabilities that allow the understanding of the characteristics and application areas, such as fabrication time, dimensional precision, experimental precision and the roughness on vertical and horizontal surfaces. All the tests were fabricated on the Leapfrog printer (Creatr14) equipment.

In the evaluation, we choose to characterize the three types of print quality (rapid, normal and high) in relation to the speed of deposition required.

In each component a single aspect of print quality is analyzed, keeping all other constants.

The knowledge acquired by this assessment will serve as a possible basis for future comparison of manufacturing by filament fusion, as is a growing technology in constant development.

Keywords: Adding Manufacturing, Manufacture by Filament Fusion, Computer Numerically Controlled.

Índice

Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	IX
Índice Figuras	XV
Índice de Tabelas.....	XVII
Lista de Siglas e Acrónimos	XVIII
Simbologia.....	XIX
1. INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivo da Dissertação.....	1
1.3. Organização da Dissertação	2
1.4. Normas	3
2. MANUFACTURA POR ADIÇÃO	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Processos, Tecnologias e Aplicações.....	9
2.2.1. Fotopolimerização.....	10
Equipa Lotus F1 e 3D Systems (12/2014) [9]	12
2.2.2. Deposição por Vaporização.....	14
Fundição de Baixo Custo de Lâminas Complexas [9]	16
2.2.3. Extrusão.....	17
Componentes Leves são a Chave para Carros Rápidos [12]	19
2.2.4. Ligação por Aglomeração.....	20
Fabricação de Tubagens [14]	22
2.2.5. Sobreposição Laminar	23
Aplicações da Sobreposição Laminar	25
2.2.6. Deposição Directa por Laser	26
Tecnologia de Reparação de Ferramentas.....	27
2.2.7. Fusão em Leito de Pó	28
Optimização da produção na eficiência de refrigeração	30
2.3. Visão Global da Manufactura por Adição	31
3. FABRICO POR FUSÃO DE FILAMENTO	37

3.1. Introdução.....	37
3.2. Leapfrog – Creatr14	38
3.3. Controlo Numérico.....	44
4. METODOLOGIA	47
4.1. Introdução.....	47
4.2. Medição Directa	49
4.3. Medidas Indirectas.....	50
4.4. Incerteza nas Medições.....	51
4.5. Acabamento Superficial	52
4.5.1 Rugosidade média aritmética (Ra).....	52
4.5.2. Rugosidade média (Rz).....	54
4.6. Distribuição Gráfica do Tempo de Fabrico.....	55
4.6.1. Baixa Qualidade.....	55
4.6.2. Média Qualidade.....	56
4.6.3. Alta Qualidade.....	57
4.7. Precisão Geométrica	58
4.8. Variação Mínima de Precisão no Eixo X	59
4.9. Variação Mínima de Precisão no Eixo Z	62
4.10. Rugosidade.....	65
4.10.1. Rugosidade da Superfície Topo.....	66
4.10.2. Rugosidade da Superfície Lateral	68
4.10.3. Rugosidade da Superfície Base	70
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	73
5.1. Especificações do Tempo de Fabrico	73
5.2. Precisão Geométrica	76
5.3. Variação mínima de precisão	76
5.4. Rugosidade.....	77
6. CONCLUSÕES.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS	85
Termos Fundamentais da Metrologia.....	87
Micrómetros.....	90
Rugosímetro de Superfície Digital Portátil, SRT-6223.....	91

Componentes e Dimensões	92
Especificações de Rápida Qualidade de Funcionamento.....	94
Especificações de Normal Qualidade Funcionamento.....	106
Especificações de Alta Qualidade de Funcionamento	107

Índice Figuras

Figura 1 – Processo seguido pela M.A.	5
Figura 2 – Processos e Tecnologias de fabricação por adição [7]	9
Figura 3 – Esquema do equipamento de Fotopolimerização [8]	10
Figura 4 – Modelo de caixa de ar para testes em túnel de vento.....	13
Figura 5 – Modelo de caixa de velocidades hidráulica para testes.....	13
Figura 6 – Esquema do equipamento de deposição por vaporização (Multijacto) [8]	14
Figura 7 – Esquema do equipamento de fabrico por fusão de filamento (FFF) [8]	17
Figura 8 – Modelo em escala reduzida 1/6 do Lamborghini Aventador.....	19
Figura 9 – Esquema do equipamento de ligação por aglomeração [8]	20
Figura 10 – Padrão e molde produzidos no estudo [8]	22
Figura 11 – Esquema do equipamento de Sobreposição Laminar [11]	23
Figura 12 – Esquema do equipamento de Deposição Directa a Laser [8]	26
Figura 13 – Sulcos realizados no estudo	27
Figura 14 – Esquema do equipamento de Fusão em Leito de Pó [8].....	28
Figura 15 – Vendas Relativas a F.A. [7]	31
Figura 16 – Percentagens das matérias-primas utilizadas em 2013 [2].....	32
Figura 17 – Equipamentos Disponíveis no Mercado [7]	33
Figura 18 – Cadeia de produção convencional vs., por adição [6].....	34
Figura 19 – Finalidade dos componentes produzidos por adição em 2014 [7]	35
Figura 20 – Equipamento Leapfrog Creatr14.....	38
Figura 21 – Janela inicial da aplicação <i>Simplify3D</i>	41
Figura 22 – Janela de opções de impressão.....	42
Figura 23 – Instruções de acção do equipamento	44
Figura 24 – Andoer 0-25mm, Micrómetro Digital.....	49
Figura 25 – SRT-6223 Digital Surface Profile Gauge Roughness Tester	50
Figura 26 – Rugosidade média, (Ra).....	52
Figura 27 – Irregularidades superficiais com o mesmo valor de Ra.	53
Figura 28 – Rugosidade média, (Rz).....	54
Figura 29 – Fabrico de baixa qualidade.....	55
Figura 30 – Fabrico de média qualidade	56
Figura 31 – Fabrico de alta qualidade	57
Figura 32 – Interpretação dos Valores da Precisão Geométrica no eixo X.....	60
Figura 33 – Interpretação dos Valores da Precisão Geométrica no eixo Z	63
Figura 34 – Forma de sondas de contacto	65
Figura 35 – Distribuição da rugosidade na superfície de topo	67
Figura 36 – Distribuição da rugosidade na superfície lateral.....	69
Figura 37 – Distribuição da rugosidade na superfície base.....	71
Figura 38 – Cubo de 15 mm	92
Figura 39 – Cubo de 20 mm de comprimento	93
Figura 40 – Especificações do ejector da impressora	94
Figura 41 – Especificações da camada produzida	95
Figura 42 – Especificações adicionais de impressão	96

Figura 43 – Especificações de preenchimento da geometria a produzir	97
Figura 44 – Especificações de material de suporte.....	98
Figura 45 – Especificações de controlo de temperatura dos ejectores.....	99
Figura 46 – Especificações de controlo de temperatura da plataforma.....	100
Figura 47 – Especificações do arrefecimento	101
Figura 48 – Especificações do G-Code.....	102
Figura 49 – Especificações do comando numérico	103
Figura 50 – Outras especificações.....	104
Figura 51 – Especificações avançadas.....	105
Figura 52 – Especificações da camada com qualidade normal.....	106
Figura 53 – Especificações da camada com qualidade alta	107
Figura 54 – Especificações adicionais com qualidade alta	108

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens na Fotopolimerização	11
Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens para MMJ.....	15
Tabela 3 – Tabela de comparação entre fundição tradicional e MMJ.....	16
Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens do processo FFF.....	18
Tabela 5 – Tabela de comparação entre processos tradicionais e FDM.....	20
Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens do Processo de Deposição com Aglomerante.....	21
Tabela 7 – Tabela de Vantagens e Desvantagens na Sobreposição Laminar.....	24
Tabela 8 – Áreas de interesse para o processo de sobreposição laminar [15].....	25
Tabela 9 – Vantagens e Desvantagens na tecnologia de Deposição Directa a Laser.....	26
Tabela 10 – Vantagens e Desvantagens no processo de fusão em leito de pó	29
Tabela 11 – Especificações da impressora 3D, Leapfrog Creatr14	39
Tabela 12 – Características do ácido poliláctico PLA	40
Tabela 13 – Valores esperados e registados de funcionamento	48
Tabela 14 – Características do micrómetro digital	49
Tabela 15 – Especificações do SRT6223.....	50
Tabela 16 – Classe de Rugosidade	54
Tabela 17 – Medições da Precisão	58
Tabela 18 – Médias e Desvios Padrão da Precisão	58
Tabela 19 – Distribuição da variação mínima de precisão no eixo X.....	59
Tabela 20 – Valores de precisão experimental no eixo X	61
Tabela 21 – Distribuição da variação mínima de precisão no eixo Z	62
Tabela 22 – Valores de precisão experimental no eixo Z.....	64
Tabela 23 – Rugosidade na superfície de topo	66
Tabela 24 – Rugosidade na superfície lateral	68
Tabela 25 – Rugosidade na superfície base	70
Tabela 26 – Grandezas do sistema internacional	88
Tabela 27 – Submúltiplos do metro	89

Lista de Siglas e Acrónimos

MA	Manufatura por Adição
CAD	Desenho Assistido por Computador
STL	Biblioteca Padrão de Gabaritos
ASTM	Sociedade Americana para Ensaios e Materiais
3D	Tridimensional
SLA	Estereolitografia
UV	Ultravioleta
DLP	Digitalização por Luz
MMJ	Multijacto
FFF	Fabrico por Fusão de Filamento
DFM	Deposição por Fusão de Filamento
PIBH	Impressão sobre Leito de Partículas e Jacto de Tinta
PP	Impressão 3D em Gesso
LOM	Manufatura Laminar do Objecto
UC	Consolidação Ultra-Sónica
DLM	Deposição de Metais por Laser
EBM	Fundição por Feixe de Electrões
SLS	Sinterização Selectiva por Laser
SHS	Sinterização Térmica
DMLS	Sinterização Directa de Metais por Laser
PLA	Ácido Poliláctico
PC	Policarbonato
PPSF	Polifenilsulfona
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
Laser	Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
CFRC	Fibra de Carbono com Cerâmica Reforçada

Simbologia

\bar{x}	Média Aritmética das Observações
$s(x)$	Desvio-Padrão Experimental das Observações
$s^2(x)$	Variância Experimental das Observações
Ra	Desvio Médio Aritmético
Rz	Desvio Médio da Altura Máxima
ε	Erro relativo
VM	Valor Padrão
VR	Valor Experimental
t	Tempo
Vd	Velocidade de Deposição
\mathcal{V}	Volume
V	Velocidade de Fabrico
R^2	Coefficiente de Determinação

1. INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO

1.1. Motivação

A realização desta dissertação surge como uma oportunidade de recolher e complementar o conhecimento da manufactura por adição. Este tipo de manufactura encontra-se em crescimento, esperando-se uma mudança na forma como o mundo utiliza a matéria-prima nas áreas da produção particular, empresarial, industrial e projecto. Esta dissertação centra-se no estado actual da manufactura por adição ou impressão 3D.

A presença na Feira “*3D PRINTSHOW PARIS 2013*” serviu como uma oportunidade para uma melhor compreensão e desenvolvimento das necessidades envolvidas numa área tecnológica e de produção em crescimento, como também o contacto e presença contínua em apresentações via *WEBNAIR* da *3DSYSTEMS*.

1.2. Objectivo da Dissertação

A presente dissertação tem como objectivo principal a avaliação de um equipamento de impressão 3D (Creatr14), de fabricação por fusão de filamento, em relação à garantia dimensional e à rugosidade superficial dos componentes fabricados.

Esta avaliação poderá servir de apoio para a implementação desta tecnologia onde haja necessidade de desenvolvimento, optimização e redução de custos.

Inicialmente apresentar-se-á a teoria dos processos de fabrico por adição, os diferentes tipos e as áreas de aplicação.

Realizar-se-ão análises de avaliação em condições reais e comparativas com os valores da modelação, de modo a aferir a semelhança entre ambos e assegurar um bom nível de qualidade para os resultados obtidos.

Os resultados serão comparados de modo a avaliar a fiabilidade das características em causa e os respectivos potenciais do fabrico por adição.

1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos:

O capítulo 1, designado de *Introdução*, faz uma apresentação da dissertação e da motivação por detrás do tema em estudo, bem como a descrição das principais etapas seguidas no referido documento.

O capítulo 2, designado de *Manufatura por Adição*, dá a conhecer a génese e evolução da manufatura por adição, os diferentes processos e aplicações. Apresentar-se-ão exemplos de utilizações que a manufatura por adição tem no mercado industrial actual.

O capítulo 3, designado de *Fabrico por Fusão de Filamento*, descreve as características e especificações principais do equipamento Creator14 e da matéria-prima a ser utilizada na dissertação.

O capítulo 4, designado de *Metodologia*, contém a descrição do modo de operação para o fabrico, as medições e os registos das medidas necessárias a sustentar a avaliação.

O capítulo 5, designado de *Resultados*, identifica as tendências dos valores obtidos.

O capítulo 6, designado de *Conclusões*, apresenta os diversos pontos considerados essenciais da presente dissertação e observações esperadas.

1.4. Normas

ASTM F2792:

Manufactura por adição é o termo oficial adoptado na indústria para todas as tecnologias que utilizam o processo de fabrico por camadas. É definida como o processo de unir matéria-prima de forma a criar objectos com origem em modelos 3D, camada por camada, ao contrário do processo subtrativo da manufactura. Sinónimos também utilizados: fabricação por adição, processos por adição, técnicas por adição, manufactura por adição de camadas, manufactura de camadas e fabricação sem forma [1].

NP EN ISO 9001:2008 e NP EN ISO/IEC 17025:2005:

Normas de Sistemas de Gestão da Qualidade e Requisitos Gerais de Competência para Laboratórios de Ensaio e Calibração, respectivamente, são as bases de todas as técnicas metrológicas, inspecção e ensaios seguidos. Descrevem o conjunto de operações, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou por um material de referência e os valores correspondentes de uma quantidade que se toma como padrão de referência [2] [3].

2. MANUFATURA POR ADIÇÃO

2.1. Introdução

A manufatura por adição (MA) refere-se a processos e a tecnologias em desenvolvimento há mais de 30 anos. Recentemente o Comité Internacional F42 da ASTM, designou que a “additive manufacturing as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies” [1]. A manufatura por adição pode ser definida como um processo de união de matéria de forma a criar um objecto sólido, proveniente de um modelo digital 3D, normalmente camada por camada, ao contrário dos processos substractivos convencionais.

Os processos por adição começam com a criação de um modelo digital tridimensional através de um programa informático de modelação (CAD). O ficheiro CAD é normalmente guardado na forma normalizada STL. Outra aplicação informática divide o modelo em camadas individuais, sendo enviado de seguida para o equipamento. “Os ficheiros STL foram criados em 1987 pela 3D Systems Inc., quando o processo de fotopolimerização foi desenvolvido. Sendo o ficheiro padrão para os processos de fabricação por adição. A criação de um ficheiro STL dá-se na conversão de geometrias contínuas de um ficheiro CAD, através de pequenos triângulos ou coordenadas em três direcções (x, y, z) e dos vectores normais a cada direcção” [4]

O equipamento de adição cria o componente adicionando camadas de material, até que o mesmo fique concluído. A Figura 1 contém uma descrição sucinta do processo.



Figura 1 – Processo seguido pela M.A.

Após o fabrico, dependendo da matéria-prima, do processo ou da tecnologia e da complexidade do modelo, certos tratamentos finais podem ser necessários. Alguns objectos podem ainda necessitar de tratamentos secundários posteriores, como por exemplo, o enchimento, o polimento por areia, o polimento químico, a cura e a pintura.

Outros processos de modelação digital tridimensional começam a surgir no mercado, como a digitalização 3D, que permite copiar e modificar modelos digitais com ajuda de uma aplicação de modelação informática.

A manufactura por adição ganhou recentemente um grande impulso na sua consciencialização e respeito pelo mundo empresarial e industrial. Os meios de comunicação social e os produtores destes equipamentos têm ultimamente, demonstrado as capacidades únicas destes processos.

Os processos de manufactura convencionais geralmente usam uma abordagem substractiva da matéria-prima (torneamento, perfuração e outros) para criar componentes. Com a impressão 3D, a manufactura consiste na deposição de matéria-prima em camadas ou secções geométricas muito finas, resultando em menor perda de matéria-prima, razoável acabamento superficial, possibilidade de criação de novas geometrias complexas, personalização dos produtos, redução do ciclo de produção e entrega, menor esforço e energia para converter um desenho num protótipo ou num objecto final.

Deve ter-se em conta que a manufactura convencional em massa necessita de menos recursos energéticos para o fabrico e, no caso de se utilizar matéria-prima biodegradável e assente especialmente na produção em moldes, o resultado é bastante competitivo em comparação com a manufactura por adição.

As duas formas de manufactura representam dois meios de atingir resultados diferentes, tanto em escala quanto em liberdade dos projectistas. Por exemplo, a produção em massa de anilhas através da manufactura por adição não representa a forma mais eficiente de fabrico. Da mesma forma, não devem ser produzidos dezenas ou centenas de injectores de combustível para motores a jacto por fabricação tradicional, por estarem em constante evolução e não representarem uma produção eficiente, devido às constantes mudanças da linha de produção.

A fabricação tradicional destaca-se por permitir tolerâncias apertadas em componentes de grande dimensão e continua a ser a melhor opção de produção para muitas aplicações.

A fabricação por adição é um complemento aos processos de fabrico tradicionais que pode proporcionar a optimização da criação de produtos e da sua execução. Este tipo de fabricação oferece a possibilidade de criar geometrias que anteriormente eram difíceis de produzir.

Segundo Kaufui Wong e Aldo Hernandez, entre outras, as maiores vantagens que os processos por adição apresentam na produção são: a redução do tempo e custo de fabrico, a interacção humana e a possibilidade de fabrico de quase qualquer geometria, o que seria extremamente difícil noutro processo de fabrico. [5]

Vantagens do fabrico tradicional:

- Quantidade elevada de produção;
- Custos quase constantes no intervalo temporal do consumidor;
- Elevado número de matérias-primas utilizadas.

Desvantagens do fabrico tradicional:

- Restrição da complexidade do bem fabricado;
- Elevado número de ferramentas necessárias;
- Difícil personalização.

Sendo a fabricação por adição um processo complementar ao processo de produção tradicional, as vantagens e desvantagens encontram-se onde o fabrico tradicional não consegue dar resposta.

Vantagens do fabrico por adição:

- Redução dos custos de fabrico para componentes em pequenos lotes;
- Capacidade de fabrico de artigos muito complexos e personalizados;
- Redução do tempo e custo de desenvolvimento;
- Redução de matéria-prima utilizada;

Desvantagens do fabrico por adição:

- Preço de matéria-prima para grandes volumes;
- Pequena variedade das matérias-primas em comparação com o fabrico tradicional.

Como qualquer tecnologia, a implementação da fabricação por adição será dificultada pelas desvantagens que apresenta.

“A impressão 3D é um complemento dos processos de fabrico convencionais, de forma a otimizar a execução e a produção de componentes. Sendo que os processos por adição beneficiam das características dos equipamentos CNC em operações de componentes plásticos e metálicos para tolerâncias e operações secundárias. Tendo em conta que a impressão 3D não substituirá a fabricação convencional num futuro previsível” [6].

“Os processos por adição e os processos convencionais enfrentam desvantagens diferentes, com cada processo dependente das capacidades dos recursos de fabricação” [7].

2.2. Processos, Tecnologias e Aplicações

A manufatura por adição é um conjunto de processos diferenciados pela tecnologia utilizada para criar o componente final. A Sociedade Americana de Ensaio e Materiais (ASTM) definiu sete tipos de processos de base para a manufatura por adição, como mostra a Figura 2. [7]

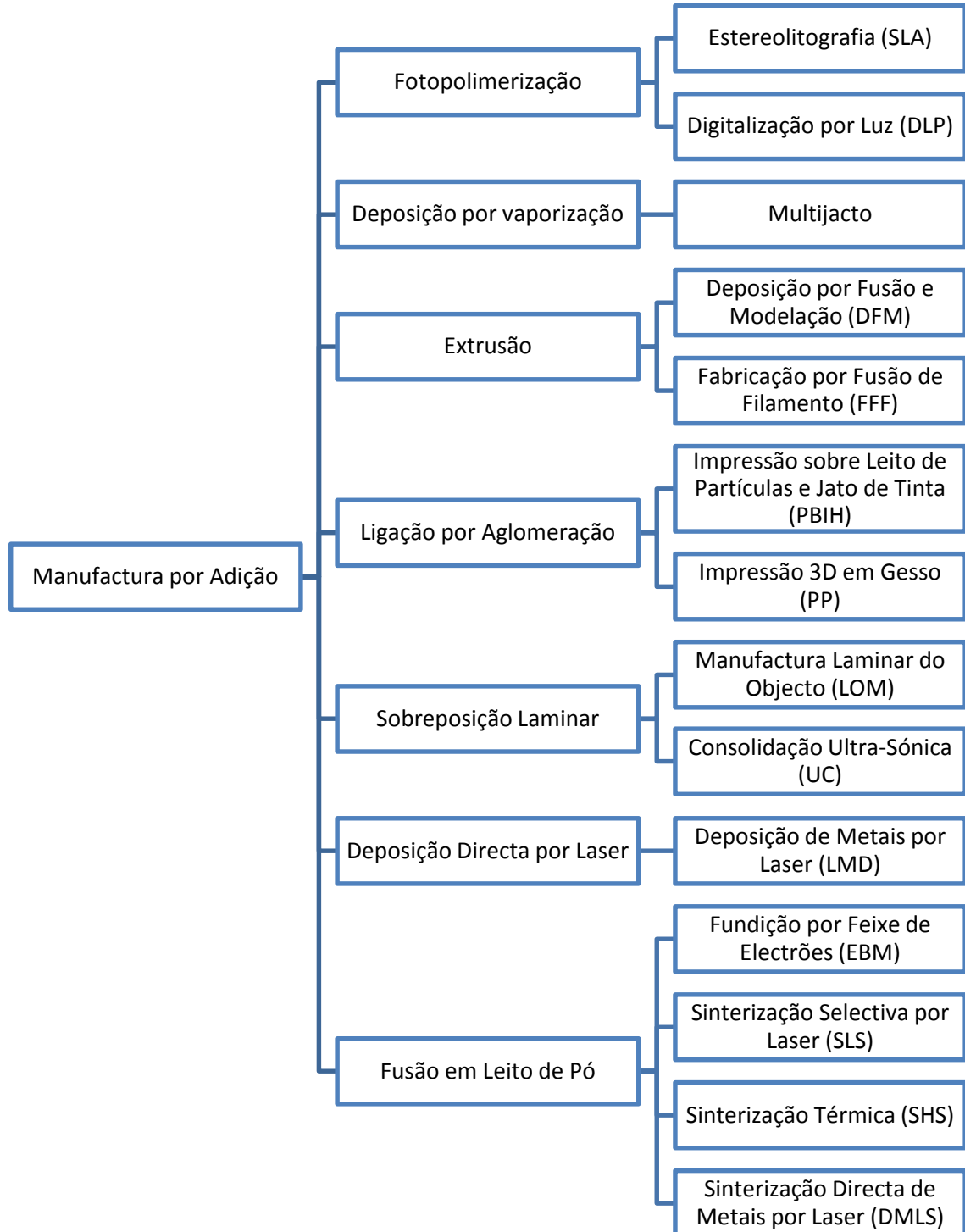


Figura 2 – Processos e Tecnologias de fabricação por adição [7]

2.2.1. Fotopolimerização

O primeiro processo de manufatura por adição a ser criado foi a fotopolimerização o qual, devido às restrições impostas pelas patentes que ainda são válidas, continua a ser pouco utilizado.

A fotopolimerização consiste na solidificação (cura), por acção de um laser, de resinas fotossensíveis ou termossensíveis.

Este processo é utilizado na produção de protótipos conceptuais e funcionais, assim como na produção de pré-formas destinadas à fabricação rápida de ferramentas, desempenhando um importante papel no processo de desenvolvimento do produto. Os principais materiais utilizados na fotopolimerização são as resinas plásticas fotossensíveis, cerâmicas e compósitos.

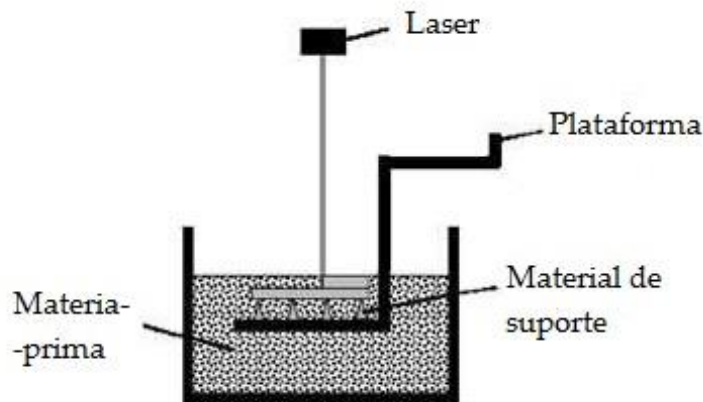


Figura 3 – Esquema do equipamento de Fotopolimerização [8]

O processo de fotopolimerização está representado na Figura 3 e realiza-se no interior de um reservatório, sendo a etapa inicial do processo a deposição na plataforma de uma fina camada de resina (geralmente entre 0.05-0.15 mm de espessura), que é atingida pelo laser, criando assim a primeira camada do componente, a qual endurece de imediato. Assim que a camada inicial do componente se encontra concluída, a plataforma desloca-se na vertical, permitindo a deposição de uma nova camada de resina sobre a camada já existente. O laser repete o processo sobre a nova secção transversal que se liga à secção anteriormente endurecida. Este processo é repetido até que o componente esteja concluído.

Como este processo requer suporte estrutural, torna-se necessária a separação posterior do suporte relativamente ao componente, sendo também norma a realização da cura do componente para se obter melhores características.

O processo de fotopolimerização incorpora duas tecnologias alternativas, a estereolitografia (SLA – fonte de laser UV) e a digitalização por luz (DLP). Estas tecnologias apresentam as vantagens e as desvantagens que estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens na Fotopolimerização

	Vantagens	Desvantagens
Estereolitografia	Geometrias complexas Precisão elevada Acabamento superficial	Cura após fabrico Suporte estrutural Custo do equipamento Custo da matéria-prima Produção de gases tóxicos
Digitalização por Luz	Produção em paralelo Tamanho variável Geometrias complexas Precisão elevada	Espessura do componente Custo do equipamento Custo da matéria-prima Produção de gases tóxicos Suporte estrutural

As aplicações deste processo encontram-se na prototipagem, na medicina, na indústria automóvel e na indústria aeronáutica.

Na área da medicina é utilizada na medicina dentária (próteses dentárias), na área automóvel é utilizada na prototipagem (como a construção das réplicas de automóveis) e na indústria aeronáutica é utilizada no fabrico de componentes finais (como as dobradiças dos aviões da Boeing, com a mesma funcionalidade, menor complexidade de construção e menor peso).

"Duas das principais vantagens da tecnologia de fotopolimerização sobre outras tecnologias de fabrico por adição encontram-se na precisão e acabamento de superficiais dos componentes" [6].

Equipa Lotus F1 e 3D Systems (12/2014) [9]

A inovação na engenharia tem um dos seus alicerces na tecnologia automóvel. A procura de maior vantagem competitiva e eficiência mecânica na Fórmula 1 é um dos melhores exemplos.

A investigação e produção de protótipos com processos por adição iniciaram-se em 1998, na aerodinâmica dos componentes internos e externos e estruturas dos carros da Formula 1. Desde então, a equipa Lotus conseguiu simplificar os componentes e as estruturas, tendo obtido melhorias significativas dos protótipos em função do tamanho, dos ajustes e do número de componentes para testes, o que levou ao aumento da equipa de 11 para 80 engenheiros.

O sucesso na integração do equipamento de fabricação por adição no departamento de investigação apresentou, desde logo, várias áreas de possível melhoria, como:

- Testes no túnel de vento em relação a aerodinâmica.
- Novos projectos.
- Novas formas de incorporar a rede de sensores de pressão, nos modelos de teste.
- Maior capacidade de produzir componentes complexos e canais intrincados internos.
- Maior capacidade de fabrico de várias iterações do mesmo componente para testes.

Desde 1998, a Lotus criou nove centros de investigação, cada qual dispondo de um equipamento de fabrico por adição, o que permitiu a produção directa de peças para os carros da F1.

Em 2001, os primeiros componentes fabricados por adição (tecnologia SLA), foram incorporados no carro principal de corrida da F1 (ver Figura 4). Os principais benefícios obtidos pela Lotus F1 foram:

- Eficácia no processo aplicado.
- Redução dos tempos de ciclo de investigação e produção.
- Redução nos custos.
- Menor número de componentes no carro.

Outra aplicação encontrada pela equipa Lotus F1 foi na produção de componentes da suspensão e da caixa de velocidades (ver Figura 5) através da produção de moldes para fundição de precisão. A possibilidade dos projectistas serem mais criativos com o projecto, levou à diminuição das restrições relativas à complexidades das peças, devido à fiabilidade do processo.

Os novos objectivos da equipa Lotus F1 em relação à fabricação digital são:

- Incorporar o fabrico de peças a pronto, de forma a reduzir ainda mais os ciclos envolvidos.
- Estudo de novos materiais, que suportem impactos e vibrações mais intensos e temperaturas mais elevadas.



Figura 4 – Modelo de caixa de ar para testes em túnel de vento



Figura 5 – Modelo de caixa de velocidades hidráulica para testes

2.2.2. Deposição por Vaporização

O processo de deposição por vaporização funciona com uma cabeça de ejeção que se desloca sobre uma plataforma de fabrico, depositando matéria-prima, camada por camada (ver Figura 6). Este processo funciona normalmente com dois materiais, um dos quais é tipicamente um fotopolímero que é curado e outro que é o material de apoio (cera). As gotículas do material são frequentemente comprimidas com o segundo material (cera), de forma a criar estruturas de apoio durante o processo de fabrico.

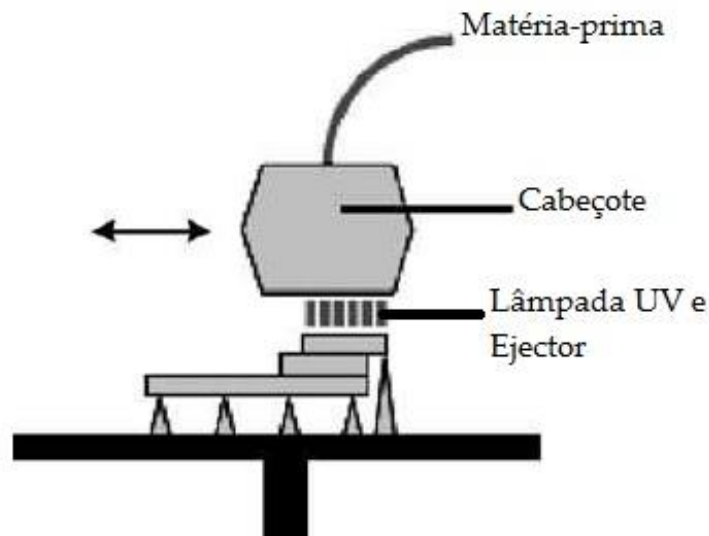


Figura 6 – Esquema do equipamento de deposição por vaporização (Multijacto) [8]

Os elementos mais importantes dos equipamentos por deposição por vaporização são a plataforma de fabrico, na qual assenta o componente; a cabeça de ejeção, onde são vaporizados os materiais; uma lâmpada UV; e, por último, um dispositivo que nivela o material de forma a criar uma interface plana entre as camadas depositadas.

Como em outros processos por adição, a cabeça de impressão move-se no plano horizontal, criando camada por camada.

A cera é usada neste processo, por ser facilmente removida, por fusão, no fim do processo. Em alguns casos poder-se-á usar apenas o material de apoio (a cera), como por exemplo, para moldes de jóias.

As aplicações mais relevantes deste processo são os casos em que são necessários protótipos de alta precisão, com ou sem geometrias complexas, com partes móveis e com um bom acabamento superficial.

Como este processo requer suporte estrutural, o componente irá necessitar da remoção do segundo material, através de um tratamento térmico. O processo de deposição por vaporização incorpora a tecnologia de Multijacto (MMJ – fonte de laser UV). Esta tecnologia apresenta vantagens e desvantagens que são indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Vantagens e Desvantagens para MMJ

	Vantagens	Desvantagens
Multijacto (MMJ)	Geometrias complexas Precisão Acabamento superficial Facilidade de remoção do material de suporte	Material de cera disponível Tratamentos finais necessários

As aplicações desta tecnologia encontram-se na prototipagem e na indústria de fundição para moldes de cera perdida.

"As principais vantagens da tecnologia de multijacto incluem o baixo custo, alta velocidade e a capacidade de impressão com cores..." e "as desvantagens incluem a matéria-prima limitada e a precisão para peças grandes, comparativamente com os processos de fotopolimerização e extrusão por fusão" [6].

Fundição de Baixo Custo de Peças Complexas [9]

Aplicabilidade: Produção unitária de peças complexas em lotes de um ou de pequenas séries e necessidade do processo ser rápido e eficiente.

A fundição tradicional requer recursos significativos, o que penaliza a eficiência de produção. Neste caso, o problema encontra-se no custo da produção dos moldes de cera, uma vez que são necessárias diversas ferramentas específicas para cada molde, como se pode constatar pela Tabela 3.

Propósito: Rentabilidade do processo de fabrico.

Desafio: Produção de pequenos lotes de peças complexas.

Tabela 3 – Tabela de comparação entre fundição tradicional e MMJ

	Fundição tradicional	MMJ
Tamanho final	500*500*45	500*500*45
Peso (kg)	15,4	1,26
Matéria – prima	Aço	PMMA
Tempo de espera (dias)	21-28	5, 10, 21

Solução: Tecnologia de produção de moldes de cera perdida.

A fabricação por adição pode ser direccionada para problemas deste tipo, uma vez que permite a produção de moldes de cera perdida. Com este processo os moldes são fabricados com rapidez, precisão e a baixo custo.

2.2.3. Extrusão

Em 1989 S. Scott Crump desenvolveu um processo de extrusão (ver Figura 7), em que um filamento termoplástico é extrudido através de um ejetor aquecido e depositado sobre uma plataforma de fabrico. O processo é geralmente conhecido como de fabricação por fusão de filamento (FFF). O ejetor funde o material e faz a sua deposição de forma a criar camadas sobrepostas. O processo continua até que o componente esteja concluído.

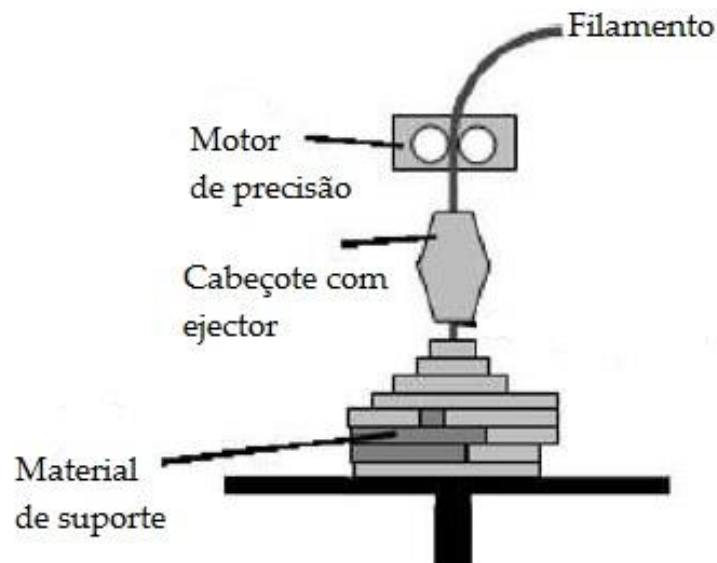


Figura 7 – Esquema do equipamento de fabricação por fusão de filamento (FFF) [8]

A cabeça de extrusão está montada num suporte com movimentos no plano de construção e funciona a alta velocidade sendo o controlo realizado por um computador.

O filamento é desenrolado a partir de uma bobina, que passa por uma zona térmica onde sofre fusão, chegando então ao ejetor de extrusão.

O cabeçote do ejetor funciona como um êmbolo, forçando a saída do material fundido pela sua extremidade inferior.

O ejetor de extrusão possui um mecanismo que permite interromper o fluxo de material e está assente numa plataforma mecânica de fabrico dotada de movimento vertical.

A extrusão é um processo rápido de fabricação que produz protótipos funcionais de plástico para a engenharia. Pode produzir modelos funcionais directamente a partir de dados CAD.

Hoje em dia, muitas impressoras 3D pessoais e profissionais adoptaram esta tecnologia devido à expiração das patentes.

Os componentes criados por este processo são resistentes e duráveis e os materiais disponíveis são os termoplásticos, os compósitos e as ligas metálicas eutécticas.

Existem muitas indústrias onde componentes fabricados por fusão de filamento conseguem ser alternativa válida aos componentes de fabricação tradicional, quando se requer alto rácio resistência-peso, complexidade geométrica, personalização, melhorias de última hora e produção em pequenas quantidades.

Este processo por vezes obriga à deposição de material para suporte estrutural, o qual tem de ser removido no fim do processo de fabrico.

O processo de extrusão incorpora as tecnologias de Deposição por Fusão da Modelação (DFM) e o Fabrico por Fusão de Filamento (FFF). Esta última tecnologia apresenta vantagens e desvantagens, que serão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens do processo FFF

Vantagens	Desvantagens
Geometrias complexas Materiais disponíveis Baixo desperdício	Acabamento superficial Suporte estruturais

Este processo de fabricação utiliza-se na indústria, quer na prototipagem, quer na produção de componentes funcionais. Podem-se referir, como exemplos, certos componentes para a cabina da aeronave ULTEM 9085, a qual beneficiou de várias melhorias, quer na sua construção, quer na sua manutenção, destacando-se as que se obtiveram em certos componentes dos assentos e das respectivas estruturas de suporte, nas condutas térmicas, nos painéis de distribuição de electricidade, nos grampos e nos suportes com configurações especiais. [11]

"Os equipamentos de fabrico por fusão de filamento conseguem responder às necessidades actuais da indústria, isto é, devido às propriedades do material e em parte ao baixo custo dos equipamentos. Sendo as desvantagens nesta tecnologia a velocidade de produção, a precisão e a densidade do material" [6].

Componentes Leves são a Chave para Carros Rápidos [12]

O Lamborghini Aventador foi considerado um dos melhores carros de 2011, com aceleração de 0 até 97 km/h em 2,9 s, com uma velocidade máxima de 370 km/h.

Em relação aos modelos Murciélago anteriores, o Aventador é 9% mais potente, 20% mais eficiente e 6% mais leve. Este desempenho foi atingido devido ao chassi monobloco, feito de fibra de carbono (CFRC), sendo o maior componente CFRC executado até à data (2014).

Através da fabricação tradicional, a criação do chassi monobloco demoraria cerca de 4 meses a ser realizada e com um custo aproximado de 40 mil dólares devido, principalmente, aos custos das ferramentas utilizadas na produção, ver Figura 8. Tendo em conta o custo, a Lamborghini tendo procurou, através da investigação, outras formas de obter o componente desejado, tendo, no entanto, em atenção a manutenção das suas principais características, tais como a resistência mecânica.



Figura 8 – Modelo em escala reduzida 1/6 do Lamborghini Aventador

Através de equipamentos DFM, a Lamborghini conseguiu produzir dois componentes chave para o Aventador, o chassi monobloco e o modelo em escala reduzida 1/6, tendo ganhos significativos com esta mudança. Como se pode observar na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de comparação entre processos tradicionais e FDM

Método	Processo Tradicional	FDM	Ganhos
Custo	40000 \$	3090 \$	36910 \$ (92%)
Tempo de Fabrico	120 Dias	20 Dias	100 Dias (80%)

Outras empresas do ramo automóvel também se encontram a investir na fabricação por adição, pelo processo de extrusão nos seus componentes, como a AMP Research, Bentley Motors, BMW, Dana Corp, Hyundai Mobis, Jaguar, Land Rover e Outras [13].

2.2.4. Ligação por Aglomeração

Na ligação por aglomeração, o processo inicia-se pela deposição de um leito de pó e pela passagem de um rolo, de forma a uniformizar a distribuição do pó. De seguida, as partículas são selectivamente ligadas, através de aspersão de um aglomerante líquido e pela acção de um laser UV, sendo possível dar uma cor diferente a cada camada, por uso de pigmentos adicionados ao aglomerante líquido. Uma vez criada uma camada, mais material em pó é depositado, o rolo de uniformização efectua nova passagem, mais aglomerante é aspergido e polimerizado pelo laser UV, e o processo repete-se até à conclusão do componente, como mostra a Figura 9.

O material que não é incorporado no componente pode servir como material de suporte, reduzindo assim a necessidade de sistemas de fixação.

Este processo requer um tratamento posterior. Tendo em conta que existe uma união frágil entre as partículas aglomeradas, é realizada cura ou uma infiltração, de forma a obter um componente mais bem aglomerado.

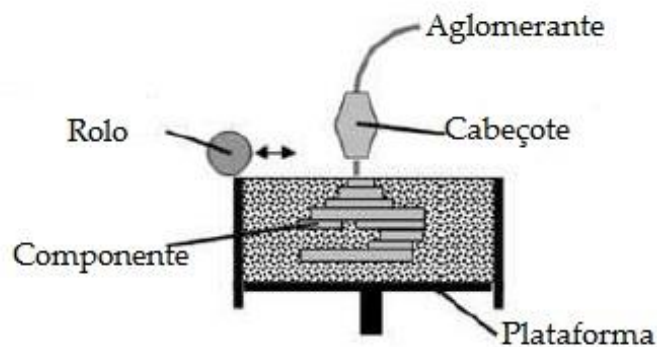


Figura 9 – Esquema do equipamento de ligação por aglomeração [8]

Este processo distingue-se pela sua simplicidade, repetibilidade, por ter um custo muito reduzido e também por permitir o fabrico de componentes de grande dimensão.

As matérias-primas utilizadas por este processo são: a cerâmica, os metais laminados, os acrílicos, a areia, os compósitos, os polímeros e o gesso.

O processo de ligação por aglomeração incorpora duas tecnologias: a impressão sobre leito de partículas e jacto de tinta (PBIH) e a impressão 3D em gesso (PP).

Estas tecnologias apresentam vantagens e desvantagens, que são indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens do Processo de Deposição com Aglomerante

	Vantagens	Desvantagens
Impressão sobre Leito de Partículas e Jacto de Tinta	Objectos coloridos Baixo custo Fabrico rápido	Precisão Acabamento superficial
Impressão 3D em Gesso	Baixo Custo Objectos coloridos Fabrico rápido Reciclagem do material	Materiais disponíveis Componentes frágeis

As aplicações destas tecnologias encontram-se na indústria de maquinaria, na medicina, nas belas-artes e nas indústrias com necessidade de componentes de grandes dimensões.

"O processo de ligação por aglomeração partilha muitas das vantagens do processo de deposição por vaporização. A principal vantagem encontra-se na fracção volúmica de união, no entanto, a necessidade de distribuição de cada camada de matéria-prima adiciona uma etapa extra. Em segundo lugar, a combinação de materiais permite obter características singulares nos componentes" [6].

Fabricação de Tubagens [14]

Uma empresa de grande dimensão apresentou a alguns investigadores um desafio. Necessitava de uma tecnologia de produção rápida e económica para protótipos complexos de tubagens para substituição num curto intervalo de tempo.

As especificações do problema foram as seguintes:

- Formas variadas.
- Lote mínimo de 5 peças.
- Com tamanho de 400 * 400 * 400 mm até 1000 * 1000 * 2500 mm.
- Material metálico como preferência.

A Figura 10 apresenta um exemplo de um componente a produzir, sendo as diferenças encontradas neste estudo as seguintes:



Figura 10 – Padrão e molde produzidos no estudo [8]

A produção tradicional caracteriza-se por:

- Necessidade de diferentes padrões, ferramentas e modelos para os moldes.
- Tempo de produção: várias semanas.
- Custo por lote: entre 8000 e 40000 euros, dependendo do tamanho e complexidade.

A produção com o equipamento por deposição de aglomerante caracteriza-se por:

- Tempo de produção entre 30 e 48 horas.
- Custo por tubagem entre 240 e 10000 euros.

Com o processo de ligação por aglomeração, alcançaram-se melhores resultados, tanto no tempo como no custo, em relação aos métodos convencionais. A empresa conseguiu garantir as suas especificações dos seus produtos e aumentar a sua capacidade de produção de tubagens para múltiplas aplicações adicionais.

2.2.5. Sobreposição Laminar

No processo de sobreposição laminar, finas camadas de material são unidas (por colagem ou por união ultra-sónica) a fim de formar um objecto, como se observa na Figura 11.

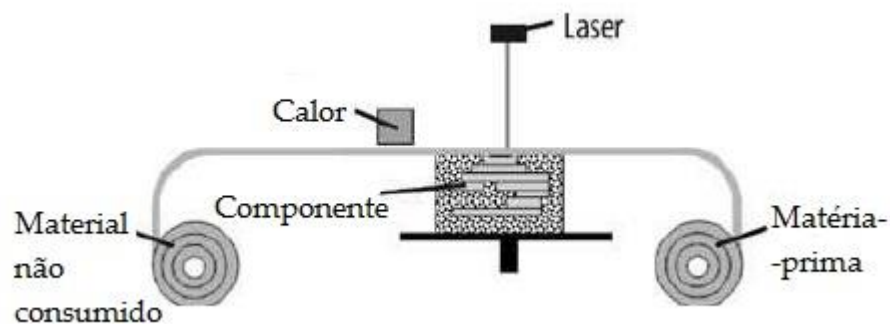


Figura 11 – Esquema do equipamento de Sobreposição Laminar [11]

Cada nova camada de material é colocada sobre a camada anterior. De seguida, um laser ou utensílio de corte é usado para delimitar a parte desejada e o material desnecessário é removido. Este processo é repetido até que o objecto esteja concluído.

As características mais importantes deste processo são: a possibilidade de trabalhar em locais expostos ao ambiente, produzir estruturas internas ou canais nos componentes e utilizar diferentes materiais de forma dissimilar, isto é, começar com um material de cobre e terminar com um material em alumínio ou aço inoxidável.

Esta capacidade é muito importante para a engenharia electrónica.

Este processo distingue-se pela sua simplicidade e repetibilidade.

Os materiais mais utilizados neste processo são: o papel, o polímero, o cerâmico e o metal laminado.

O processo de sobreposição laminar incorpora duas tecnologias, a Manufatura Laminar do Objecto (LOM) e a Consolidação Ultra-Sónica (UC).

Estas tecnologias apresentam vantagens e desvantagens indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela de Vantagens e Desvantagens na Sobreposição Laminar

	Vantagens	Desvantagens
Manufatura Laminar do Objecto	Custo reduzido Materiais não tóxicos Rápido para componentes de grande dimensão	Precisão Componentes não homogéneos
Consolidação Ultra-Sónica	Fabrico rápido Materiais não tóxicos	Menor precisão em comparação com outras formas de fabrico por adição Necessidade de tratamentos posteriores Acabamento em superfícies verticais







As aplicações destas tecnologias encontram-se nas belas-artes e nas indústrias com necessidades de componentes de grandes dimensões.

"O processo de sobreposição laminar incorpora um fabrico especial nas estruturas internas e a principal vantagem em relação aos outros processos de manufatura por adição, está no fabrico de estruturas metálicas a baixas temperaturas" [6].

Aplicações da Sobreposição Laminar

Em relação a este processo, os acessos a estudos de casos são ainda bastante restritos, principalmente devido ao alto valor pedido. Na Tabela 8 são apresentadas áreas de interesse para esta tecnologia.

Tabela 8 – Áreas de interesse para o processo de sobreposição laminar [15]

	
Arquitectura	Moldes
	
Medicina	Arqueologia
	
Arte e Cultura	Educação

2.2.6. Deposição Directa por Laser

A deposição directa por laser é um processo em que energia térmica concentrada é utilizada para fusão do metal (filamento ou pó) enquanto este é depositado. Ao contrário dos outros processos de fabricação por adição, em que são depositadas camadas de material e depois é aplicada uma forma de energia, na deposição directa por laser, a energia é aplicada sobre a plataforma de fabrico e só depois é depositado o material sobre o foco energético, como mostra a Figura 12.

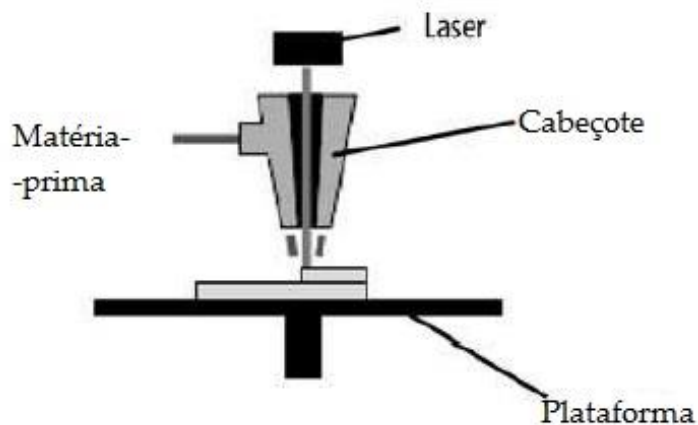


Figura 12 – Esquema do equipamento de Deposição Directa a Laser [8]

Este processo pode decorrer em câmara aberta. No caso de existirem dois reservatórios, um é utilizado para o material principal, servindo o outro para o material de suporte (resina), ou para criar um objecto composto por camadas de materiais diferentes ou de combinações dos mesmos.

Este processo distingue-se pela velocidade de fabrico e as matérias-primas utilizadas são os metais, as ligas e os compósitos.

O processo de deposição directa por laser incorpora a tecnologia de deposição de metais por laser (DLM). Esta tecnologia apresenta vantagens e desvantagens indicadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Vantagens e Desvantagens na tecnologia de Deposição Directa a Laser

	Vantagens	Desvantagens
Deposição de Metais por Laser	Fabrico com vários materiais em simultâneo Fabrico de componente de elevada dimensão Flexibilidade de fabrico	Custo elevado Necessidade de tratamentos posteriores Suporte estruturais

A principal aplicação deste processo é a reparação de ferramentas.

"O processo de deposição directa por laser é capaz de produzir componentes densos com microestruturas específicas. As principais limitações estão na exactidão e acabamento superficial..." e "... construção mais lenta é outra limitação" [6].

Tecnologia de Reparação de Ferramentas

Na indústria convencional, quando ferramentas ou componentes de produção são danificados, são normalmente triturados ou reconicionados para ganhar nova vida.

Para resolver este problema, a investigação sobre o uso da deposição de metais por laser tem procurado novas soluções que passam pela utilização de aço inoxidável e de ligas de titânio (6Al-4V) para preencher as zonas danificadas.

Actualmente, os estudos centram-se na obtenção de microestruturas adequadas e no controlo da zona termicamente afectada pelo laser, de forma a que sejam conseguidas pequenas distorções e baixo impacto metalúrgico.

Foram estudadas três formas diferentes de sulcos, dado que defeitos com 10 mm de profundidade são considerados inaceitáveis em ferramentas e em mau estado de conservação. Esses sulcos apenas diferem no volume a preencher e na acessibilidade ao feixe de laser e ao jacto de pó, ver Figura 13.

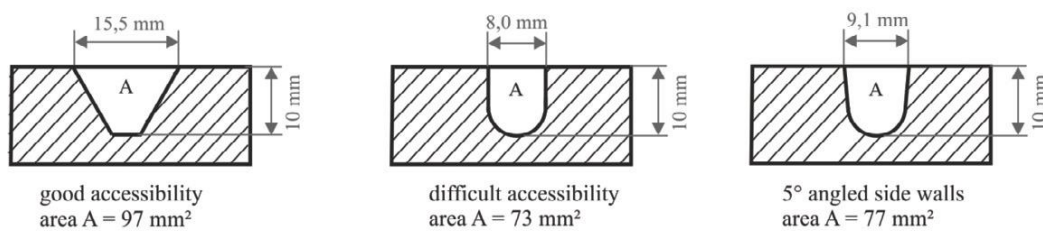


Figura 13 – Sulcos realizados no estudo

As diferentes formas foram reconstruídas sem defeitos e com boa ligação com o material de base, tanto no caso do aço inoxidável quanto no da liga de titânio. A utilização da liga de titânio permitiu a deposição sem auxílio de gás inerte. Nas observações finais não foram detectados quaisquer defeitos.

A estratégia de deposição que foi desenvolvida permitiu a reparação dos defeitos sem ajuste manual, ficando assim demonstrado que a deposição por

laser de metais tem grande potencial na a reparação automatizada de ferramentas. [16]

2.2.7. Fusão em Leito de Pó

Neste processo as matérias-primas em pó (plásticos ou metais) são selectivamente fundidas por um laser de alta potência, como se observa na Figura 14.

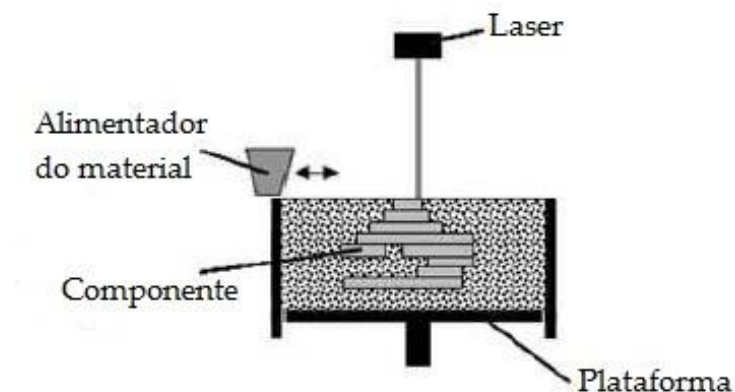


Figura 14 – Esquema do equipamento de Fusão em Leito de Pó [8]

Quando uma camada está concluída, a plataforma desloca-se na vertical, sendo coberta por nova camada de material e o processo é repetido até a sua conclusão. O material que não sofreu fusão serve como material de suporte. Neste processo encontram-se as tecnologias de fundição por feixe de electrões (EBM), sinterização selectiva por laser (SLS), sinterização térmica (SHS) e sinterização directa de metais por laser (DMLS).

"A fusão em leito de pó pode processar uma grande variedade de materiais, em contraste com muitos outros processos de fabrico por adição.", "A precisão e o acabamento das superfícies são normalmente inferiores aos processos baseados em líquidos. No entanto, a precisão e o acabamento superficial são fortemente influenciados pelas condições de funcionamento e pelo tamanho das partículas utilizadas" [6].

"O tempo total de construção pelo processo de fusão em leito de pó é maior do que aquele que se consegue por outros processos de fabricação por adição, devido ao pré-aquecimento e aos ciclos de arrefecimento envolvidos" [6].

Na Tabela 10 são enunciadas as vantagens e desvantagens presentes nas várias tecnologias envolvidas.

Tabela 10 – Vantagens e Desvantagens no processo de fusão em leito de pó

Tecnologia	Matéria-prima	Vantagens	Desvantagens
EBM	Titânio Cobalto Crómio	Velocidade Menor distorção Menor material desperdiçado	Requer tratamentos posteriores Limpeza difícil do equipamento Cautela no manuseamento do Raio-X
SLS	Papel Plásticos Metais Vidros Cerâmicos Compósitos	Não requer material de suporte Alta resistência ao calor e químicos Alta velocidade	Precisão limitada pelo tamanho das partículas Grande rugosidade superficial
SHS	Termoplásticos	Menor custo que SLS Geometrias complexas Não requer material de suporte Fácil manuseamento	Nova tecnologia com poucos estudos conhecidos
DMLS	Aço Cobalto Crómio Ligas de Níquel	Componentes densos Geometrias intrincadas	Requer tratamentos posteriores Desaconselhável para peças grandes

As aplicações do processo por fusão em leito de pó encontram-se nas grandes indústrias, principalmente na indústria automóvel.

Optimização da produção na eficiência de refrigeração

Uma grande empresa fornecedora mundial de componentes para telemóveis e com uma elevada capacidade de produção localizada em Shenchen (China), Chennai (Índia) e Manaus (Brasil), quis otimizar a sua produção.

A sua produção era realizada por injeção de plástico em moldes metálicos e o transporte dos componentes produzidos era feito em leito fluidizado para garantir o seu rápido arrefecimento. O processo foi bastante aperfeiçoado e garante a maior eficiência possível em comparação com métodos actuais idênticos.

As especificações do equipamento são conhecidas e não existe possibilidade de aumentar a velocidade da produção, devido às características da matéria-prima. No entanto, e como os ganhos de eficiência são uma necessidade quando a competição é global, o elemento-chave do processo de produção que se optou por melhorar foi a refrigeração.

Nos equipamentos de produção existem canais responsáveis pela dissipação do calor que se situam em volta das cavidades dos moldes.

Nos métodos de produção tradicionais, a flexibilidade na concepção do sistema de arrefecimento é muito limitada, não sendo possível produzir curvas e outras formas complexas para evitar a perfuração e conseqüente reutilização dos moldes. A mudança do material dos moldes não era uma opção, pelo que se decidiu procurar novas alternativas para a optimização do sistema de arrefecimento.

A solução encontrada foi a de situar os canais de refrigeração mais próximo das cavidades para tornar o arrefecimento mais rápido. Para implementar a solução, a empresa adquiriu equipamentos com tecnologia de sinterização directa de metais por laser para fabricar novos moldes. A mudança foi bem-sucedida, o que resultou na melhoria pretendida.

Com efeito, o tempo necessário para o arrefecimento foi reduzido de 14 segundos para apenas 8 segundos para cada ciclo de produção. A empresa foi capaz de aumentar a sua produção mensal em 56000 unidades, sem ter que fazer outros ajustes. Além disso, a taxa de rejeição caiu de 2% para 1,4%, o que se traduziu em importante redução de custos e de impacto ambiental do processo de produção. [17]

2.3. Visão Global da Manufatura por Adição

A inovação e a capacidade de produção são determinantes na criação da riqueza de qualquer nação, de forma a se obter produtos de elevado valor acrescentado e capazes de competir globalmente.

A actual tendência da economia global é a da fabricação de produtos personalizados muito mais rapidamente do que no passado, mas a expectativa de rápida introdução de novos produtos no mercado, originou vários insucessos empresariais. A fabricação por adição permite aos produtores ultrapassarem muitos dos problemas presentes na fabricação tradicional através do encurtamento do ciclo de projecto e de produção.

"A impressão 3D muda a forma de cálculo da produção através da optimização para pequenos lotes e grandes variedades de componentes, sendo a personalização uma das principais vantagens" [4].

O crescimento acentuado da manufatura por adição é resultado da sua flexibilidade. Como não existe necessidade de mudança de ferramenta para construção, isto traduz-se na redução do ciclo de produção e no aumento da variedade de componentes que é possível produzir. A indústria da manufatura por adição inclui equipamentos, matérias-primas e serviços. O crescimento global deste meio de produção continua em expansão, como se observa nos valores estatísticos no relatório Wohlers de 2014.

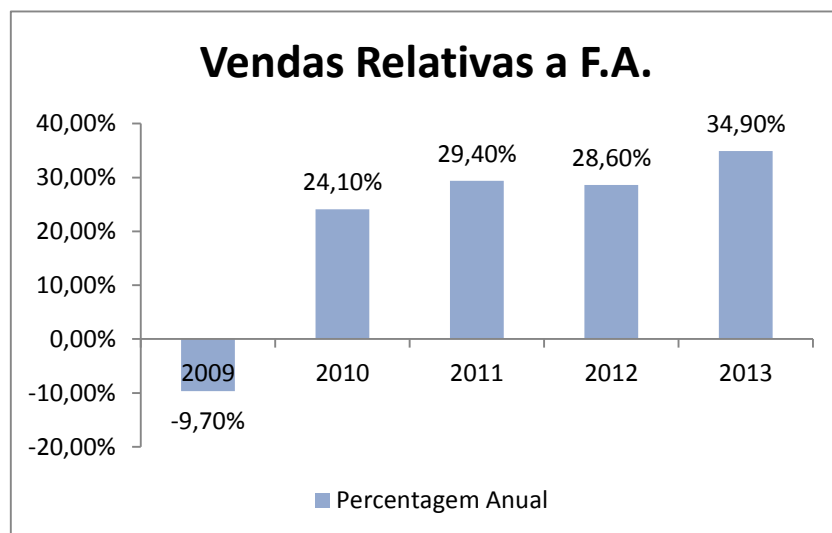


Figura 15 – Vendas Relativas a F.A. [7]

A Figura 15 mostra que, desde 2010, ano em que as patentes relativas às tecnologias por fabrico por adição começaram a caducar, verificou-se um

aumento acentuado nas vendas relativas a esses meios de produção. Outra característica observada na Figura 15 é o crescimento acentuado, mesmo com a crise mundial entre 2011 e 2012, cuja quebra nas vendas foi inferior a 1%.

Outro aspecto importante é o espaço aberto a novas empresas, sendo uma das características da manufatura por adição, a aproximação entre o produtor e o possível cliente.

A introdução destes equipamentos permitiu aumentar a velocidade de fabrico, a produtividade e a qualidade dos produtos.

A Figura 16 apresenta as percentagens das matérias-primas mais utilizadas na fabricação por adição, em 2013.

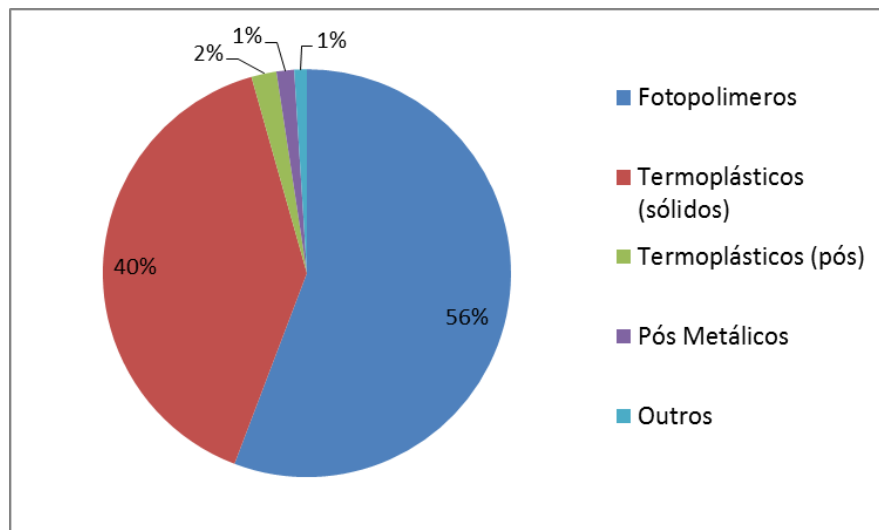


Figura 16 – Percentagens das matérias-primas utilizadas em 2013 [2]

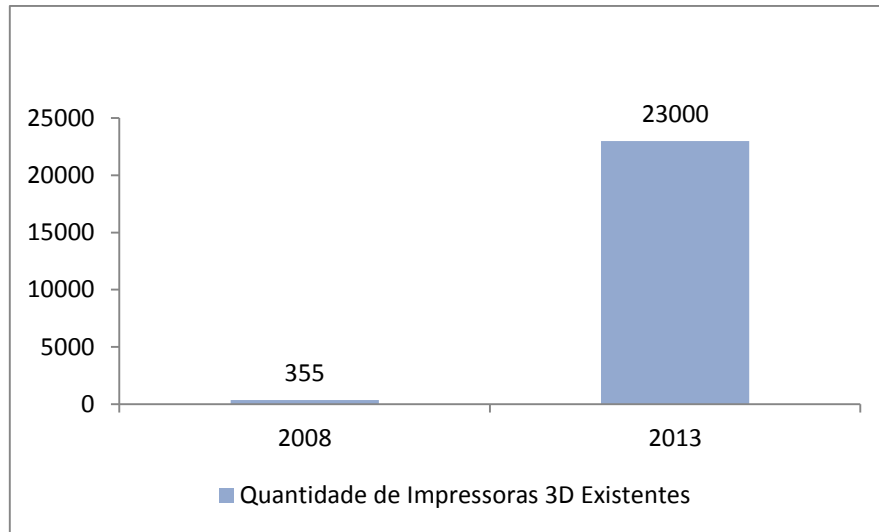


Figura 17 – Equipamentos Disponíveis no Mercado [7]

A Figura 17 mostra que a quantidade de equipamentos comercialmente disponíveis aumentou cerca de 6478% entre o ano de 2008 e 2013, traduzindo expressivamente o resultado da investigação, do desenvolvimento, do interesse das empresas e dos consumidores finais por estas tecnologias.

Nos últimos anos, a fabricação digital tem conseguido demonstrar a sua relevância como alternativa para uma produção mais eficiente, aperfeiçoando a cadeia de produção, dando maior liberdade na criação aos projectistas, reduzindo custos e abrindo caminho à inovação.

As vantagens da fabricação por adição para o mercado actual residem na:

- Criação de produtos cuja forma é otimizada para o seu ambiente ou aplicação.
- Fabricação de produtos perto dos clientes.
- Utilização de matérias-primas recicláveis.
- Redução do tempo desde o projecto até à entrega.
- Redução significativa de emissões de efeito de estufa.

A indústria actual gera elevados níveis de desperdício desde a concepção, passando pela fabricação, pela distribuição até chegar ao consumidor final. O bloqueamento da liberdade criativa na concepção, no fabrico e na distribuição são, em grande parte, consequências do fabrico tradicional.

Como a fabricação por adição não é afectada por muitos dos problemas tradicionais das cadeias de abastecimento, haverá reduções de custos

significativos e ocorrerá uma ligação quase directa entre a engenharia e o cliente final, como se pode verificar pela Figura 18.

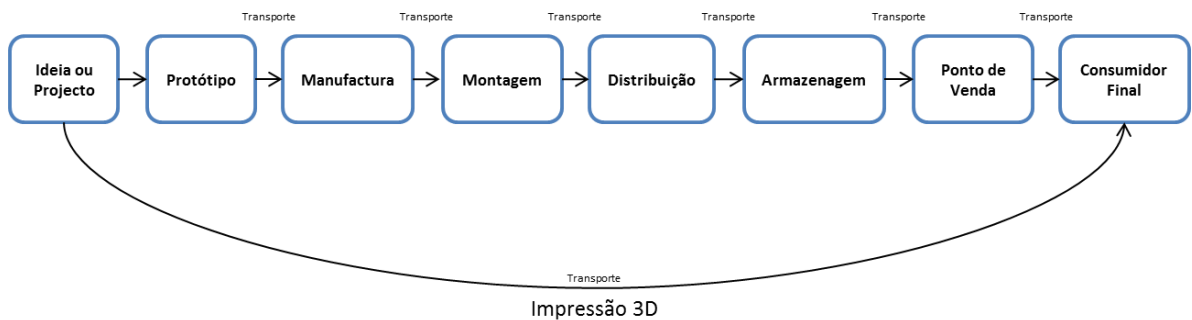


Figura 18 – Cadeia de produção convencional vs., por adição [6]

"Com a impressão 3D, o fabrico de componentes possibilita a redução dos custos e a alteração das cadeias de abastecimento tradicionais" [4].

A fabricação digital representa um novo caminho aos desafios actuais, como por exemplo, a aproximação dos equipamentos junto aos consumidores, a mais rápida entrega de produtos ao mercado, a melhoria na qualidade e a redução dos custos finais na manufatura, representando metas desejadas por qualquer indústria competitiva.

Quando se pretende uma nova peça, normalmente a fabricação tradicional procura no seu inventário, por produtos parecidos ou é requerido investimento em novas ferramentas de maquinação. O mesmo não ocorre com a fabricação digital visto o inventário desta tecnologia ser virtual e não necessitar de ferramentas de maquinação. As peças são fabricadas sob procura e se uma alteração for necessária, poderá ser implementada em tempo útil e incorporada antes do fabrico.

Nos últimos anos, a variedade das matérias-primas de fabrico por adição melhoraram significativamente em variedade, dimensão e disponibilidade, possibilitando o fabrico em simultâneo de peças com vários materiais e com excelente qualidade, sendo já utilizado em muitas indústrias de moldagem por injecção.

A Figura 19 apresenta a conclusão de um estudo da utilização dos componentes de fabrico por adição em 2014.

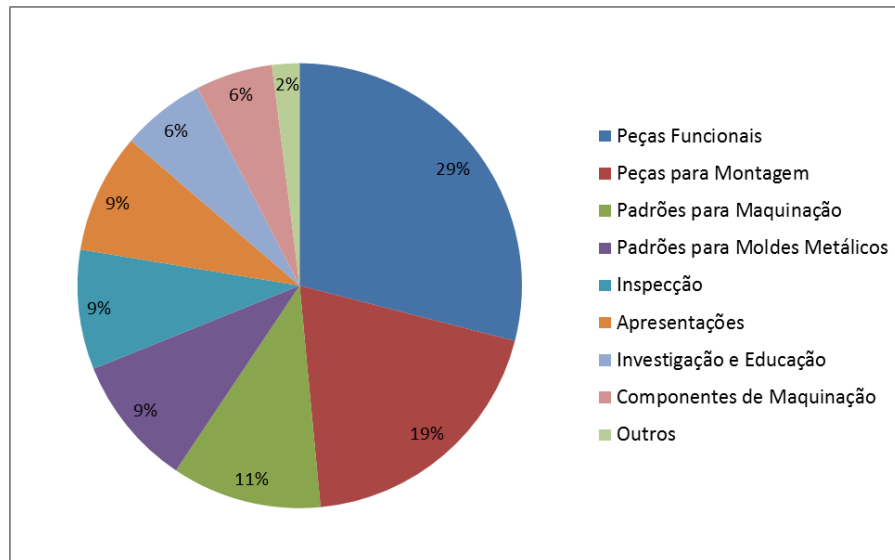


Figura 19 – Finalidade dos componentes produzidos por adição em 2014 [7]

Pela Figura 19 observa-se que existe uma tendência para fabrico de peças funcionais, sendo este um verdadeiro nicho onde esta tecnologia assenta.

3. FABRICO POR FUSÃO DE FILAMENTO

3.1. Introdução

O processo de fabrico por fusão de filamento funciona com um filamento termoplástico que passa por um ejetor de extrusão que controla a velocidade de deposição e a temperatura de funcionamento. O ejetor é aquecido de forma a derreter o material e pode deslocar-se na horizontal por um mecanismo numericamente controlado. O objecto é criado por fusão, camada por camada e o material endurece imediatamente após a extrusão do ejetor.

A fabricação por fusão de filamento (FFF) é actualmente um dos principais processos de fabricação rápida para produzir protótipos funcionais em termoplásticos, tais como ABS, PLA, PC, PPSF e outros, directamente a partir de dados CAD. Os objectos produzidos por FFF são duráveis, resistentes ao calor, à humidade e ao ataque de muitos produtos químicos, possuindo também uma boa resistência mecânica.

Existem muitas indústrias onde esta forma de fabrico consegue ser uma verdadeira alternativa à fabricação convencional, principalmente quando é necessário um alto rácio resistência-peso, complexidade, personalização, melhorias de última hora e produções em pequenas quantidades, devido ao seu rendimento e eficiência.

Todas as impressoras 3D pessoais partilham muitas semelhanças no seu modo de funcionamento, embora cada uma possa operar de forma um pouco diferente. O deslocamento tridimensional pode ser efectuado pela plataforma de impressão ou pelo ejetor. Os motores utilizados são de pequenas dimensões e de alta precisão.

A extrusão é um processo de deformação plástica, onde a matéria é submetida a pressões e a temperaturas elevadas, sendo forçado a passar por um orifício (0,35 mm ou 0,5 mm de diâmetro), de modo a reduzir a sua secção, enquanto o equipamento produz o objecto, camada por camada. As camadas sobrepostas unem-se ao arrefecer, formando um bloco sólido. A temperatura de extrusão depende do tipo de material utilizado. É actualmente a tecnologia por adição mais utilizada, devido ao seu custo, à facilidade de construção, à acessibilidade e à segurança no uso.

3.2. Leapfrog – Creatr14

Em 2012, a empresa Leapfrog lançou o seu modelo Creatr14 no mercado profissional. O equipamento é indicado principalmente para engenheiros, professores e arquitectos, devido a sua versatilidade e qualidade de impressão.

A Creatr14 (ver Figura 20) incorpora dois ejectores que possibilitam a produção de componentes com dois materiais, podendo um dos materiais servir de suporte. A velocidade de deposição é ajustável entre 3,8 e 80 mm/s. Inclui dispositivos de controlo para manter o equilíbrio e a calibração da plataforma de impressão e tem grande volume de impressão. O seu exterior é feito em alumínio, o que garante que a precisão não seja grandemente afectada por variações de temperatura e pelo desgaste do equipamento.

A família Creatr consiste na Creatr HS, Creatr 14 e Creatr XL, sendo o volume de impressão a diferença mais notória entre os diferentes modelos.

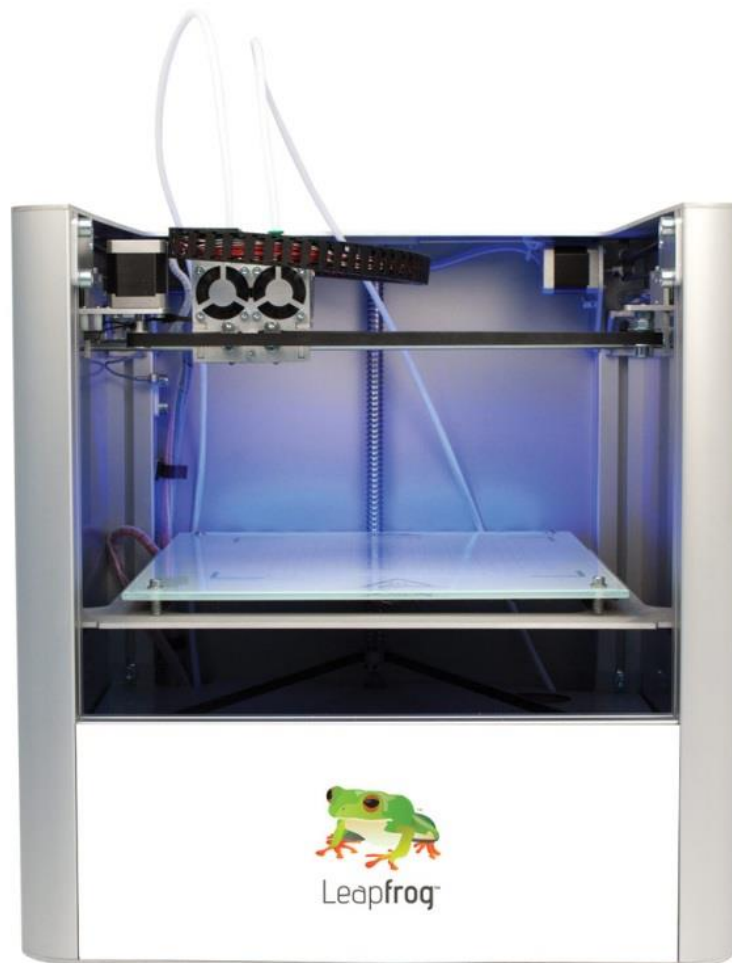


Figura 20 – Equipamento Leapfrog Creatr14

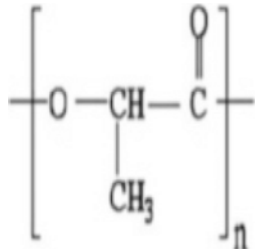
Na Tabela 11 são apresentadas as especificações técnicas da impressora Creatr14.

Tabela 11 – Especificações da impressora 3D, Leapfrog Creatr14

DIMENSÕES	
Dimensões da impressora	600*500*500 mm
Espessura de camada	0.05 – 0.35 mm
Plataforma de construção	Com controlo de aquecimento
Extrusão dupla	Opcional
Motores	Passo angular de 1,8° Micro passo de 1/16
Material da Impressora	Em liga de Alumínio
CAPACIDADE DE CONSTRUÇÃO	
Com Ejector Único	230*270*230 mm
Com Ejector Duplo	200*270*200 mm
Precisão de Posição	X-Y: 16,9 µm; Z: 10,0 µm
Tamanho do Ejector	0.35 mm
Velocidade de Impressão	3.8 – 80 mm/s
Velocidade de Deslocamento	30 – 350 mm/s
Diâmetro Nominal do Filamento	1.75 mm
Diâmetro Nominal do Ejector	0.35 mm (0.5 mm optional)
APLICAÇÃO	
Formatos	STL, G-code
Sistemas Operativos	Windows, Mac OS X, Linux
CONSUMOS	
Tensão e Frequência	100 – 240 V e 50 – 60 Hz
Temperatura do Ejector	<i>ambiente</i> – 275°C
Conectividade	Ligação em série
Temperatura de funcionamento da plataforma de impressão	<i>ambiente</i> – 95°C

Utiliza-se o ácido poliláctico (PLA) como matéria-prima, cujas propriedades se indicam na Tabela 12.

Tabela 12 – Características do ácido poliláctico PLA

FILAMENTOS	
<p>O ácido poliláctico (PLA) é um termoplástico com origem no amido extraído de plantas como o milho e o trigo, sendo por isso biodegradável. Não liberta odores desagradáveis, está disponível na forma de filamento com diferentes diâmetros e em grande variedade de cores, sendo razoavelmente acessível. O PLA não enrola tão facilmente como o ABS e pode ser usado em impressoras sem plataforma aquecida. O seu ponto de fusão situa-se no intervalo 180 - 210°C, isto é, mais baixo do que o do ABS. Isto significa que os componentes com ele fabricados não devem ser expostos directamente à luz solar sem um tratamento prévio adequado. Os benefícios do uso de termoplásticos como o PLA incluem a segurança no seu manuseamento.</p>	
Estrutura molecular	
Tensão de cedência (MPa)	53
Tensão de ruptura (MPa)	60
Módulo de Young (GPa)	3,5
Extensão à ruptura (%)	6,0
Peso específico, (g/cm ³)	1,25
Teste de impacto Izod (J/m)	0,33
Resistência à flexão (MPa)	83
Módulo de flexão (GPa)	3,8
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,13

A aplicação informática utilizada pela impressora 3D chama-se Simplify3D, controla o funcionamento dos equipamentos Leapfrog e permite alterações de última hora sem ser necessário recorrer ao uso do programa de modelação 3D. A Simplify3D permite importar a geometria do componente a fabricar, eliminar pontos duplicados e modificar as opções de impressão. Permite também otimizar a impressão de objectos múltiplos, divide o projecto em camadas e gerar instruções de execução em formato G-Code.

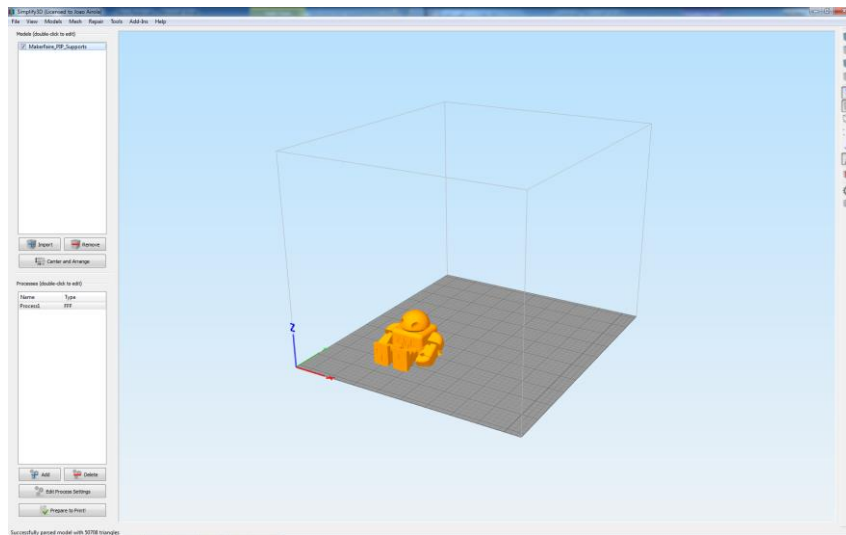


Figura 21 – Janela inicial da aplicação *Simplify3D*

Na janela inicial, Figura 21, faz-se a visualização e a verificação do modelo, o seu manuseamento e as modificações que forem necessárias, tanto no modelo como nas opções de impressão.

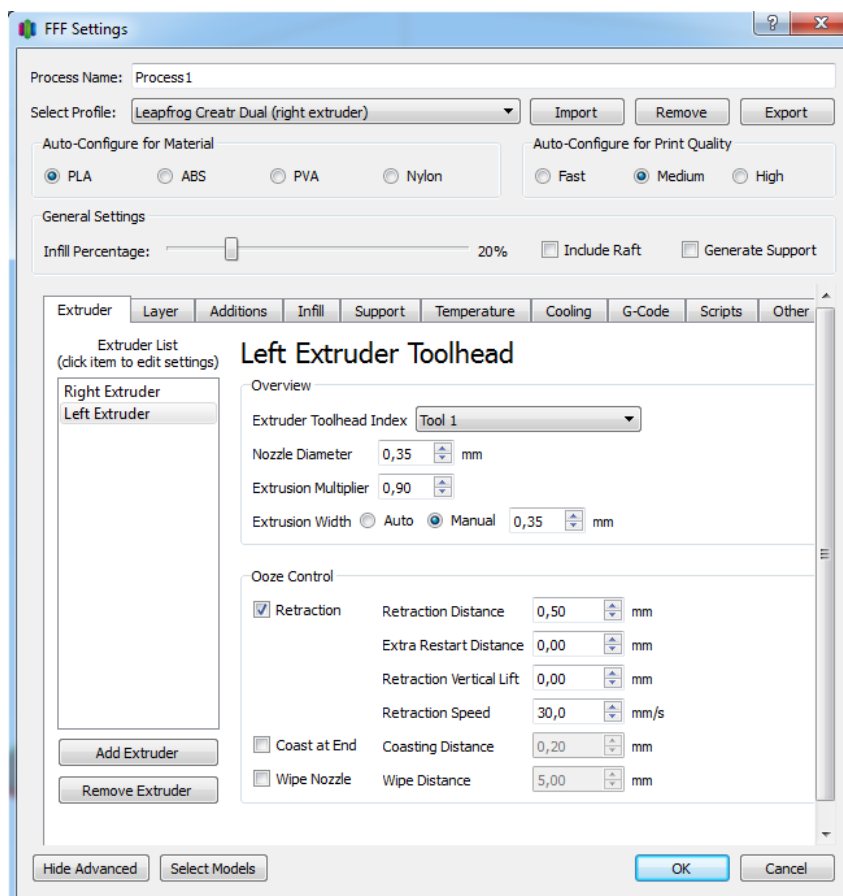


Figura 22 – Janela de opções de impressão

Na janela representada na Figura 22, podem-se realizar várias modificações, com especial realce para a configuração automática da qualidade de impressão (Baixa, Normal e Alta qualidade).

A impressão de alta qualidade é necessária quando se pretendem resultados com grande exactidão e precisão. Isso significa uma espessura de camada entre 0,1 e 0,15 mm e a obtenção de superfícies com pequena ondulação. Em comparação com a impressão de baixa qualidade, as camadas são duas vezes mais finas, o que resulta no dobro dos movimentos da cabeça de impressão e, portanto, em duas vezes mais tempo para fabricar os componentes.

A impressão de baixa qualidade é usada quando se pretende fabricar protótipos apenas para verificar dimensões ou para a visualização do produto final. A impressão de baixa qualidade produz camadas com 0,35 mm de espessura e as superfícies dos componentes têm maior ondulação. No entanto, ocorre um encurtamento do tempo de fabrico.

Quanto menor for a espessura das camadas depositadas, tanto melhor será o acabamento das superfícies produzidas, mas mais longo será o tempo de fabrico dos componentes.

Por outro lado, menores espessuras de camada dão origem a menores variações geométricas entre as camadas, o que se traduz na produção de superfícies verticais com melhor acabamento.

A exactidão pode ser separada em duas partes: horizontal (no plano X-Y) e vertical (na direcção Z). A exactidão horizontal é designada de "*feature size*" e refere-se ao menor movimento que é possível executar no plano horizontal. A exactidão vertical é designada de "*layer thickness*" e refere-se ao menor movimento possível da plataforma de impressão, isto é, à espessura mínima da camada produzida. [18]

O sistema de movimento que é usado pelo equipamento de fabrico por adição determina a precisão e a velocidade de fabrico, mas também o tipo e a frequência das operações de manutenção que são necessárias ao longo da sua vida útil.

Por norma os equipamentos de fabrico por fusão de filamento utilizam coordenadas cartesianas como modo de transmissão de informação. Estes equipamentos movem-se em três direcções lineares (x, y, z). Esta movimentação linear é garantida por motores de passo, sendo a informação obtida para os três eixos por controlo numérico. [19]

Motor de passo é um transdutor electromagnético incremental que permite uma conversão de impulsos eléctricos em deslocamentos. A cada impulso de alimentação corresponde a um deslocamento elementar (rotativo ou linear), designado por passo. A rotação do eixo do motor é caracterizada por um ângulo incremental de passo específico para cada pulso de excitação. Este ângulo incremental é repetido a cada pulso gerado por um circuito excitador apropriado. O erro devido ao ângulo incremental é geralmente inferior a 5%, sendo não cumulativo. O resultado é a alta precisão, sendo que, para cada pulso tem-se o movimento de um único ângulo incremental de passo, o que possibilita elevado controlo de posição, velocidade e direcção. [20]

3.3. Controlo Numérico

O programa Simplify3D utiliza o comando numérico para controlar de forma automática os movimentos de posicionamento do ejetor e da plataforma.

A Figura 23 exemplifica algumas instruções de entrada e saída do equipamento utilizado.

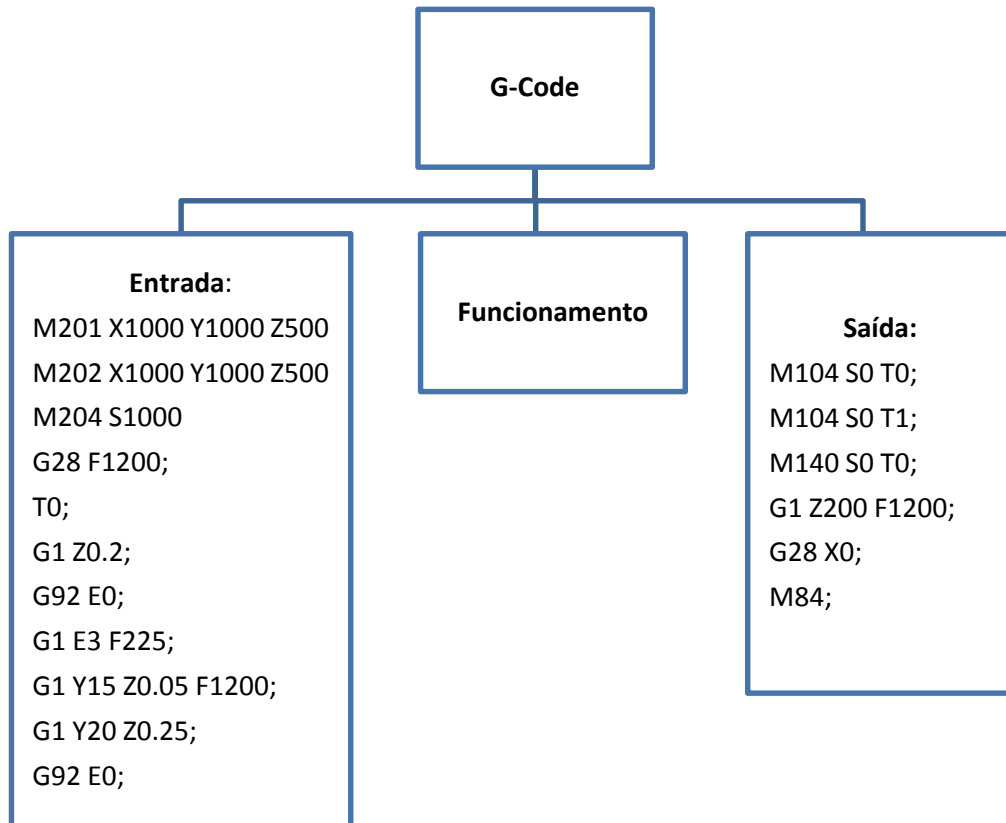


Figura 23 – Instruções de acção do equipamento

Instrução de acção:

Funções Auxiliares – M (Define as paragens e arranques; Mudança da ferramenta; etc.)

Funções Preparatórias – G (G00 a G99) (Define o tipo de trajectória; As correcções das ferramentas as unidades do sistema; Os ciclos automáticos; etc.)

Velocidade de ejeção – F (mm/min ou mm/s)

Velocidade de avanço da ferramenta – S (mm/min ou mm/s)

Número da ferramenta – T (T0 ejetor a direito, T1 ejetor a esquerdo)

As vantagens do controlo numérico computadorizado são:

- Controlo dos movimentos de fabricação de peças com geometrias complexas, com melhores tolerâncias dimensionais e acabamento.
- Maior repetibilidade das características do produto.
- Redução de tarefas repetitivas.
- Flexibilidade na produção de pequenos lotes e grande variedade de produtos, tudo isto com ajustes rápidos.

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

A concepção começa pela planificação de uma ideia, que no caso da fabricação por adição é realizada através da modelação tridimensional. A produção é um processo de transformação da matéria-prima para dar forma sólida ao componente. O processo de inspecção consiste em medições directas e indirectas do componente, com vista à comparação das características finais com as características planeadas.

A qualidade de um objecto fabricado por adição pode ser analisada através de uma combinação de verificações e comparações das características funcionais obtidas, tais como: a precisão dimensional e geométrica, a tolerância esperada, a rugosidade superficial, o controlo da deposição, a dinâmica dos movimentos, as propriedades do material e o algoritmo de produção, entre outras. Estes factores estão inter-relacionados, o que torna difícil a identificação de cada factor para a qualidade de fabrico final. No entanto, é possível criar geometrias simples para a análise de características específicas da qualidade que possibilitam a avaliação dos efeitos de cada factor, mantendo todos os outros factores constantes.

Nesta dissertação analisa-se, para cada exemplar produzido, um aspecto da qualidade de impressão, sendo o processo optimizado para o consumo mínimo de matéria-prima. Outros aspectos a considerar são a garantia da qualidade e a variação da velocidade de deposição.

Na Tabela 13 estão identificados os valores, quase constantes, do funcionamento do equipamento Creatr14 utilizado neste estudo.

Tabela 13 – Valores esperados e registados de funcionamento

Constantes de Funcionamento	Valores
Temperatura ambiente	17,5 °C
Temperatura da plataforma de impressão	50 °C
Tempo de aquecimento da plataforma de impressão	≈ 11 <i>minutos</i>
Temperatura de funcionamento do ejetor	190 °C
Tempo de aquecimento do ejetor	≈ 14 <i>minutos</i>
Preenchimento por secção do material	30 %
Material	PLA transparente

4.2. Medição Directa

Uma grandeza é medida por método directo quando esta for realizada por meio de uma comparação directa. O micrómetro digital é o aparelho de medição mais utilizado nesta dissertação. Trata-se de um instrumento metrológico capaz de aferir dimensões lineares (tais como espessura, altura, largura, profundidade e diâmetro). Encontra vasta aplicação na indústria mecânica, em diversos contextos de medição e ensaios não-destrutivos.

A Figura 24 apresenta o micrómetro digital utilizado neste trabalho.



Figura 24 – Andoer 0-25mm, Micrómetro Digital

A Tabela 14 apresenta as características do micrómetro digital utilizado.

Tabela 14 – Características do micrómetro digital

Micrómetro Digital	
Escala de Medição	0 – 25 mm
Exactidão	0.001 mm
Precisão	0.002 mm

4.3. Medidas Indirectas

Uma grandeza é medida por método indirecto quando esta é realizada pela utilização de valores de convergência, isto é, determina-se a dimensão desejada e relaciona-se com a grandeza requerida ou pretendida.

O medidor de perfil de superfície é usado para registar a altura de pico-a-vale do perfil superficial. Tal como o micrómetro, é um aparelho de medição não-destrutiva.

A Figura 25 apresenta o medidor de perfil utilizado neste trabalho.



Figura 25 – SRT-6223 Digital Surface Profile Gauge Roughness Tester

Para a avaliação da rugosidade superficial dos componentes, realizam-se nove ensaios para cada medição. A Tabela 15 apresenta as principais características do medidor de perfil.

Tabela 15 – Especificações do SRT6223

SRT – 6223	
Escala de Medição	0 – 800 μm
Exactidão	$\pm 5\%$ ou $\pm 5 \mu m$
Precisão	1 μm

4.4. Incerteza nas Medições

A medição é o processo experimental de obtenção de um ou mais valores que podem ser atribuídos a uma grandeza. Em trabalhos experimentais é praticamente inevitável a ocorrência de erros. O valor medido deve então incluir a incerteza associada, bem como as unidades correspondentes.

O erro de medição é a diferença entre o valor medido (VM), e um valor de referência (VR) de uma grandeza, exemplificado pela equação 4.1:

$$\varepsilon = VM - VR \quad eq. 4.1$$

O conceito de “erro de medição” é utilizado quando existe um único valor de referência, o que ocorre se a calibração é efectuada por meio de um padrão de medição, cuja incerteza da dimensão é desprezável.

A medição efectuada parte da distribuição estatística dos valores que resultam de conjuntos de medições e pode ser caracterizada pelas seguintes equações:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad eq. 4.2$$

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad eq. 4.3$$

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} \quad eq. 4.4$$

Onde:

- \bar{x} é a média aritmética dos valores individuais observados, x_j ($j = 1, 2, \dots, n$).
- n , é o número de observações independentes, n , ($n > 1$).
- $s(x)$ é o desvio padrão.
- $s^2(x)$ é a variância experimental da média.

4.5. Acabamento Superficial

O termo “acabamento superficial” refere-se às irregularidades (picos e vales) produzidas na superfície dos componentes durante o seu processo de fabrico. Por convenção, a topografia da superfície de uma peça é composta por duas componentes: rugosidade e ondulação.

A rugosidade é o conjunto de irregularidades superficiais provocadas num componente pelo processo de fabrico, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície.

A ondulação consiste em irregularidades superficiais que surgem de forma mais espaçada e que são frequentemente causadas por vibrações que ocorrem durante o processo de fabricação.

O acabamento de superfície de qualquer peça deve ser adequado ao tipo de função a que se destina, e deve ser tanto melhor quanto maior forem as exigências na qualidade superficial da peça final. [21]

4.5.1 Rugosidade média aritmética (Ra)

Ra é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, ao longo do percurso de medição (l_m). Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um rectângulo, cuja área é igual à soma das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição (l_m), como se pode observar na Figura 26.

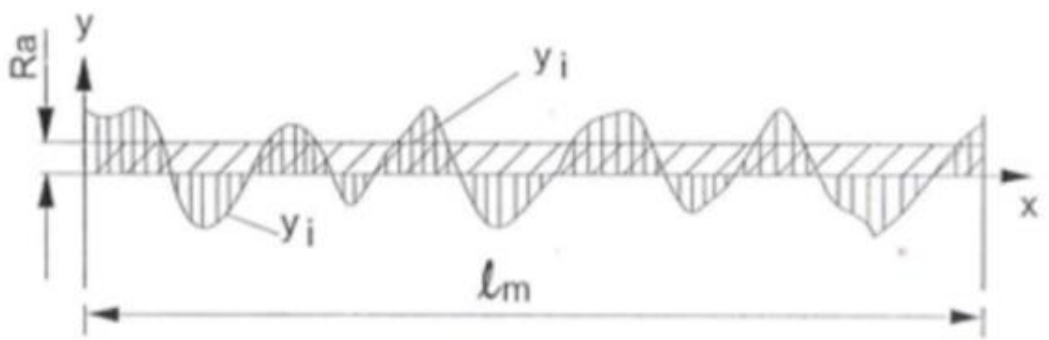


Figura 26 – Rugosidade média, (Ra).

$$Ra = 1:l \int_0^l |f(x)| dx \quad \text{ou} \quad Ra = 1:n \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{eq. 4.6}$$

O valor de Ra costuma ser expresso em micrómetros (μm) e a resolução dos equipamentos utilizados na sua medição é geralmente de $0,01 \mu\text{m}$.

Em medições de rugosidade, o valor de Ra num comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não atípico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal defeito.

Como o valor de Ra não se define pela forma das irregularidades do perfil, poder-se-á obter o mesmo valor de Ra para superfícies maquinadas ou fabricadas através de processos diferentes.

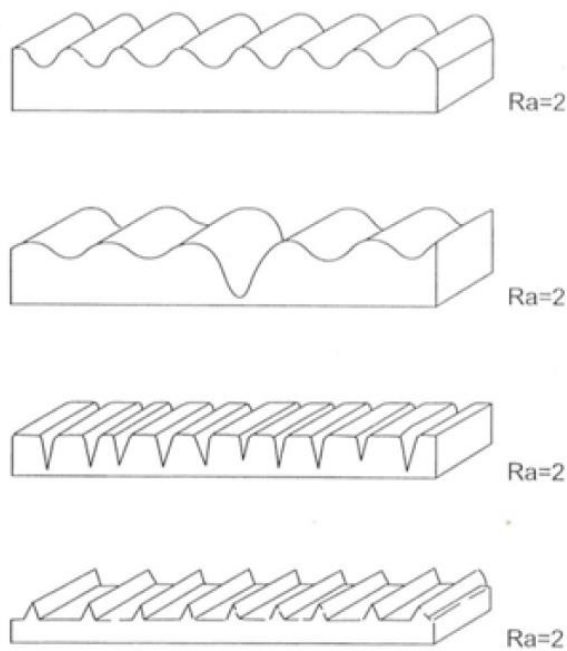


Figura 27 – Irregularidades superficiais com o mesmo valor de Ra .

A Figura 27 apresenta irregularidades superficiais diferentes, mas, com o mesmo valor de Ra . Nenhuma distinção é feita entre picos e vales e para alguns processos de fabricação onde há uma frequência alta de vales ou picos, como é o caso da sinterização, o parâmetro Ra não é adequado.

A Tabela 16 apresenta as designações das classes de rugosidade geralmente utilizadas na indústria mecânica, as quais se repartem em 12 grupos.

Tabela 16 – Classe de Rugosidade

Classe de Rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Rugosidade Ra (µm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

4.5.2. Rugosidade média (Rz)

A Rugosidade média (Rz) corresponde à média aritmética mínima de 5 valores de rugosidade parciais (Zi), definindo-se por rugosidade parcial (Zi) a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média do comprimento de amostragem, como mostra a Figura 28.

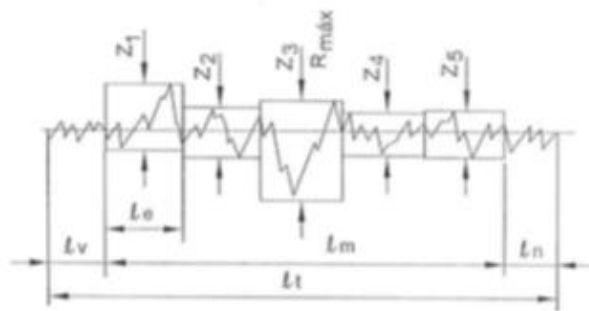


Figura 28 – Rugosidade média, (Rz)

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \text{ eq. 4.7}$$

As vantagens da utilização do parâmetro Rz encontram-se nos casos em que valores isolados não influenciam a função da componente.

4.6. Distribuição Gráfica do Tempo de Fabrico

4.6.1. Baixa Qualidade

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados de simulações do tempo de fabrico de baixa qualidade em relação à velocidade de deposição e ao volume do componente, as quais foram obtidas por recurso à aplicação Simplify3D. Os resultados obtidos estão representados na Figura 29. As características de produção encontram-se em anexo.

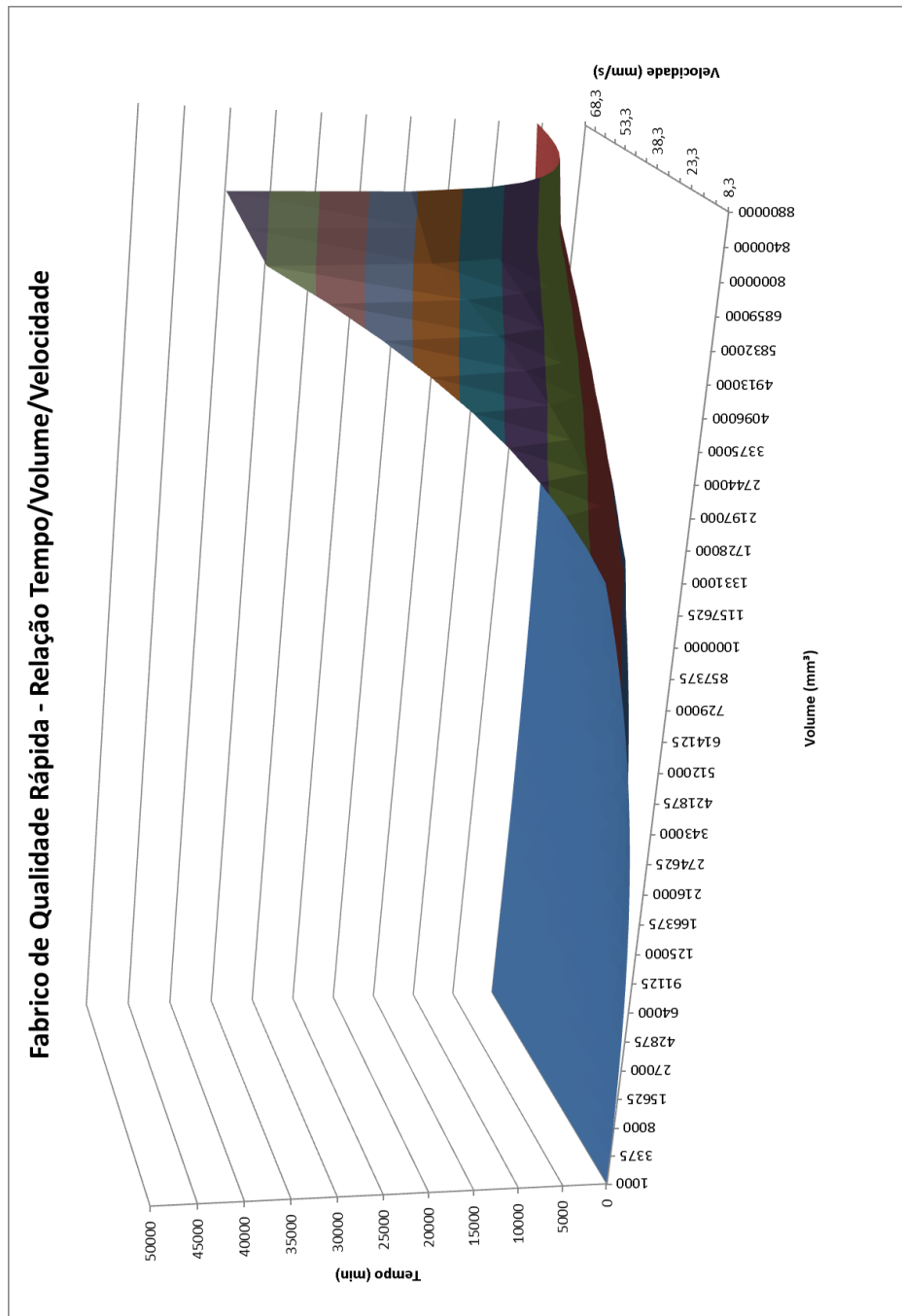


Figura 29 – Fabrico de baixa qualidade

4.6.2. Média Qualidade

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados de simulações do tempo de fabrico de qualidade média em relação à velocidade de deposição e ao volume do componente, as quais foram obtidas por recurso à aplicação Simplify3D. Os resultados obtidos estão representados na Figura 30. As características de produção encontram-se em anexo.

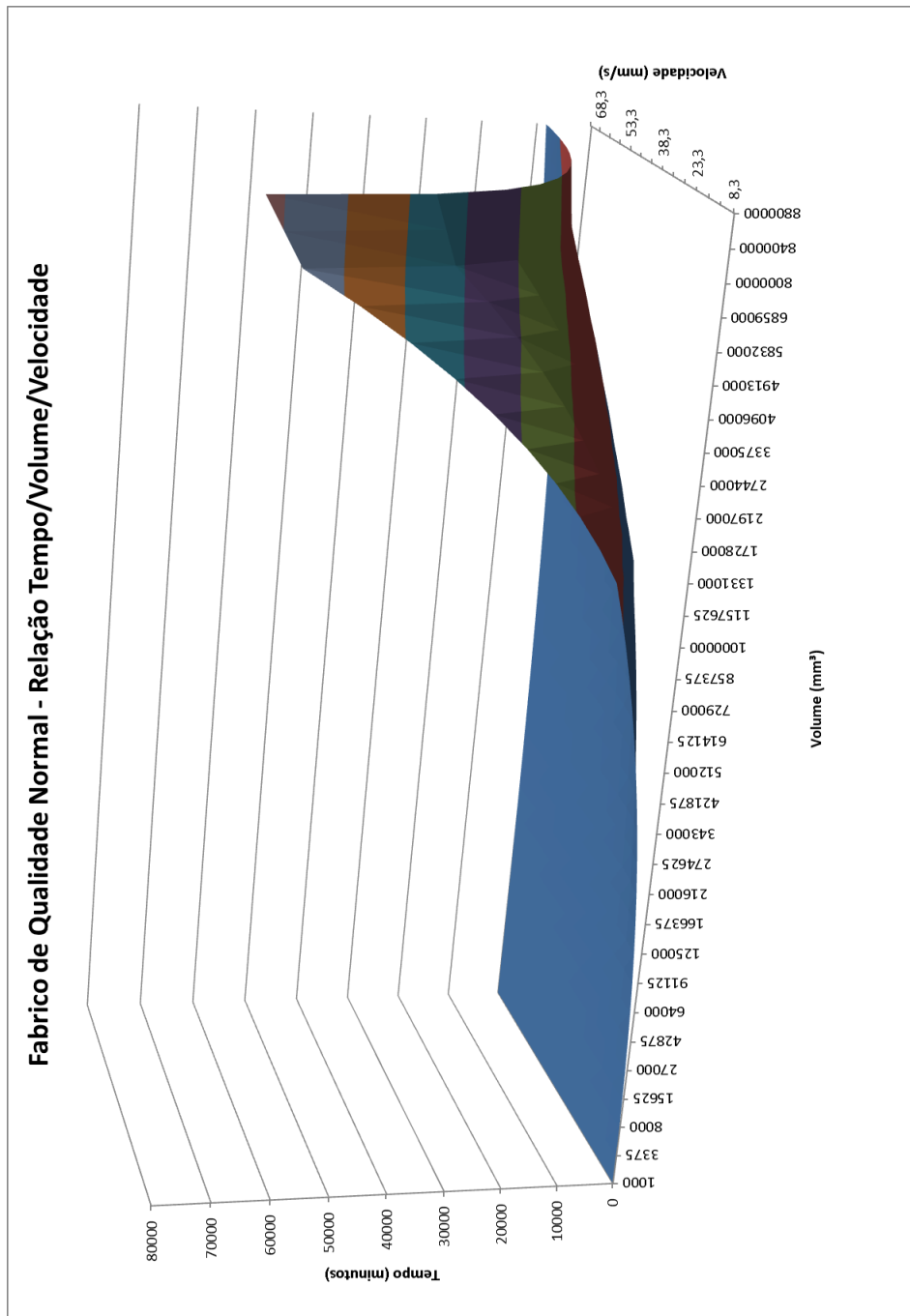


Figura 30 – Fabrico de média qualidade

4.6.3. Alta Qualidade

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados de simulações do tempo de fabrico de alta qualidade em relação à velocidade de deposição e ao volume do componente, as quais foram obtidas por recurso à aplicação Simplify3D. Os resultados obtidos estão representados na Figura 31. As características de produção encontram-se em anexo.

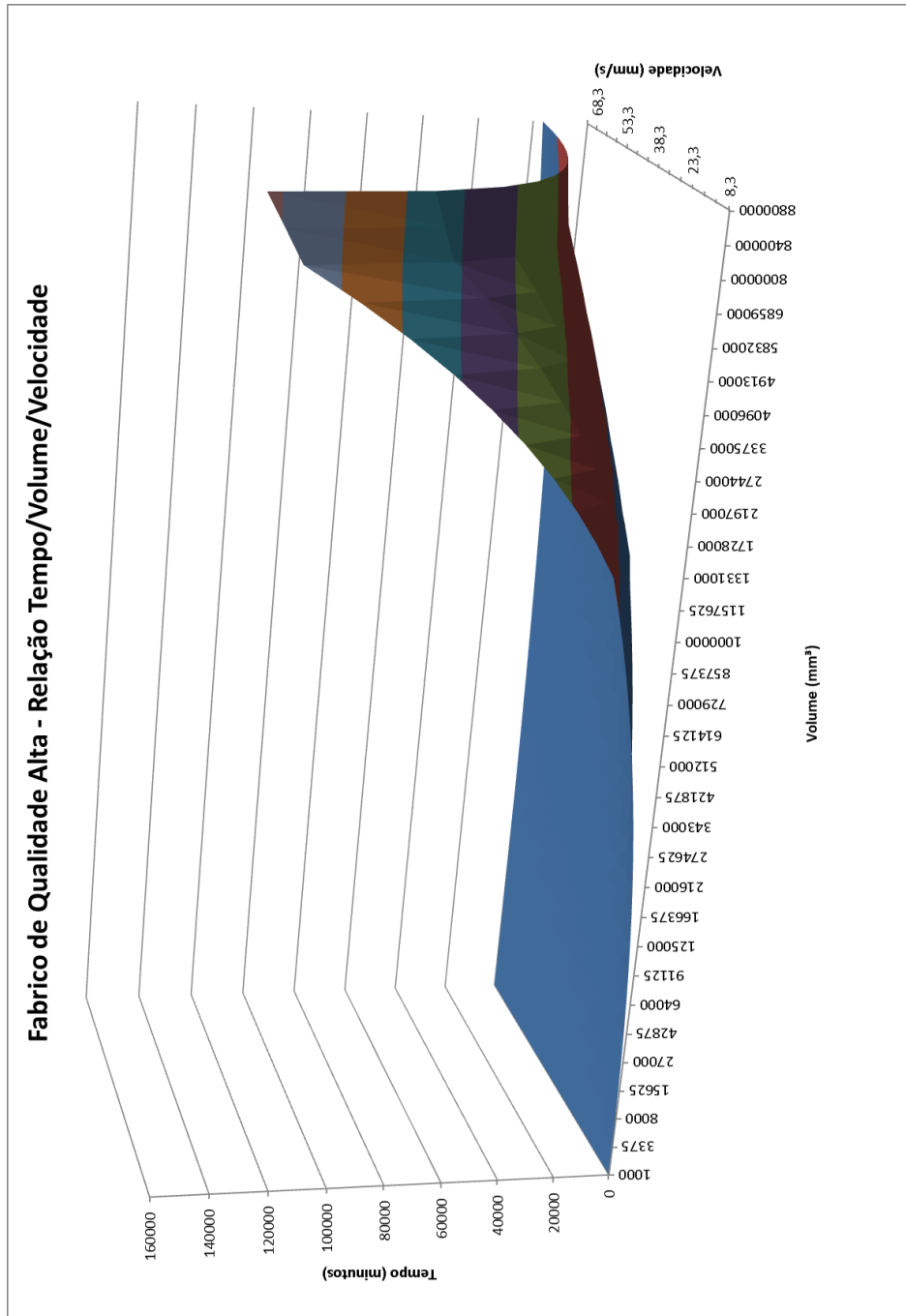


Figura 31 – Fabrico de alta qualidade

4.7. Precisão Geométrica

A precisão geométrica é a menor variação sentida nas dimensões esperadas dos componentes.

A Tabela 17 apresenta as medições de 3 conjuntos de elementos simples (cubos), com 3 repetições cada e em velocidade de deposição mínima, média e máxima (identificadas pelas letras A, B e C), de forma a verificar a influência nos resultados.

Tabela 17 – Medições da Precisão

Exemplar	Tempo de construção (min.)	Velocidade de Fabrico (mm/s)	Dimensões Nominais (mm)	Dimensões Obtidas (mm)
A1	60	8,3	15*15*15	14,855*14,984*14,964
A2	60	8,3	15*15*15	14,838*14,942*15,004
A3	60	8,3	15*15*15	14,854*14,988*14,887
B1	20	38,8	15*15*15	14,782*14,949*14,95
B2	20	38,8	15*15*15	14,832*15,024*14,955
B3	20	38,8	15*15*15	14,712*14,925*14,932
C1	19	73,3	15*15*15	14,698*14,918*14,917
C2	19	73,3	15*15*15	14,726*14,908*14,945
C3	19	73,3	15*15*15	14,833*14,918*14,998

Na Tabela 18 apresentam-se a média e o desvio-padrão observados nos componentes elementares.

Tabela 18 – Médias e Desvios Padrão da Precisão

Exemplar	Velocidade de Fabrico (mm/s)	Dimensões Nominais (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
A	8,3	15*15*15	X = 14,849	0,008
			Y = 14,971	0,021
			Z = 14,952	0,048
B	38,3	15*15*15	X = 14,775	0,049
			Y = 14,966	0,042
			Z = 14,945	0,009
C	73,3	15*15*15	X = 14,752	0,058
			Y = 14,914	0,004
			Z = 14,953	0,003

4.8. Variação Mínima de Precisão no Eixo X

Neste subcapítulo apresenta-se a verificação da variação mínima de precisão no eixo X obtida (ver Tabela 19) quando é produzido um elemento cúbico de 15 mm de aresta, em 20 minutos e com velocidade de deposição de 32 mm/s.

Tabela 19 – Distribuição da variação mínima de precisão no eixo X

	Medida Nominal (mm)	Medida Obtida (mm)	Variação (mm)
G01	15,000	15,011	+ 0,001
G02	15,000	15,006	+ 0,002
G03	15,000	15,000	+ 0,003
G04	15,000	15,015	+ 0,004
G05	15,000	15,035	+ 0,005
G06	15,000	15,059	+ 0,006
G07	15,000	15,064	+ 0,007
G08	15,000	15,071	+ 0,008
G09	15,000	15,093	+ 0,009
G10	15,000	15,102	+ 0,010
G11	15,000	15,125	+ 0,011
G12	15,000	15,128	+ 0,012
G13	15,000	15,142	+ 0,013
G14	15,000	15,167	+ 0,014

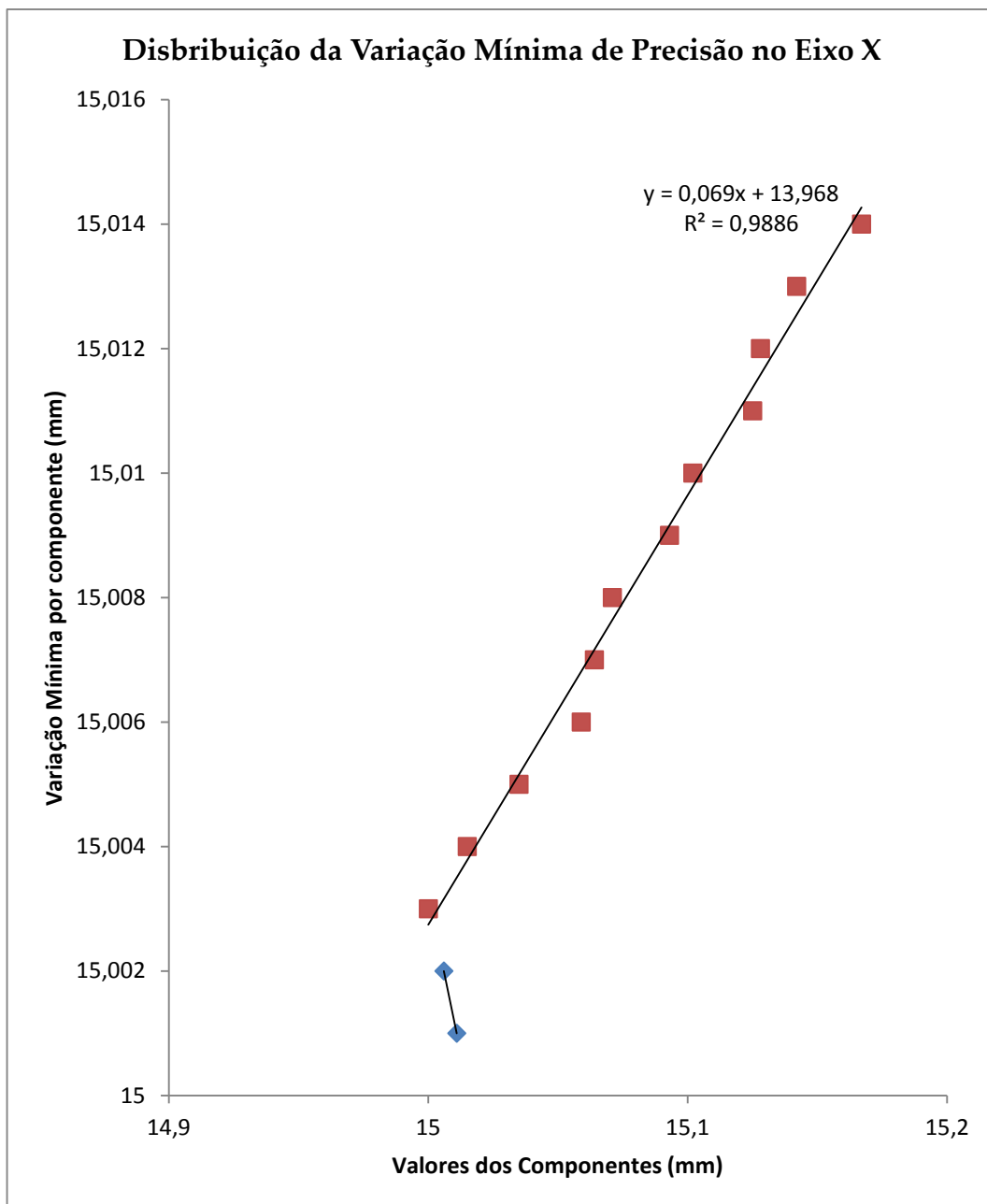


Figura 32 – Interpretação dos Valores da Precisão Geométrica no eixo X

A Figura 32 mostra um comportamento linear a partir de um aumento de 0,003 mm na medida do elemento produzido.

Na Tabela 20 apresentam-se os desvios entre a precisão esperada e a precisão obtida experimentalmente.

Tabela 20 – Valores de precisão experimental no eixo X

	Precisão Esperada (mm)	Precisão Obtida (mm)	Desvio (mm)
G03	0,016		-0,003
G04	0,016	0,014	0,011
G05	0,016	0,019	0,030
G06	0,016	0,023	0,053
G07	0,016	0,004	0,057
G08	0,016	0,006	0,063
G09	0,016	0,021	0,084
G10	0,016	0,008	0,092
G11	0,016	0,022	0,114
G12	0,016	0,002	0,116
G13	0,016	0,013	0,129
G14	0,016	0,024	0,153

O desvio resulta da diferença entre os valores medidos e os valores esperados.

O valor mínimo de precisão encontrada é de $14,18 \mu m$, valor que se encontra próximo dos $16,0 \mu m$ que representam o valor esperado, tal como anunciado pelo fabricante do equipamento.

4.9. Variação Mínima de Precisão no Eixo Z

Neste subcapítulo apresenta-se a verificação da variação mínima de precisão no eixo Z obtida nos componentes (ver Tabela 21), quando é produzido um elemento cúbico de 15 mm de aresta, em 20 minutos e com velocidade de deposição de 32 mm/s.

Tabela 21 – Distribuição da variação mínima de precisão no eixo Z

	Medida nominal (mm)	Medida obtida (mm)	Variação (mm)
G01	15,000	14,900	+ 0,001
G02	15,000	14,931	+ 0,002
G03	15,000	14,991	+ 0,003
G04	15,000	15,005	+ 0,004
G05	15,000	15,016	+ 0,005
G06	15,000	15,022	+ 0,006
G07	15,000	15,026	+ 0,007
G08	15,000	15,028	+ 0,008
G09	15,000	15,035	+ 0,009
G10	15,000	15,051	+ 0,010
G11	15,000	15,061	+ 0,011
G12	15,000	15,065	+ 0,012
G13	15,000	15,067	+ 0,013
G14	15,000	15,073	+ 0,014

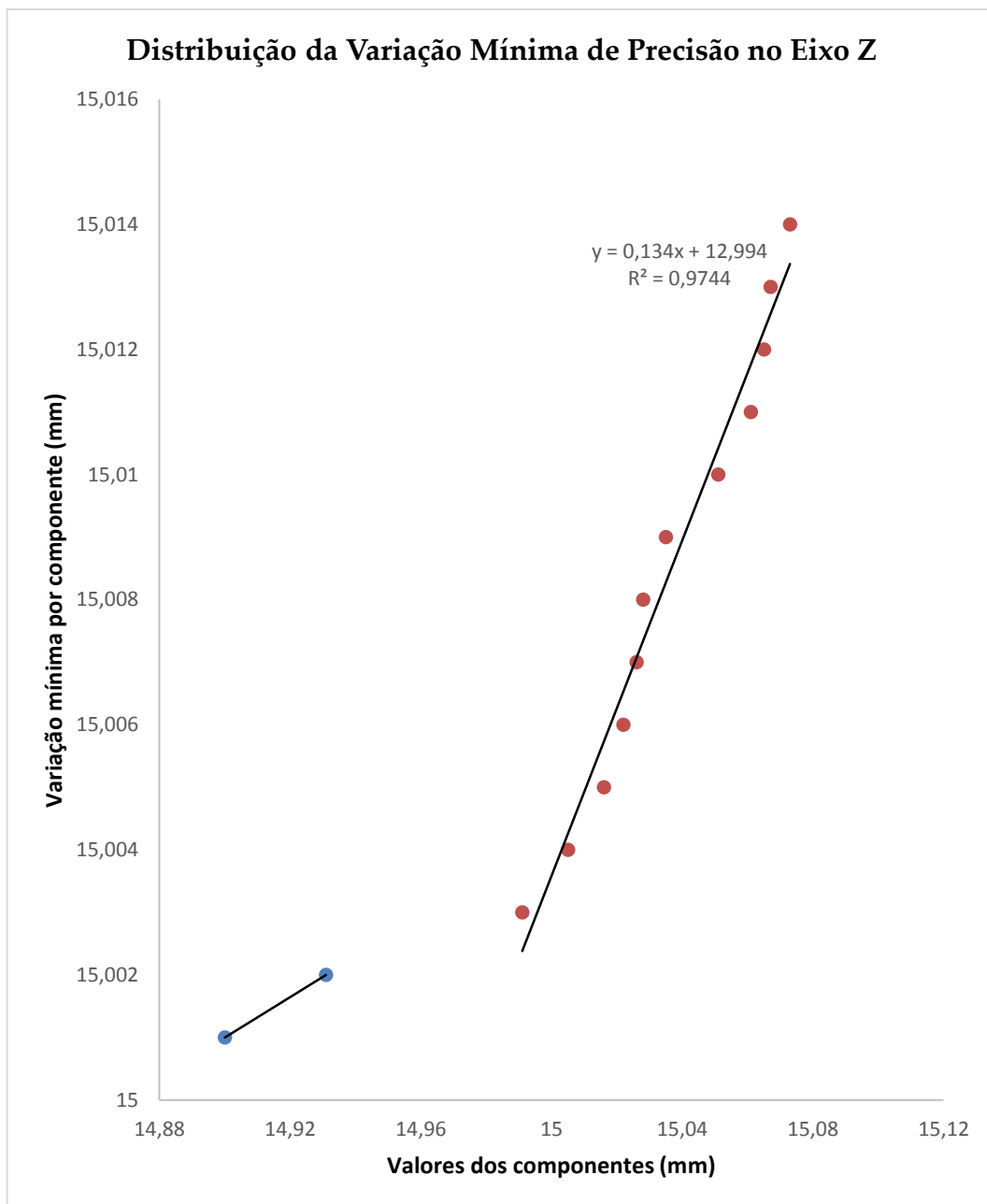


Figura 33 – Interpretação dos Valores da Precisão Geométrica no eixo Z

A Figura 33 mostra um comportamento linear a partir de um aumento de 0,003 mm na medida do elemento produzido.

Na Tabela 22 apresentam-se os desvios entre a precisão esperada e a precisão obtida experimentalmente.

Tabela 22 – Valores de precisão experimental no eixo Z

	Precisão Esperada (mm)	Precisão Obtida (mm)	Desvio (mm)
G03	0,016		-0,012
G04	0,016	0,013	0,001
G05	0,016	0,010	0,011
G06	0,016	0,005	0,016
G07	0,016	0,003	0,019
G08	0,016	0,001	0,020
G09	0,016	0,006	0,026
G10	0,016	0,015	0,041
G11	0,016	0,009	0,050
G12	0,016	0,003	0,053
G13	0,016	0,001	0,054
G14	0,016	0,005	0,059

O desvio resulta da diferença entre os valores medidos e os valores esperados para cada componente.

O valor mínimo de precisão encontrada é de 10,83 μm , valor esse que se encontra próximo dos 10,0 μm que representam o valor esperado, tal como anunciado pelo fabricante do equipamento.

4.10. Rugosidade

Os resultados recolhidos na medição da rugosidade superficial de um componente são afectados pelo equipamento metrológico utilizado. Por esta razão as sondas devem ser seleccionadas com base na resolução padrão considerada.

A Figura 34 mostra como duas sondas de contacto podem produzir medições diferentes.

As sondas de ponta esférica são as mais utilizadas na medição da rugosidade de superfícies de componentes de materiais plásticos. Uma característica importante destas sondas é o raio da ponta. Quanto menor for esse raio, tanto maior será a capacidade de detectar irregularidades. [11]

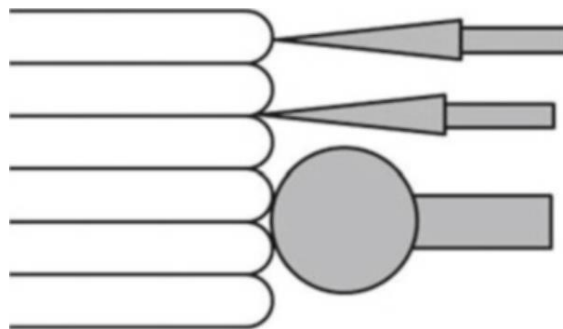


Figura 34 – Forma de sondas de contacto

Para a realização dessas medições fabricaram-se 14 elementos cúbicos com 15 mm de aresta (numerados de I a XIV), sendo a velocidade de deposição incrementada de 5 mm/s após a fabricação de cada cubo.

Foram efectuadas nove medições de rugosidade por componente ($n = 9$), as quais permitiram calcular os respectivos valores médios da rugosidade, assim como a sua regressão e o correspondente coeficiente de determinação (R^2).

O coeficiente de determinação, R^2 , é uma medida do ajustamento de um modelo estatístico generalizado em relação aos valores observados. Varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior for R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor se ajusta à amostra.

4.10.1. Rugosidade da Superfície Topo

Neste subcapítulo registam-se as medições da rugosidade média (em μm) nas superfícies de topo dos cubos, de modo a identificar respectivas tendências em função da variação da velocidade de deposição (em mm/s). Esses valores estão registados na Tabela 23 e ilustrados graficamente na Figura 35.

Tabela 23 – Rugosidade na superfície de topo

Componente	Velocidade de deposição (mm/s)	Rugosidade Topo (μm)
I	8,3	4,76
II	13,3	5,56
III	18,3	8,96
IV	23,3	11,18
V	28,3	11,98
VI	33,3	15,08
VII	38,3	20,20
VIII	43,3	21,20
IX	53,3	21,60
X	58,3	22,40
XI	63,3	22,80
XII	68,3	24,80
XIII	73,3	26,20
XIV	78,3	31,80

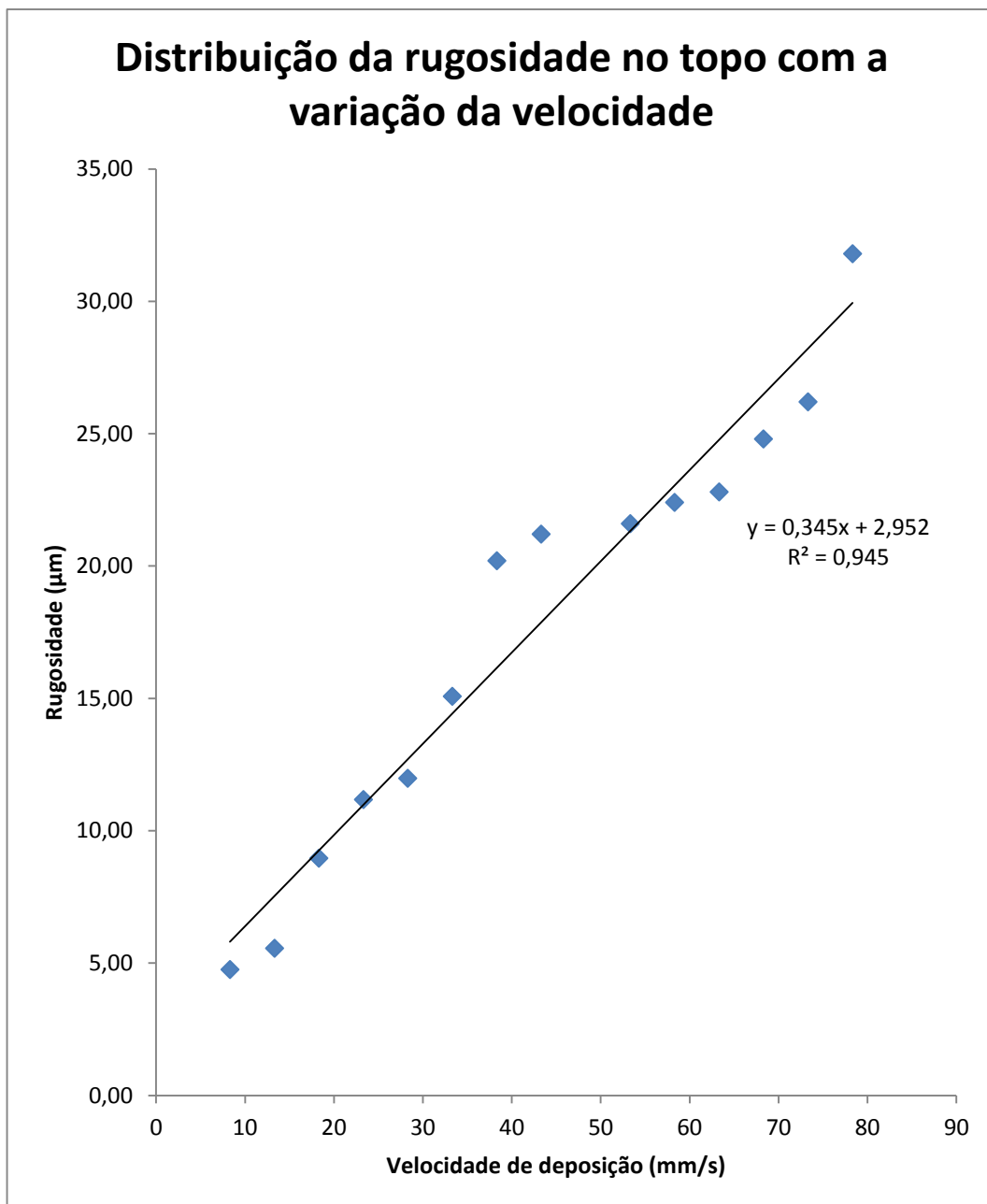


Figura 35 – Distribuição da rugosidade na superfície de topo

4.10.2. Rugosidade da Superfície Lateral

Neste subcapítulo registam-se as medições da rugosidade média (em μm) nas superfícies laterais dos cubos, de modo a identificar respectivas tendências em função da variação da velocidade de deposição (em mm/s). Esses valores estão registados na Tabela 24 e ilustrados graficamente na Figura 36.

Tabela 24 – Rugosidade na superfície lateral

Componente	Velocidade de deposição (mm/s)	Rugosidade Lateral (μm)
I	8,3	14,22
II	13,3	17,38
III	18,3	20,80
IV	23,3	22,60
V	28,3	24,00
VI	33,3	25,60
VII	38,3	26,00
VIII	43,3	26,00
IX	53,3	25,80
X	58,3	28,60
XI	63,3	29,00
XII	68,3	27,20
XIII	73,3	28,60
XIV	78,3	28,80

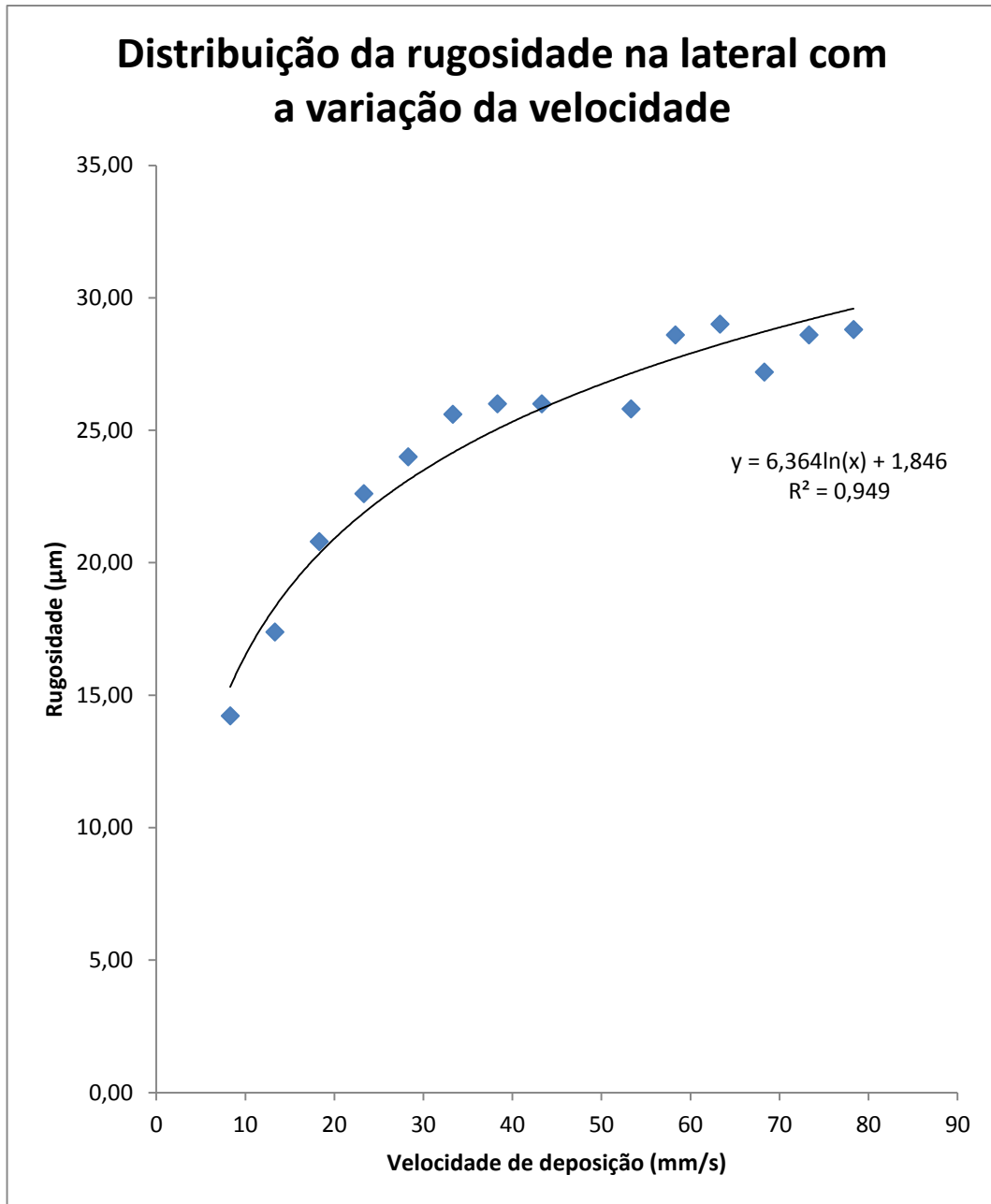


Figura 36 – Distribuição da rugosidade na superfície lateral

4.10.3. Rugosidade da Superfície Base

Neste subcapítulo registam-se as medições da rugosidade média na superfície de base dos cubos (superfície em contacto com a plataforma), de modo a identificar as tendências dos resultados com a variação da velocidade de deposição (em mm/s). Ver Tabela 25 e Figura 37.

Tabela 25 – Rugosidade na superfície base

Componentes	Velocidade de deposição (mm/s)	Rugosidade Base (μm)
I	8,3	1,40
II	13,3	1,30
III	18,3	0,24
IV	23,3	1,24
V	28,3	0,36
VI	33,3	0,90
VII	38,3	1,14
VIII	43,3	1,24
IX	53,3	0,76
X	58,3	0,66
XI	63,3	1,08
XII	68,3	1,54
XIII	73,3	1,54
XIV	78,3	1,40

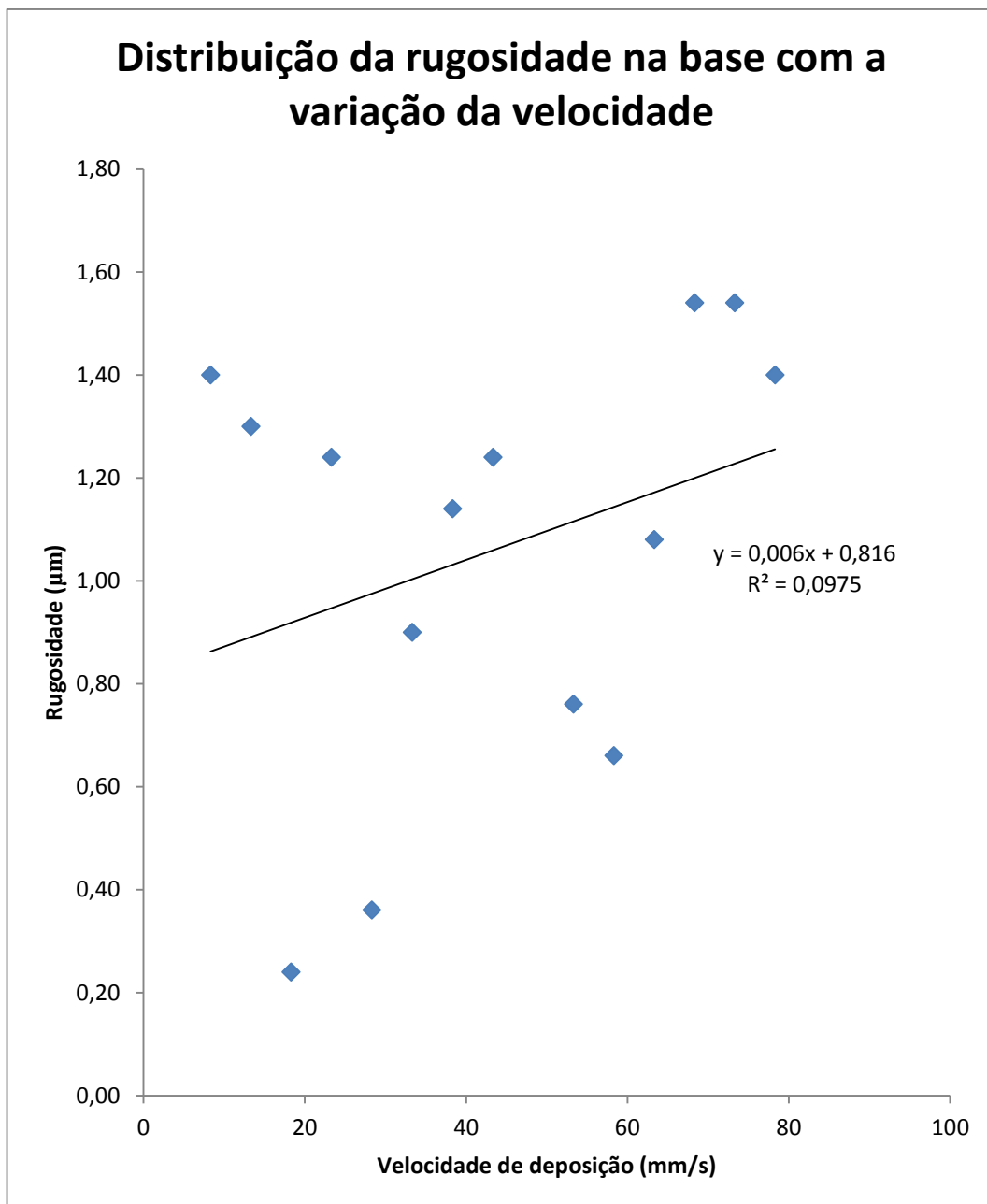


Figura 37 – Distribuição da rugosidade na superfície base

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Produziu-se e analisou-se a rugosidade de um total de 37 componentes de geometria cubica e realizaram-se 759 medições (201 medições directas e 378 medições indirectas) e 882 simulações,

5.1. Especificações do Tempo de Fabrico

A distribuição do tempo de fabrico em relação à velocidade de deposição e ao volume do componente depende da qualidade escolhida para o fabrico dos componentes. O algoritmo de controlo que é utilizado garante a baixa, média ou alta qualidade, sendo as velocidades correspondentes rápida, normal e lenta, respectivamente. No fabrico dos componentes, a selecção da velocidade faz-se na escala apresentada pela aplicação informática. As características principais de segurança são garantidas para que não ocorram danos no equipamento.

A menor velocidade de deposição do equipamento é de aproximadamente 3,3 mm/s. Neste caso, o sobreaquecimento do ejetor e dos motores são de ter em conta, pelo que apenas serão consideradas as condições de funcionamento normais.

A gama de velocidades estudada foi de 8,3, 13,3, 18,3, 23,3, 28,3, 33,3, 38,3, 43,3, 48,3, 53,3, 58,3, 63,3, 68,3 e 73.3 mm/s, a qual contém valores suficientemente diferenciados para permitir o estudo do comportamento do equipamento.

A maior velocidade de deposição é de aproximadamente 80 mm/s. Neste caso, o tempo disponível para o arrefecimento do material na plataforma de fabrico é muito pequeno, o que não favorece a criação de camadas finas e dá origem a componentes defeituosos.

Em relação à distribuição da velocidade de deposição, existem diversas variáveis que influenciam o tempo necessário para o fabrico de componentes, como é o caso da espessura da cada camada, do número de camadas sólidas (100% de preenchimento) e do número de passagens sobre as arestas do componente. Dos valores recolhidos para baixa, normal e alta qualidade de deposição em relação à velocidade e ao tempo do fabrico, conclui-se ser possível a aproximação a uma distribuição polinomial e para a relação volume/tempo a uma aproximação exponencial (ver Figuras 29, 30 e 31).

Através do controlo, quer do tempo previsto por simulação, quer do tempo real de fabricação, verifica-se uma discrepância residual para a qualidade baixa, de 2,8% para a qualidade normal e de 3,3% para a qualidade alta.

Para os resultados obtidos, as funções de tempo (em minutos) em função do volume (em mm³) e da velocidade (em mm/min) que melhor se aproximam das, resultam nas seguintes expressões empíricas:

Baixa Qualidade

$$\text{Volume: } 1000 - 3375 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (0,281 * \mathcal{V} - 225)V^{-(0,000108*\mathcal{V}+0,138)} \\ R^2 = 0,9999 \end{cases}$$

$$\text{Volume: } 3375 - 15625 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (2,119E - 4. \mathcal{V}^2 - 1,152\mathcal{V} + 2197)V^{-(0,256.\ln \mathcal{V} - 1,575)} \\ R^2 = 0,9997 \end{cases}$$

$$\text{Volume: } 15625 - 8800000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (7,7992\mathcal{V}^{0,9327})V^{-(0,000755 \ln(\mathcal{V})+0,986)} \\ R^2 = 0,9939 \end{cases}$$

Média Qualidade

$$\text{Volume: } 1000 - 3375 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (0,272\mathcal{V} - 203)V^{-(0,001\mathcal{V}+0,1242)} \\ R^2 = 0,9999 \end{cases}$$

$$\text{Volume: } 3375 - 15625 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (3,247E - 4.\mathcal{V}^2 - 2,183\mathcal{V} + 4383)V^{(0,286 \ln \mathcal{V} - 1,871)} \\ R^2 = 0,965 \end{cases}$$

$$\text{Volume: } 15625 - 8800000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (4,0791\mathcal{V} - 203556)V^{-(1E-9.\mathcal{V}+0,9888)} \\ R^2 = 0,992 \end{cases}$$

Alta Qualidade

$$\text{Volume: } 1000 - 27000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (0,0005\mathcal{V}^2 - 1,9424\mathcal{V} + 1180,7)V^{-(0,2535 \ln(\mathcal{V}) - 1,5931)} \\ R^2 = 0,9936 \end{cases}$$

$$\text{Volume: } 27000 - 8800000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Velocidade: } 498 - 4398 \text{ mm. mín}^{-1}$$

$$\rightarrow \begin{cases} T(\mathcal{V}, V) = (19,316.\mathcal{V}^{0,9439})V^{-(0,0013.\ln(\mathcal{V})+0,9974)} \\ R^2 = 0,9455 \end{cases}$$

É de realçar que os valores dos coeficientes de determinação das interpolações são bastante elevados.

5.2. Precisão Geométrica

O estudo da precisão foi realizado com componentes de geometria simples: cubos de 15 mm de aresta, sendo a fabricação de cada componente repetida três vezes com três velocidades de deposição diferentes (8,3, 38,8 e 73,3 mm/s), os quais são identificados pelas letras A, B e C.

Nas medições directas dos componentes consideram-se significativas 3 casas decimais.

A relação entre as dimensões obtidas e a velocidade de deposição é verificada através:

- Das médias relativas em que ocorrerá um decréscimo de precisão, quando é aumentada a velocidade de fabrico.
- Do desvio padrão. Quando o seu valor é pequeno, então não é possível concluir sobre existência uma relação clara.

5.3. Variação mínima de precisão

Para o estudo da variação mínima de precisão de cubos com 15 mm de aresta, com tempo de fabrico de 20 minutos, velocidade de deposição de 32 mm/s e condição normal de qualidade, fabricaram-se 14 exemplares com as pequenas variações descritas nas Tabelas 19 e 21.

Através da Figura 32, pode ver-se que, para os eixos X e Y, ocorre um comportamento linear quando a variação atinge +0.003 mm em relação à dimensão nominal.

Na referida figura, também se observa a regressão linear obtida e correspondente o coeficiente de determinação.

Através da Figura 33, verifica-se que, para o eixo Z, ocorre um comportamento linear quando a variação atinge +0.003 mm em relação à dimensão nominal. Na mesma figura também se observa a regressão linear e o coeficiente de determinação.

5.4. Rugosidade

A rugosidade é originada, principalmente, pelo processo de fabrico, sendo que cada superfície apresenta características singulares devido à forma como é gerada, como é o caso:

- Da superfície base, que é termicamente afectada durante todo o fabrico do componente.
- Da superfície lateral, que tem tempo para arrefecer antes de nova camada ser sobreposta.
- E da superfície topo, que é a última a ser gerada.

Pelas distribuições estatísticas dos dados das Tabelas 23, 24 e 25 e das Figuras 35, 36 e 37, regista-se que:

- A superfície de topo, apresenta uma regressão linear, com $y = 0,345x + 2,952$ e coeficiente de determinação de 94,49 %.
- A superfície lateral, apresenta uma regressão logarítmica, $y = 6,364 \ln(x) + 1,846$ e coeficiente de determinação de 94,99 %.
- Para a superfície base, que está em contacto com a plataforma de aquecimento, observa-se que a rugosidade obtida é sempre inferior a $2 \mu\text{m}$.

6. CONCLUSÕES

A manufactura por adição é caracterizada por sete tipos de processos de base, nomeadamente, a fotopolimerização, a deposição por vaporização, a extrusão, a ligação por aglomeração, a sobreposição laminar, a deposição directa por laser e a fusão em leito de pó.

Através do estado da arte, confirma-se a importância crescente dos processos de fabricação por adição. No entanto, ainda se nota uma grande falta de normas para a realização de testes, tanto dos equipamentos como dos componentes fabricados.

A manufactura por adição já se encontra implantada em várias áreas da indústria e trás vantagens assinaláveis para a gestão de produção.

Vantagens:

- Produção a baixo custo para pequenos lotes.
- Capacidade de fabrico de geometrias complexas, variadas e personalizadas.
- Redução do tempo e do custo de desenvolvimento.
- Redução na quantidade de matéria-prima utilizada.

Áreas de aplicação:

- Indústrias aeronáutica, automóvel e de componentes.
- Medicina.
- Arquitectura.
- Arqueologia.
- Arte e Cultura.
- Educação.

O equipamento utilizado neste trabalho foi a impressora 3D Leapfrog Creatr14, que permite: extrusão dupla opcional, precisão de $16 \mu m$ no eixos X e Y (horizontal) e de $10 \mu m$ no eixo Z (vertical), volume de fabrico de $230*270*230$ mm, velocidade de impressão entre 3,8 – 80 mm/s e plataforma de fabrico aquecida (opcional).

O material utilizado foi o ácido poliláctico (PLA) transparente, pelo facto de não libertar odores, encontrar-se amplamente disponível no mercado e por demonstrar boa resistência mecânica e características adequadas para testes visuais.

A análise dos resultados teve em consideração o comportamento do equipamento e as suas especificações.

Na presente dissertação estudaram-se os seguintes aspectos:

- Simulação e medição dos tempos de fabrico, com variação da qualidade de impressão e da alteração do volume do componente;
- Medições dimensionais de componentes em função da variação da velocidade de fabrico;
- Medições da variação mínima de precisão nos componentes manufacturados, e comparação com a precisão anunciada pelo fabricante do equipamento.
- Medição da rugosidade de três superfícies diferentes que estão presentes em componentes cúbicos, com variação da velocidade de deposição.

Da relação entre qualidade de fabrico, e o volume do componente, obtiveram-se 8 equações empíricas que traduzem o comportamento do equipamento. Destas equações, 3 dizem respeito à baixa qualidade, 3 à média qualidade e 2 à alta qualidade de impressão. Todas as equações possuem elevado coeficiente de determinação e exibem uma grande dependência em relação ao volume dos componentes.

Das medições dimensionais dos componentes obtiveram-se valores com intervalos de confiança superiores a 98

Em relação aos eixos X e Y, a precisão esperada para o equipamento é de $16 \mu m$. Da análise dos dados ocorrem duas observações adicionais. A primeira diz respeito à relação entre aplicação informática e equipamento de fabrico, relativamente à variação mínima de precisão: apenas se observa a existência de uma relação linear para variações superiores a $+0,003 \text{ mm}$ em relação dimensão nominal do componente. A segunda é a obtenção de uma precisão média de $14,18 \mu m$, que é superior à anunciada pelo fabricante do equipamento.

A diferença destes valores pode dever-se à exactidão horizontal ou “*feature size*” do ejector, sendo possível a sua regulação.

Em relação ao eixo Z, a precisão do equipamento é de $10 \mu m$. Da análise dos dados decorrem duas observações. A primeira é a de que a variação mínima de precisão é linear para variações superiores a $+0,003 \text{ mm}$ em relação à dimensão

nominal do componente. A segunda é de que a precisão média de $10,83 \mu\text{m}$ é marginalmente inferior à anunciada pelo fabricante do equipamento.

A diferença nestes valores pode dever-se à exactidão vertical ou "*layer thickness*" que representa à espessura mínima de cada camada, sendo possível a sua regulação.

As medições dos valores da rugosidade média aritmética para as 3 superfícies foram as seguintes:

- Na superfície topo do cubo, ocorre um aumento gradual da rugosidade quando se aumenta a velocidade de deposição, sendo possível, através da regressão linear, determinar o valor esperado da rugosidade para uma determinada velocidade, com um intervalo de confiança de 94,49%. É também possível, através da aplicação informática, modificar a velocidade de deposição da última camada, caso se pretenda um melhor acabamento superficial.
- Nas superfícies verticais dos cubos ocorre uma degradação dos valores experimentais, devido ao tempo que cada camada leva a ser fabricada. Mesmo assim, há um aumento gradual da rugosidade com o aumento da velocidade de deposição, sendo possível também determinar o valor esperado da rugosidade para uma determinada velocidade, com um intervalo de confiança de 94,99%.
- Na superfície de base do cubo, ocorre uma variação da rugosidade média inferior a $2 \mu\text{m}$. Estes valores são devidos ao aquecimento permanente da plataforma, que provoca uma distribuição quase uniforme do material.

Dos resultados obtidos, conclui-se que, a manufactura por fusão de filamento apresenta boas características de precisão e algum controlo ao nível do acabamento superficial.

Contudo, o acabamento superficial pode ser melhorado com tratamentos posteriores ao fabrico, como por exemplo por tratamento térmico ou por limpeza com hidróxido de sódio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Beer, N., "Additive Manufacturing, Turning Mind into Matter – Industry Evaluation and Recommendations Report", 2013.
- [2] ISO 9000 – "Quality management", disponível em, http://www.iso.org/iso/home/standards/management-standards/iso_9000.htm. [Acedido em Abril 2015].
- [3] ISO/IEC 17025:2005, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", disponível em, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=39883, [Acedido em Abril 2015].
- [4] Koff, W., Gustafon, P., "3D Printing and the Future of Manufacture", Computer Sciences Corporation, Fall 2012
- [5] WONG, Kaufui; HERNANDEZ, Aldo, "A Review of Additive Manufacturing" ISRN Mechanical Engineering, Volume 12, ID 208760, 2012
- [6] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., "Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", Second Edition, Springer, 2015.
- [7] Cotteler, M., Holdowsky, J., Mahto, M., "The 3D opportunity primer – The basics of additive manufacturing" – A Deloitte series on additive manufacturing, Deloitte University Press, 2015.
- [8] Raja, V. e Fernandes, K. J.; "Reverser Engineering – Na Industrial Perspective", Springer, 2008.
- [9] "3DSYSTEMS", disponível em, <http://www.3dsystems.com/es/node/5229>. [Acedido em Janeiro de 2015].
- [10] "Voxeljet," disponível em, <http://www.voxeljet.de/en/case-studies/>. [Acedido em Dezembro de 2014].
- [11] NEE, Andrew – Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Springer Reference, 2015. ISBN 978-1-4471-1.
- [12] "Stratasys", disponível em, <http://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/automotive/lamborghini> [acedido em Maio de 2015].
- [13] "Stratasys", disponível em, <http://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/automotive>. [Acedido em Maio de 2015].

- [14] “ExOne”, disponível em, <http://www.exone.com/Resources/Case-Studies>. [Acedido em Maio de 2015].
- [15] “How Paper-based 3D Printing Works – The Technology and Advantages”, Mcor Technologies, MCOR-WPUS06092013.
- [16] “Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys”, Physics Procedia 39 (2012) 376 – 381.
- [17] “The AM Magazine” – PAPITECH Solutions Inc. ISSN 0974-7133. ISSUE28SEP2014.
- [18] Micro Mart, Issue 1362, May 2015
- [19] Evans, B., “Practical 3D Printers”, Technology in Action, ISBN-13: 978-1-4302-4393-9, 2012
- [20] Chouzal, M., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, disp. <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12027/2/Texto%20integral.pdf>, [Acedido em Junho 2015].
- [21] Black, B. “Workshop Processes, Practices And Materials”, 5th Edition, Routledge, ISBN: 978-1-138-78472-7, 2015.
- [22] Stratasys, “How 3D Printing will continue to Transform Manufacturing”, 2014, p.8-9

ANEXOS

Termos Fundamentais da Metrologia

A terminologia estabelecida serve de base para as actividades relativas ao estudo da metrologia na dissertação.

De seguida é apresentada a sua denominação e o seu significado:

Metrologia: Ciência da medição.

Calibração: Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, ou sistema de medição, ou valores representados por uma medida materializada, ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões.

Medir: É o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (grandeza a medir) é determinado como um múltiplo e/ou fracção de uma unidade estabelecida por um padrão.

Medição: Conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor de uma grandeza.

Grandeza: Atributo de um fenómeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado. Sendo os símbolos das grandezas apresentados na norma ISO 31.

Exactidão de medição: Grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurado. Exactidão é um conceito qualitativo. O termo precisão não deve ser utilizado como exactidão.

Incerteza de medição: Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurado.

Erro de medição: Resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando. Uma vez que o valor verdadeiro não pode ser determinado, utiliza-se na prática, um valor verdadeiro convencional.

Erro aleatório: Resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efectuadas sob condições de repetibilidade.

Erro sistemático: Média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efectuados sob condições de repetibilidade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

Resolução: Expressão quantitativa da aptidão de um “instrumento de medir”, de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir sem necessidade de interpolação.

Padrão: Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza, para servir como referência.

Instrumentação: É o conjunto de técnicas e instrumento usados para observar, medir, registar, controlar e actuar em fenómenos físicos. A instrumentação preocupa-se com o estudo, desenvolvimento, aplicação e operações dos instrumentos.

Sistema internacional de unidades: Sistema coerente de unidades adoptado e recomendado internacionalmente, ver Tabela 29. Sendo o SI baseado, nas sete unidades de base seguintes:

Tabela 26 – Grandezas do sistema internacional

Grandeza	Nome	Símbolo
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente Eléctrica	Ampére	A
Temperatura	Kelvin	K
Quantidade de matéria	Mol	mol
Intensidade luminosa	Candela	cd

A Tabela 30 apresenta submúltiplos do metro, baseada no sistema internacional de unidades (SI).

Tabela 27 – Submúltiplos do metro

Unidade	Símbolo	Factor de multiplicação
Metro	m	1 = 1 m
Decímetro	dm	$10^{-1} = 0,1$ m
Centímetro	cm	$10^{-2} = 0,01$ m
Milímetro	mm	$10^{-3} = 0,001$ m
Micrómetro	μm	$10^{-6} = 0,000\ 001$ m

Apesar da normalização do metro como unidade de medida, ainda são usadas outras medidas. Na mecânica, é comum usar o milímetro.

Medidas directas: Uma grandeza é medida pelo método directo, quando esta medição for efectivada por meio de uma comparação directa do que se quer medir com um padrão.

Medidas indirectas: Uma grandeza é medida por método indirecto, quando esta medição for efectuada pela utilização de transdutores (elementos que fazem a aferição de uma grandeza e a transformam numa outra grandeza, sendo esta última comparada com um padrão), isto é, determina-se a dimensão desejada pela medida de grandezas relacionadas com a grandeza requerida. Estas grandezas podem ser mecânicas, electrónicas, ópticas, pneumáticas e etc.

$$\text{Dimensão da peça} = \text{Dimensão padrão} \pm \text{diferença}$$

Também se pode tomar como padrão, uma peça original de dimensões conhecidas, que será utilizada como referência.

Micrómetros

O micrómetro é um instrumento de medição que possibilita medições rigorosas e precisas, quando são necessárias medições ao nível dos 0,01 mm, 0,001 mm ou 0,002 mm de resolução.

O princípio de funcionamento do Micrómetro assemelha-se ao do sistema parafuso e porca, ou seja, é uma porca fixa e um parafuso móvel que, quando é efectuada uma volta completa, provocará um deslocamento igual ao seu passo. Desse modo, dividindo-se a cabeça do parafuso, é possível avaliar fracções menores que uma volta e, com isso, medir comprimentos menores do que o passo do parafuso.

Neste instrumento, no prolongamento da haste móvel, há um parafuso micrométrico preso ao tambor, e que se move através de uma porca ligada à bainha. Quando se gira o tambor, a sua graduação circular desloca-se em torno da bainha e, ao mesmo tempo, conforme o sentido do movimento, a face da haste móvel aproxima-se ou afasta-se da face da haste fixa, no sentido longitudinal. As roscas do parafuso micrométrico e da sua porca são de grande precisão, evitando-se, assim, erros de primeira ordem.

No Micrómetro com resolução de 0,01 mm, o passo das roscas é de 0,5 mm na bainha, as divisões são de milímetros e meios milímetros e, no tambor, a graduação circular possui 50 divisões.

Quando as faces das hastes fixas e móvel estão juntas, a borda do tambor coincide com o traço zero da graduação da bainha. Ao mesmo tempo, a recta longitudinal gravada na bainha (entre as escalas de mm e meio mm) coincide com o zero da graduação circular do tambor. Como o passo do parafuso é de 0,5 mm, uma volta completa do tambor levará a borda ao primeiro traço de meio milímetro. Duas voltas completas levaram ao primeiro traço de milímetro, e assim por diante. Desta forma, o deslocamento de apenas uma divisão da graduação circular do tambor aproxima-se de 0,01 mm e o deslocamento de duas divisões resultará em 0,02 mm e assim sucessivamente.

Rugosímetro de Superfície Digital Portátil, SRT-6223

Este medidor digital de perfil superficial é um instrumento portátil para a realização de medições rápidas e precisas da altura entre os pontos extremos do perfil da superfície.

O SRT-6223 satisfaz as normas ASTM 4417-B, IMO MSC.215(82), SANS 5772, US Navy NSI 009-32, US Navy PPI 63101-000. Este instrumento é adequado ao uso laboratorial e em condições agressivas no campo, proporcionando resultados precisos imediatos e repetíveis.

A ponta de carbetto de tungstênio dura até 20 000 leituras e pode ser facilmente substituída.

O SRT-6223 um circuito LSI micro computadorizado e uma base de tempo a cristal, para proporcionar uma medição com maior precisão.

Especificações:

- Visor: LCD;
- Faixa: 0 μm a 800 μm ;
- Precisão: $\pm 5\%$ ou $\pm 5\ \mu\text{m}$, (prevalecendo aquele que for maior);
- Resolução: 1 μm ;
- Comutável entre o sistema métrico e o inglês.
- Interface para microcomputador, RS232C;
- Velocidade de medição: > 30 (leituras por minuto);

Componentes e Dimensões

Neste estudo é realizada a produção de elementos básicos, para estudo de dimensões primárias. Os componentes são criados por intermédio da aplicação informática de modelação “SolidWork” e o sistema informático de produção é o “Simplify3D”.

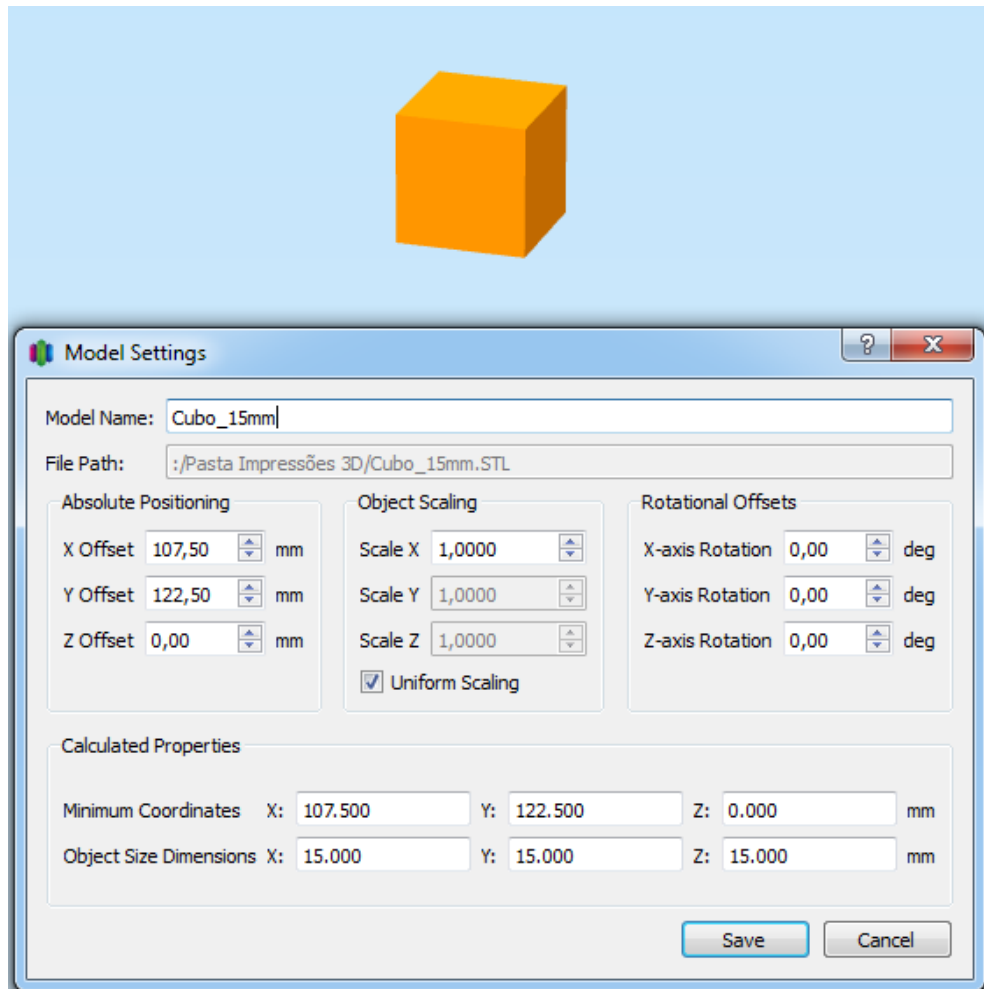


Figura 38 – Cubo de 15 mm

Este componente é criado para as iterações das especificações da velocidade de deposição, nas medições da precisão dimensional e de precisão geométrica de deposição no eixo x, para os componentes produzidos.

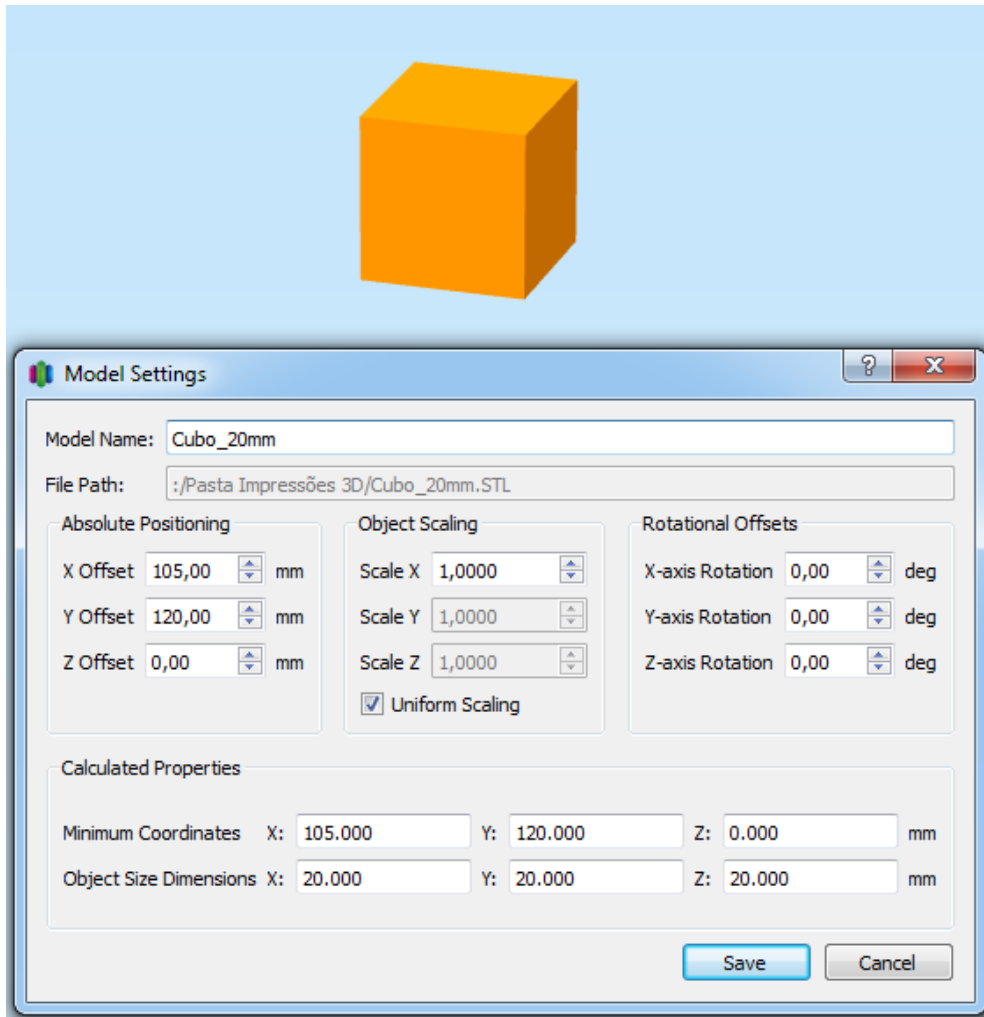


Figura 39 – Cubo de 20 mm de comprimento

Este componente é produzido, para o estudo das superfícies, vertical e horizontal das faces no perfil de rugosidade das mesmas.

Especificações de Rápida Qualidade de Funcionamento

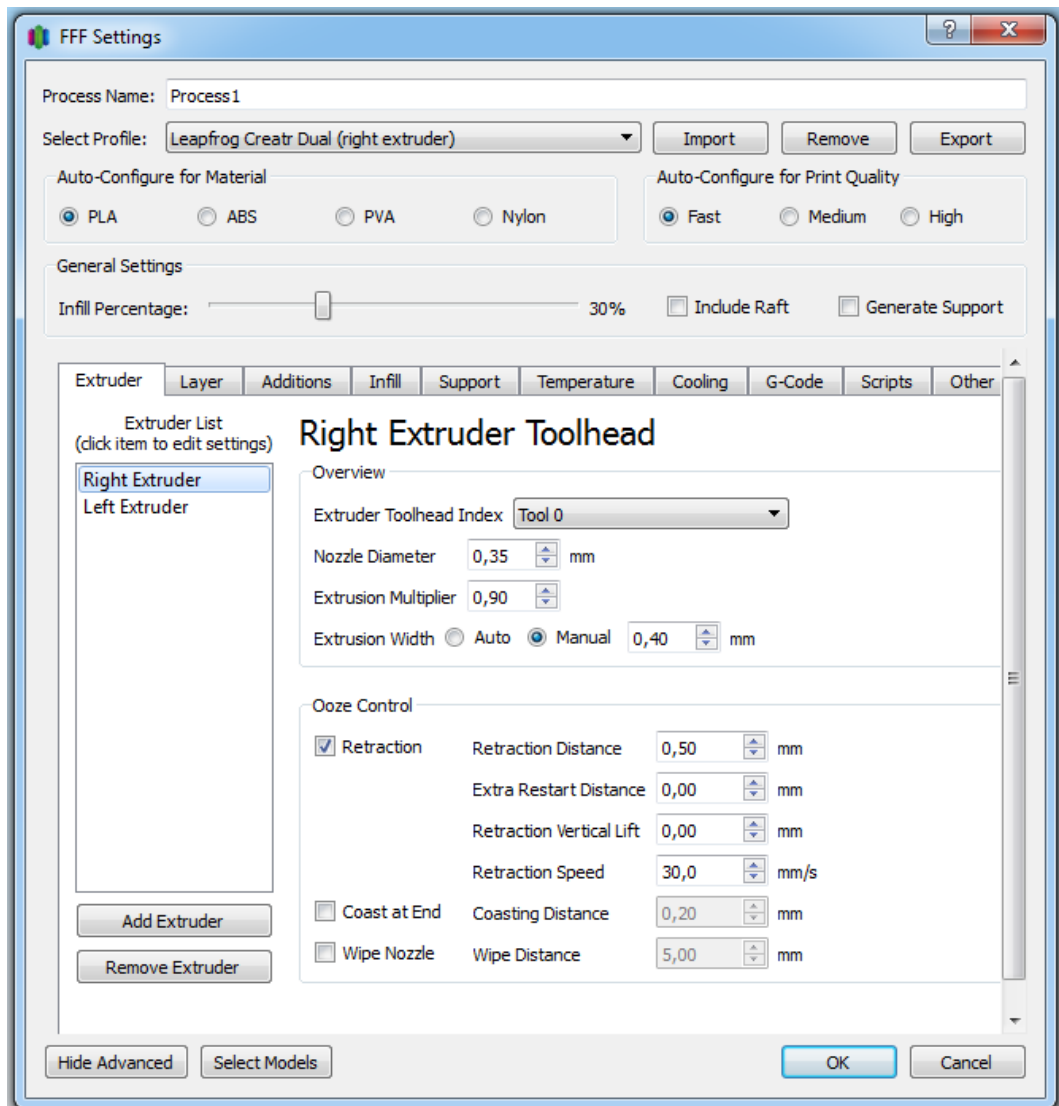


Figura 40 – Especificações do ejetor da impressora

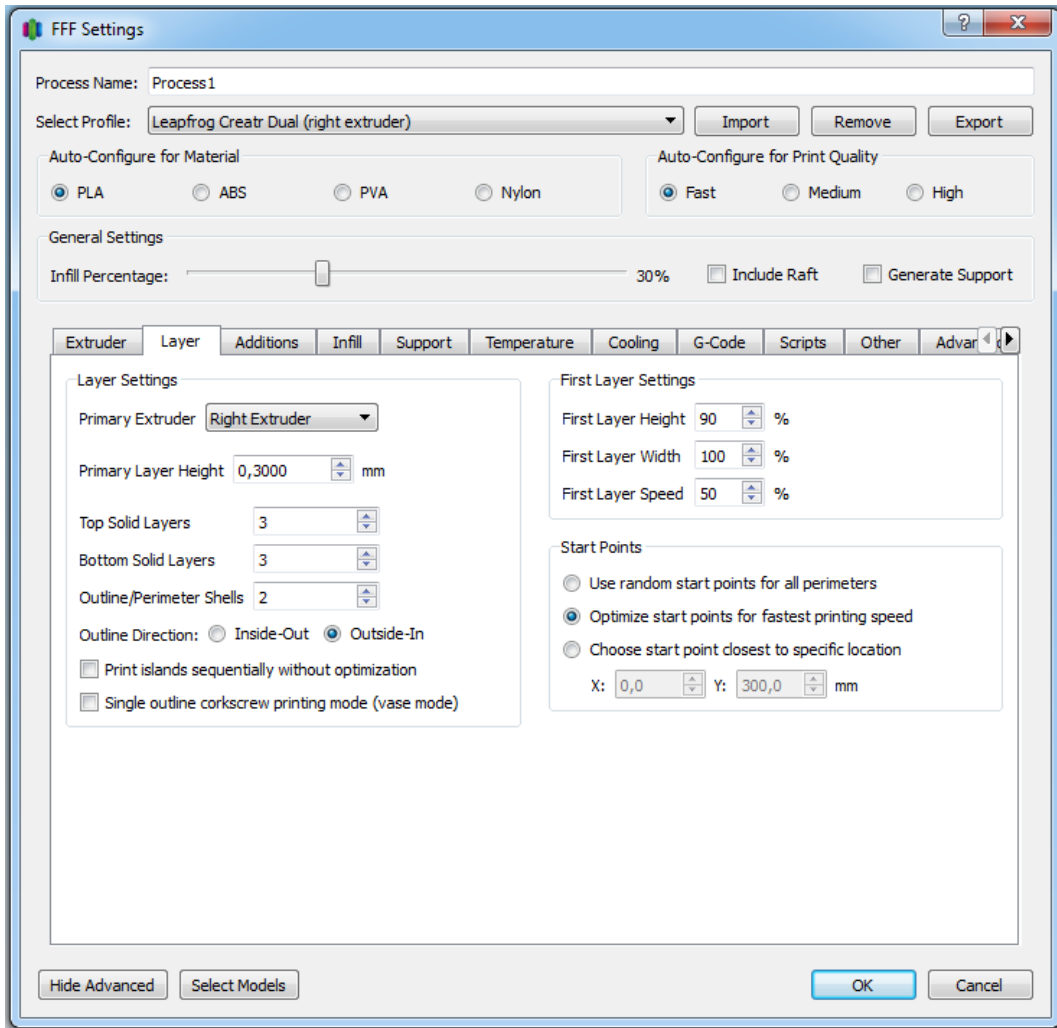


Figura 41 – Especificações da camada produzida

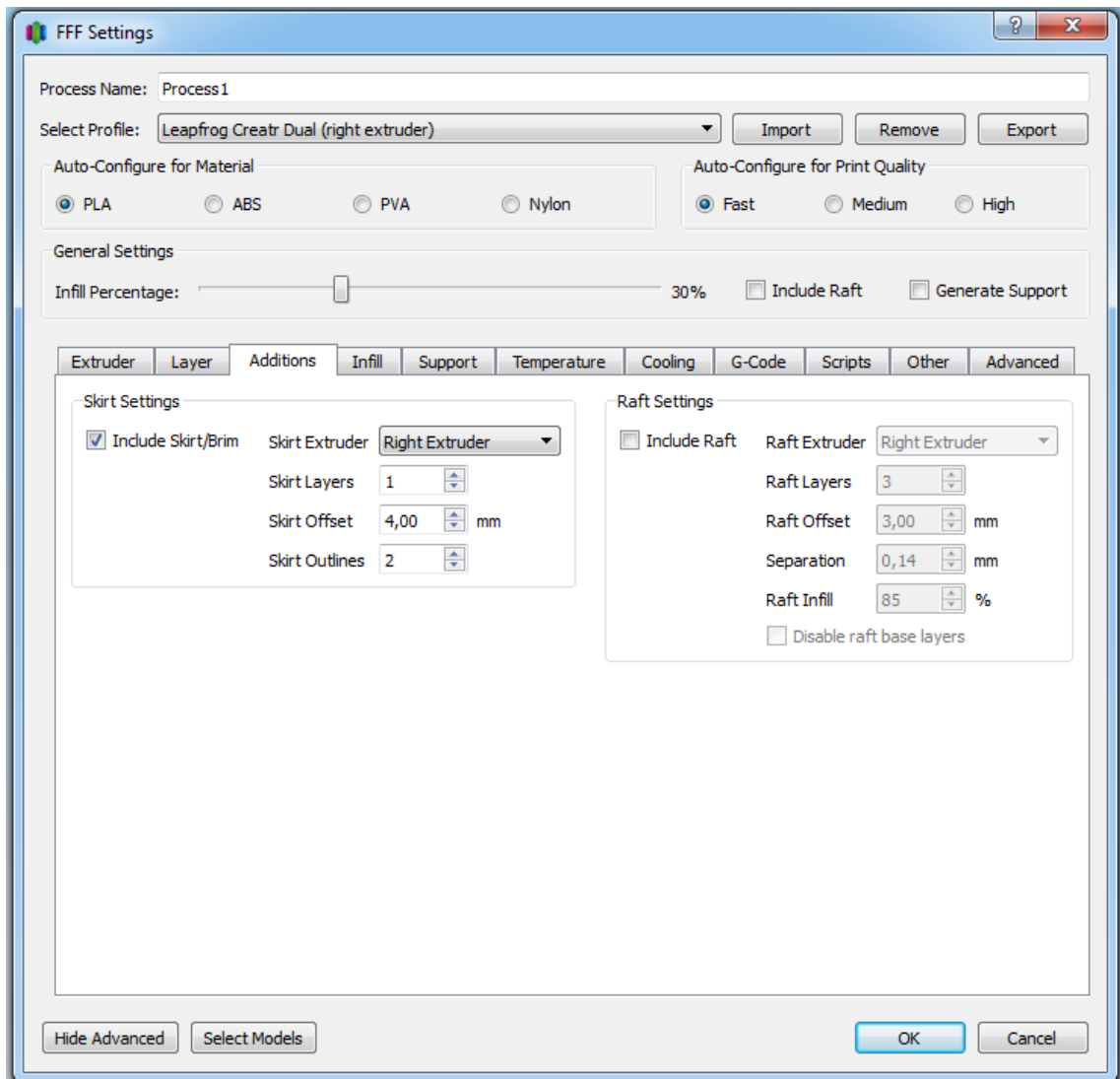


Figura 42 – Especificações adicionais de impressão

Skirt: Esta opção implementa uma nova camada externa da camada inicial do componente, de forma a aumentar a tensão superficial e reduzir os desvios na primeira camada de impressão.

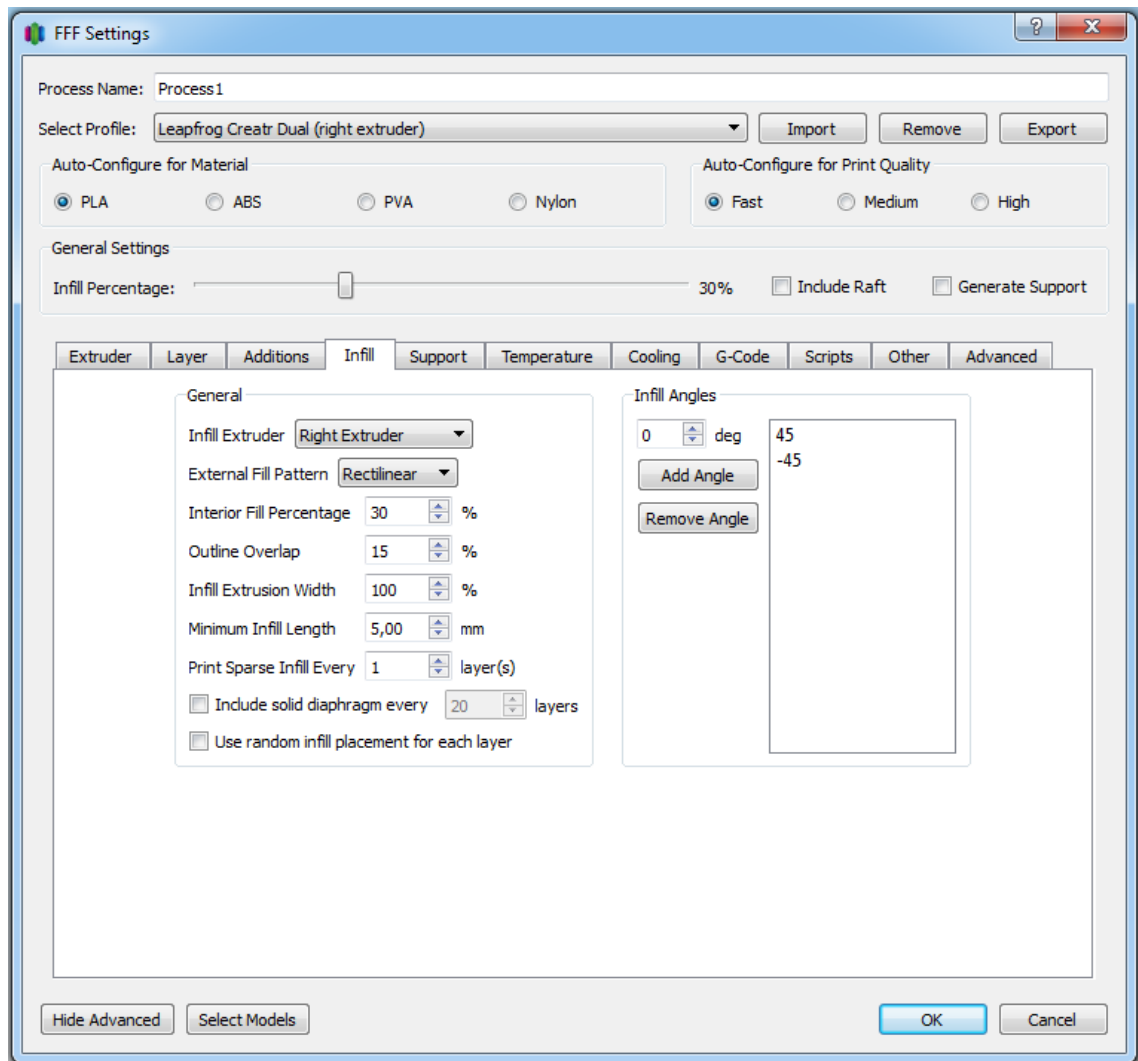


Figura 43 – Especificações de preenchimento da geometria a produzir

Infill: Esta opção está relacionada com a deformação do componente durante a impressão. A variação, em percentagem, desta opção determina a quantidade de material utilizado para preencher o interior do componente.

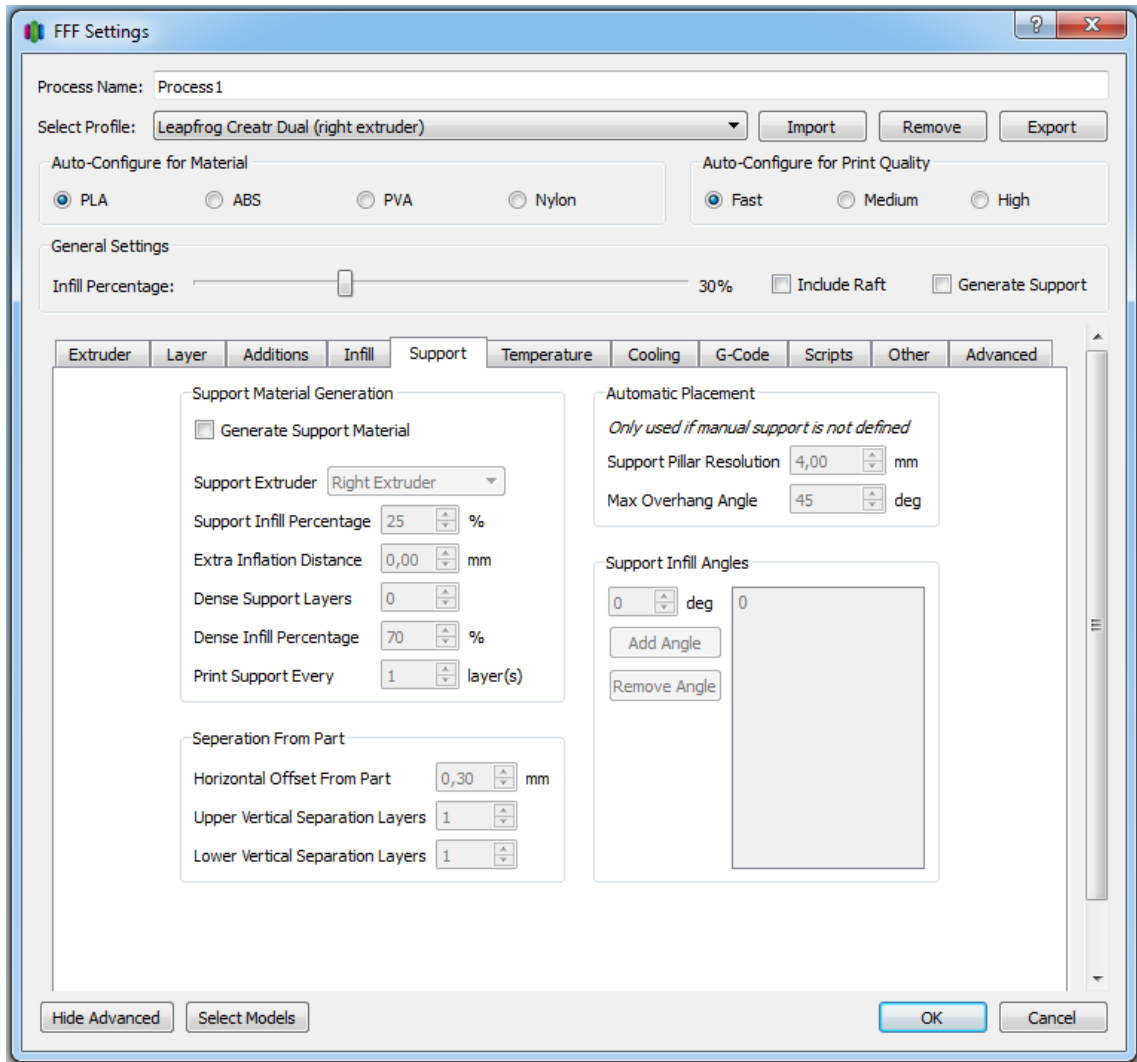


Figura 44 – Especificações de material de suporte

Support material: Esta opção é aconselhada para componentes que necessitem de apoio estrutural durante o processo de impressão.

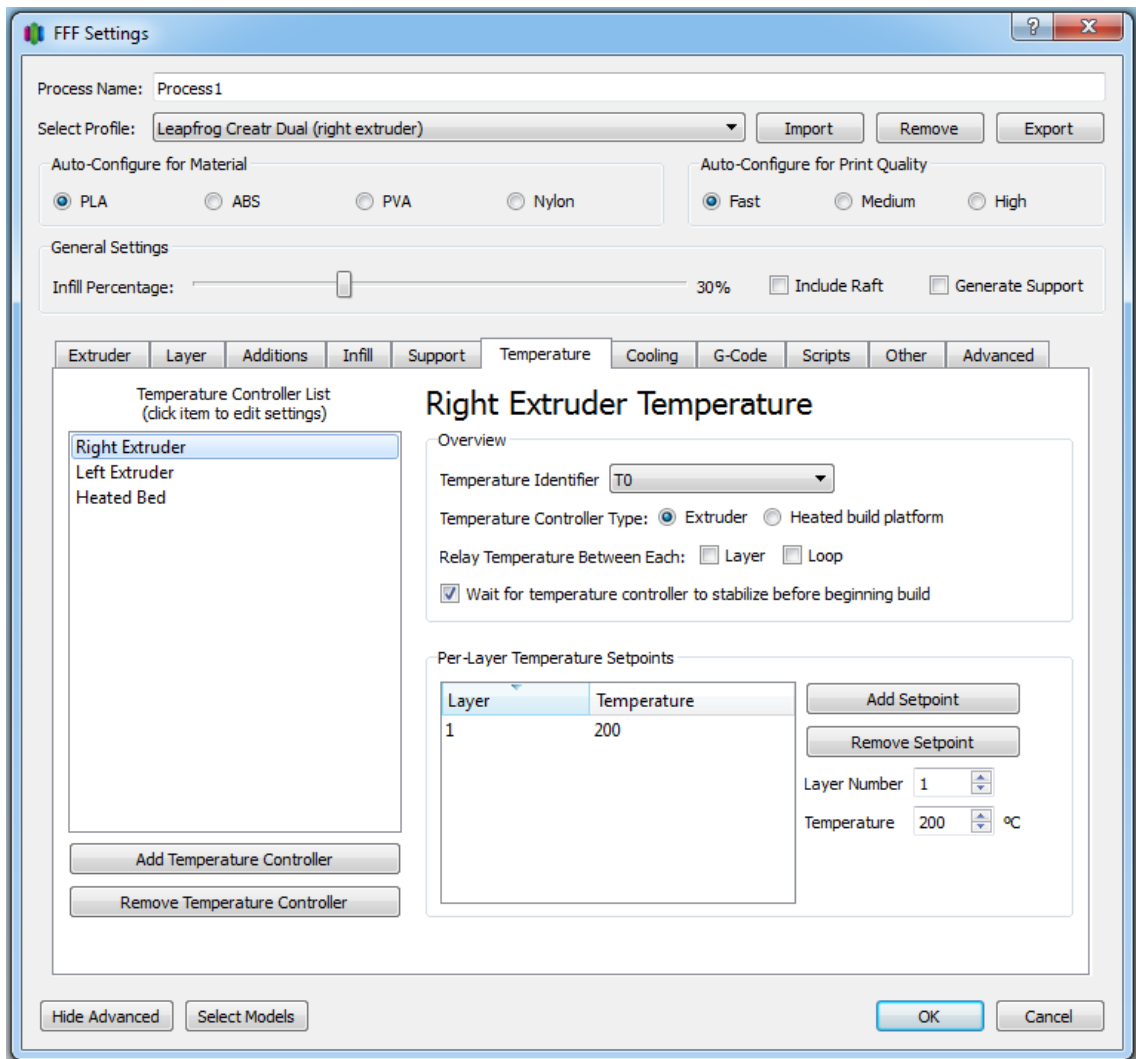


Figura 45 – Especificações de controlo de temperatura dos ejectores

O processo pré-impressão, leva à necessidade de estabelecer um aquecimento do ejetor e da plataforma, sendo esta temperatura mantida constante durante o processo de impressão.

A temperatura do ejetor de extrusão depende do tipo de material utilizado,

- ABS: 230 °C
- PLA: 210 °C
- PVA: 200 °C

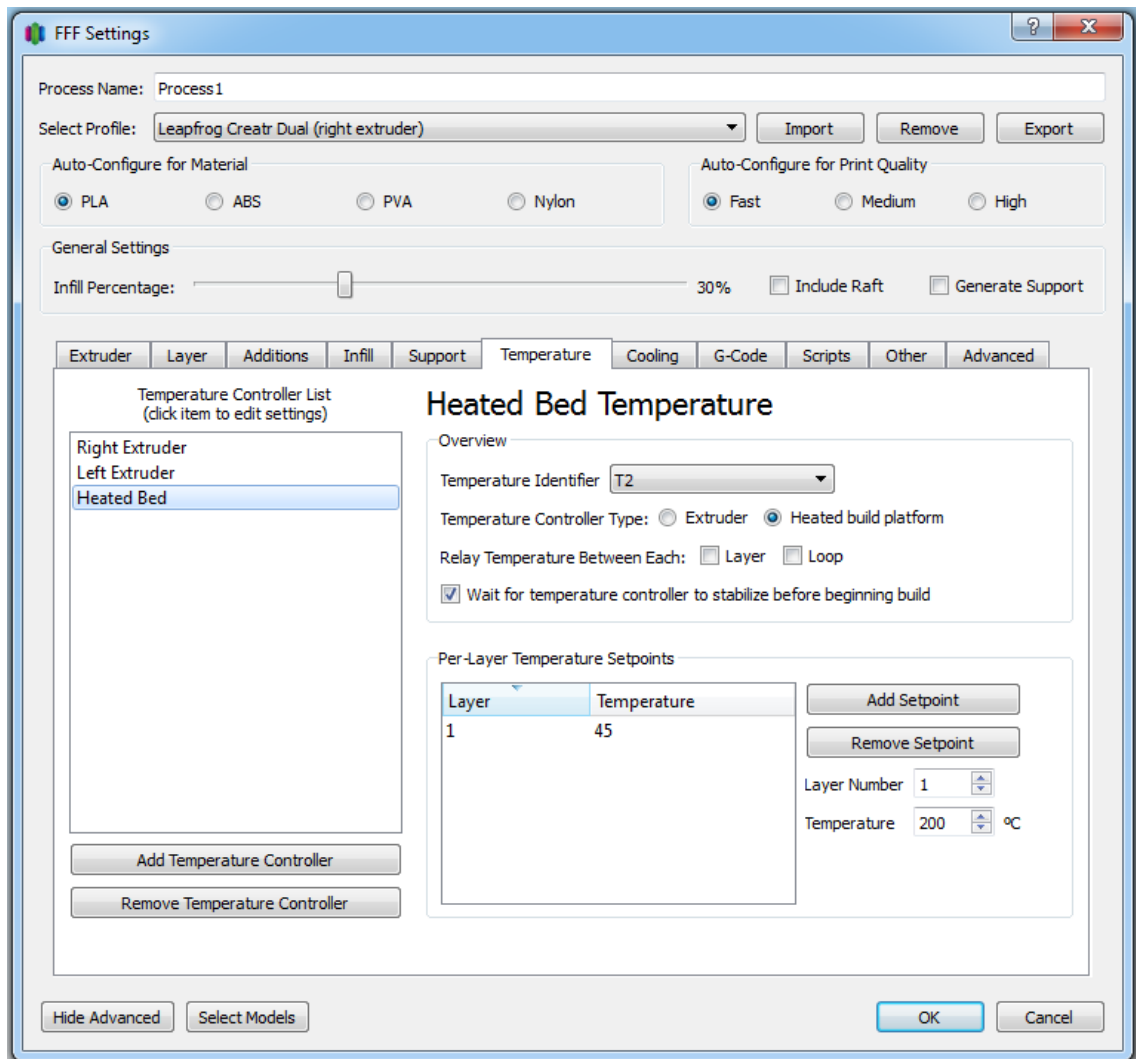


Figura 46 – Especificações de controlo de temperatura da plataforma

A temperatura da plataforma também depende do tipo de material utilizado pelo ejetor de extrusão,

- ABS: 80 °C
- PLA: 60 °C
- PVA: 60 °C

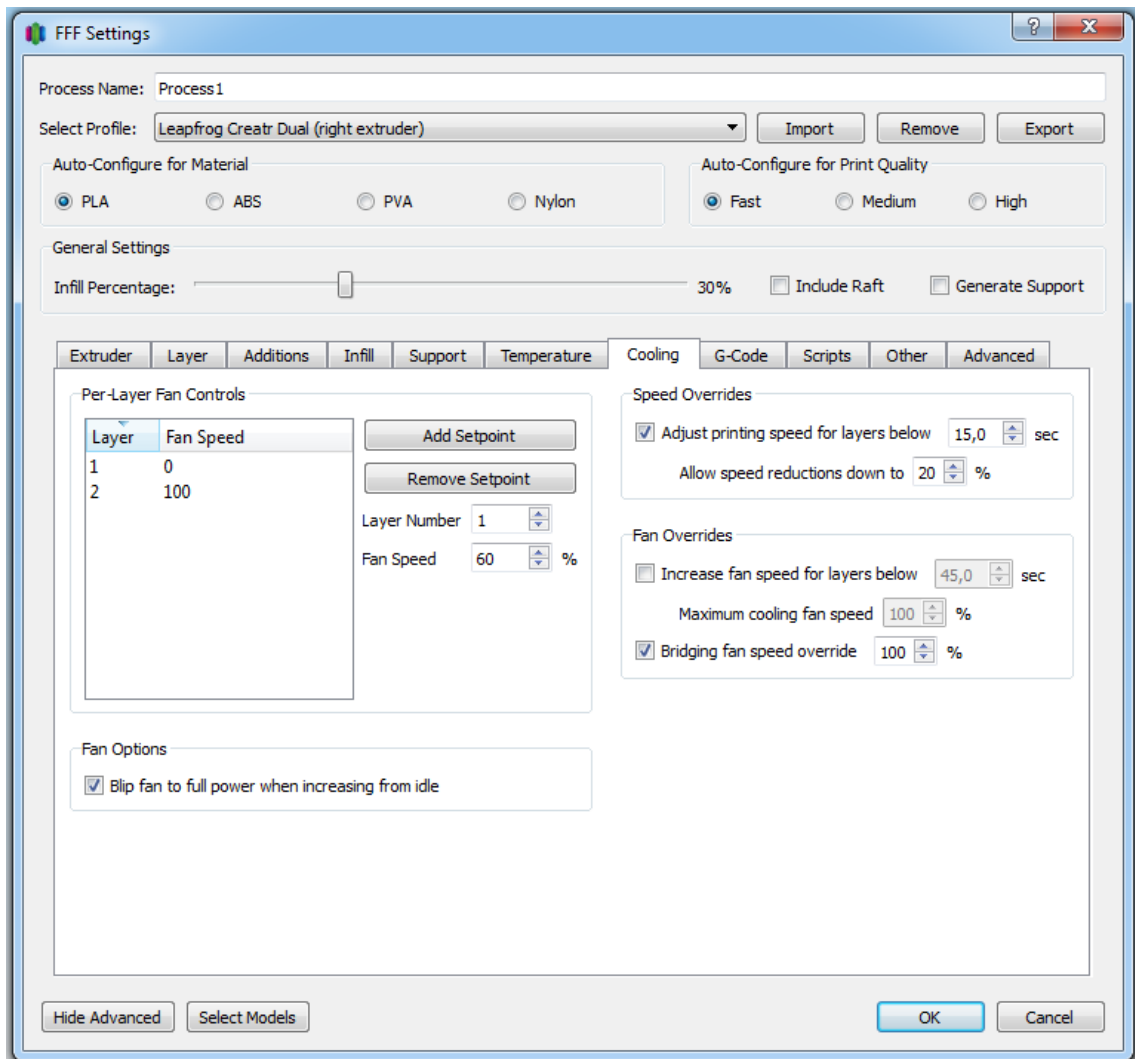


Figura 47 – Especificações do arrefecimento

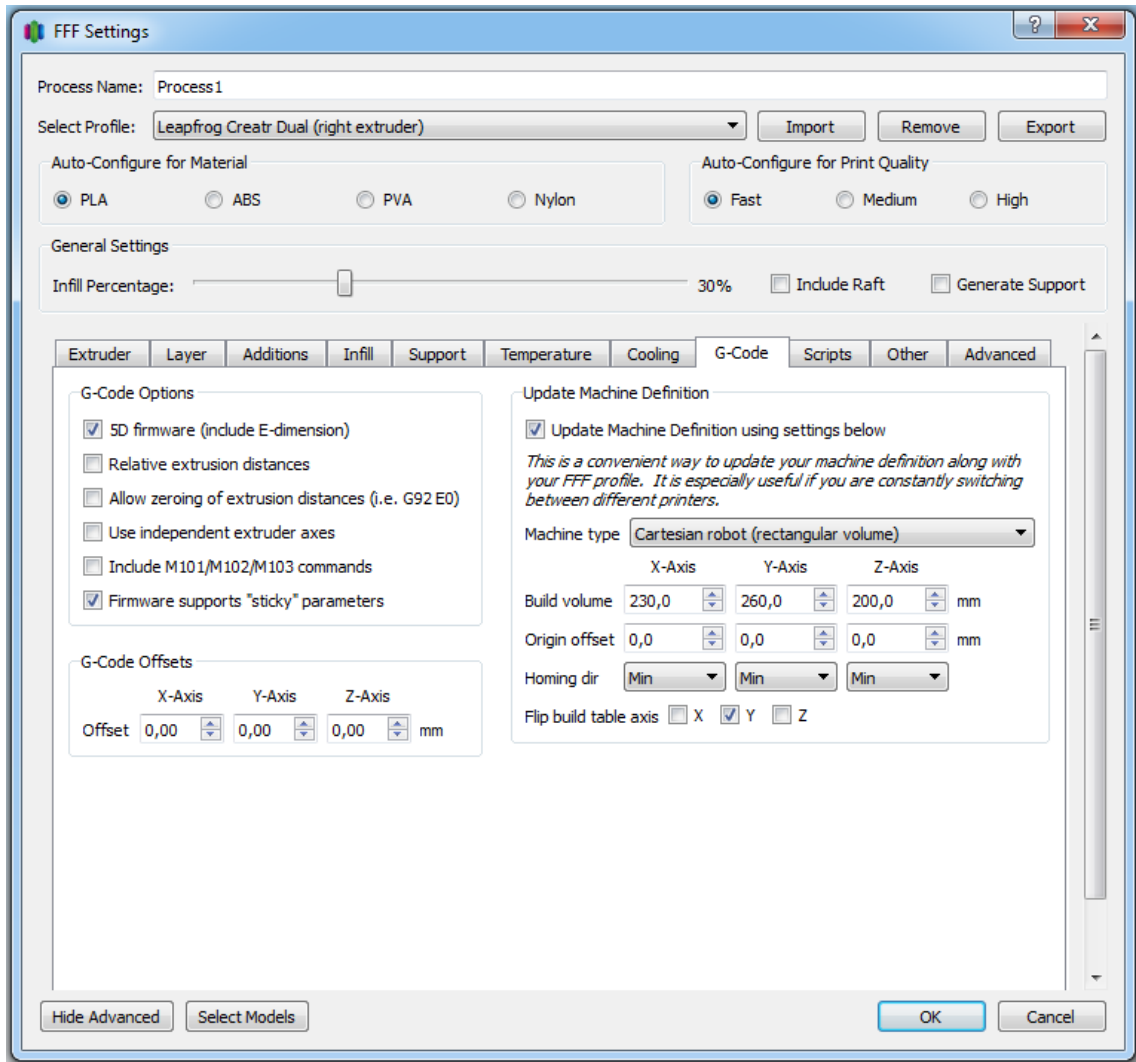


Figura 48 – Especificações do G-Code

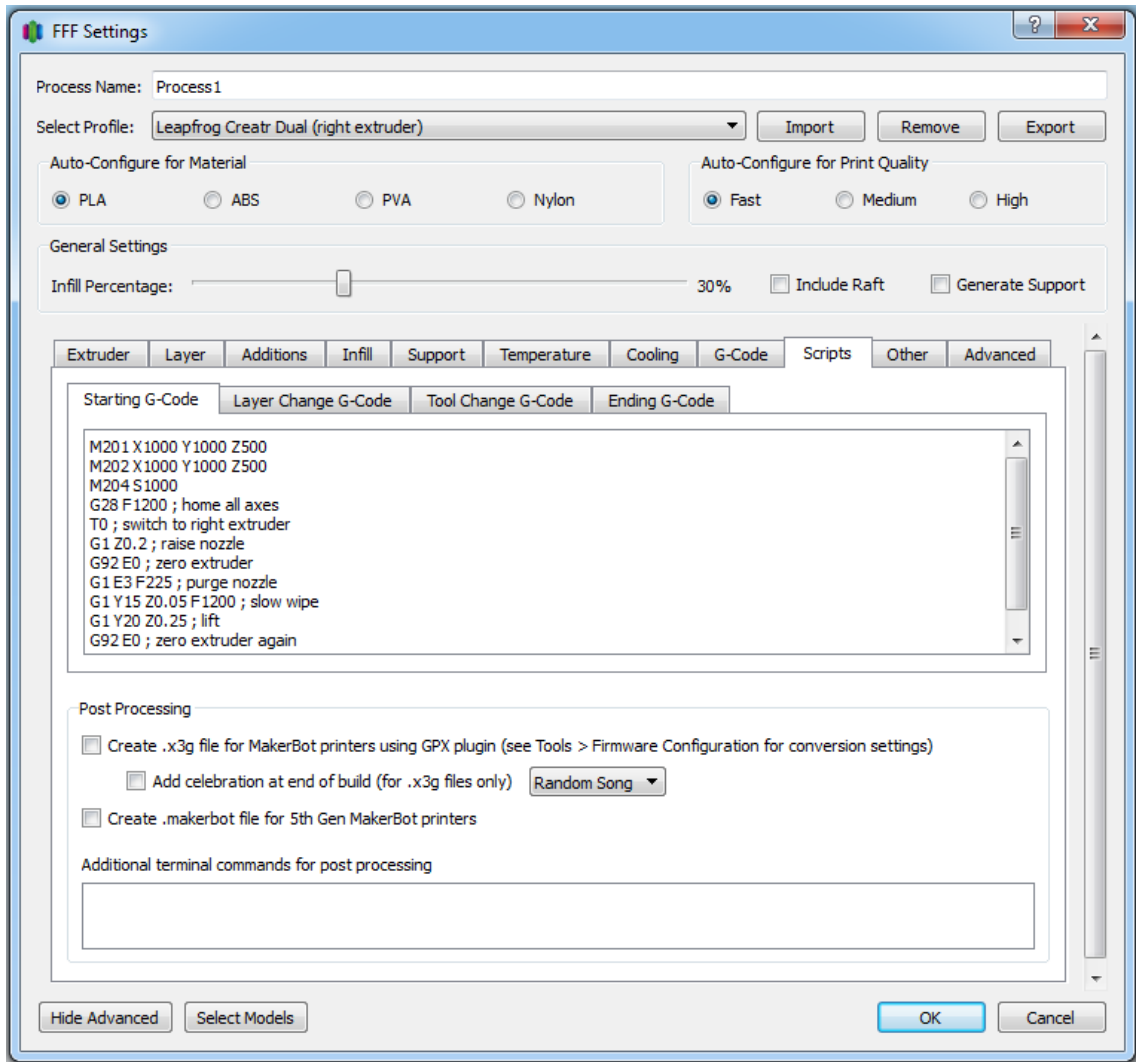


Figura 49 – Especificações do comando numérico

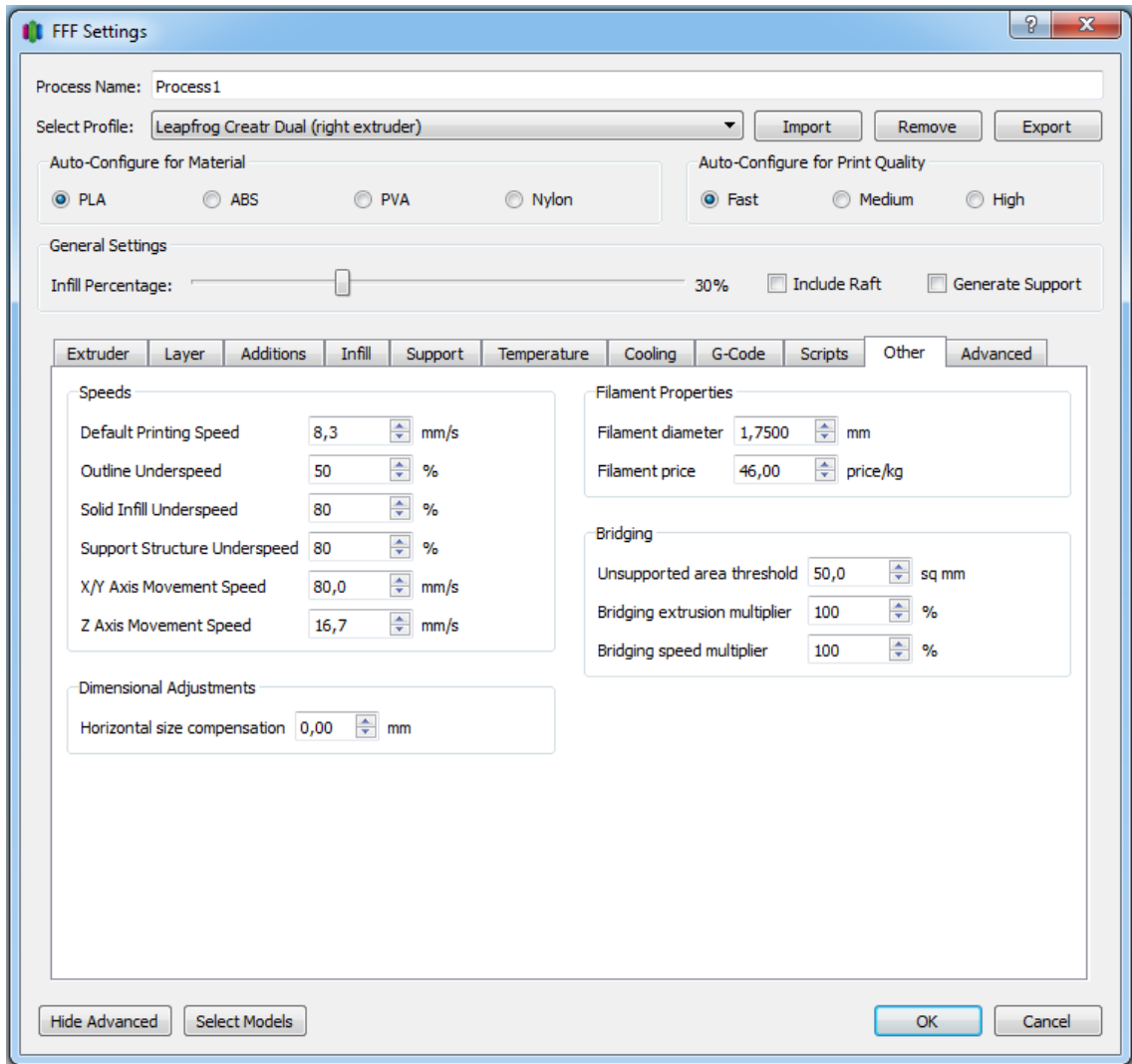


Figura 50 – Outras especificações

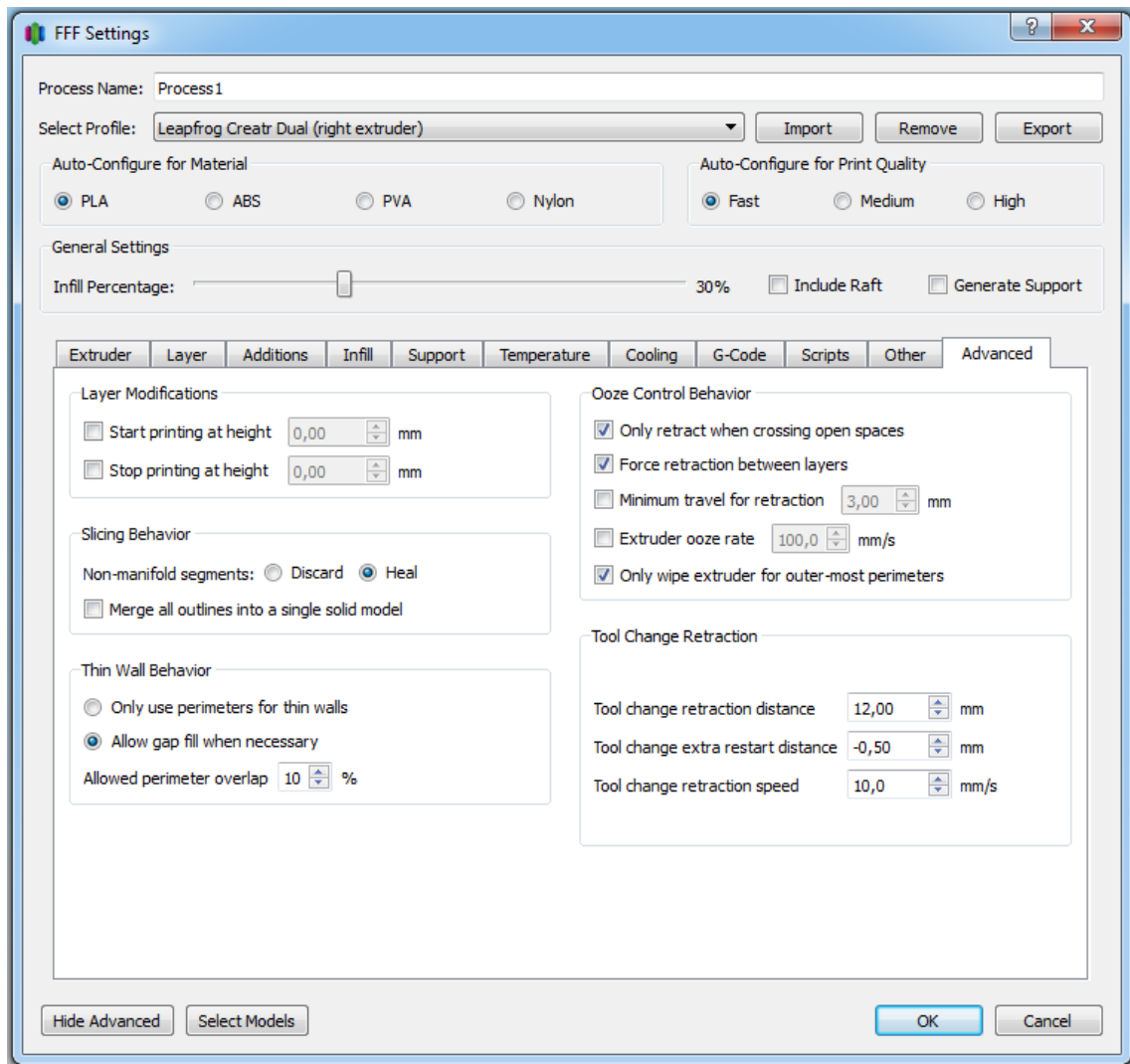


Figura 51 – Especificações avançadas

Especificações de Normal Qualidade Funcionamento

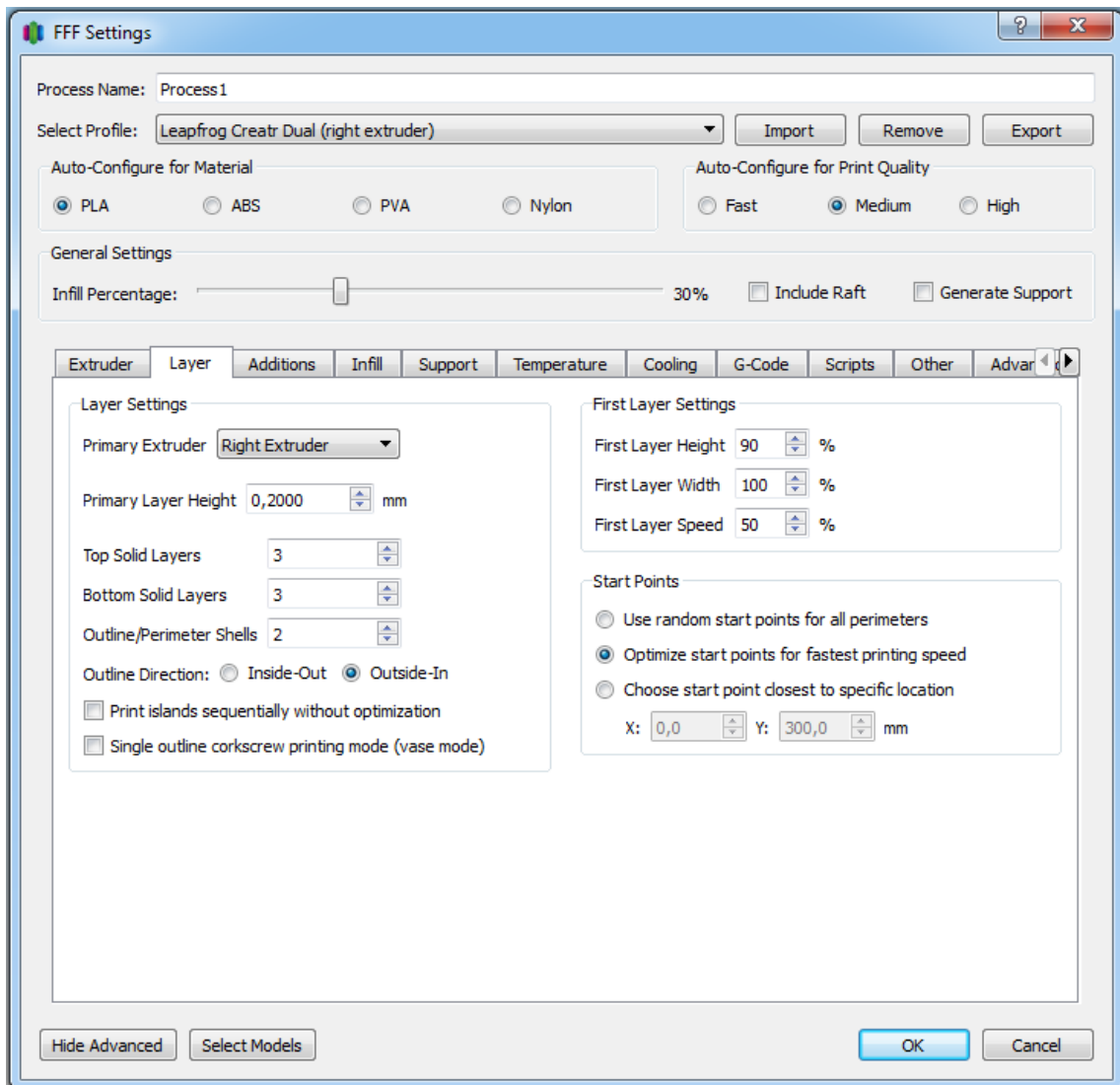


Figura 52 – Especificações da camada com qualidade normal

Especificações de Alta Qualidade de Funcionamento

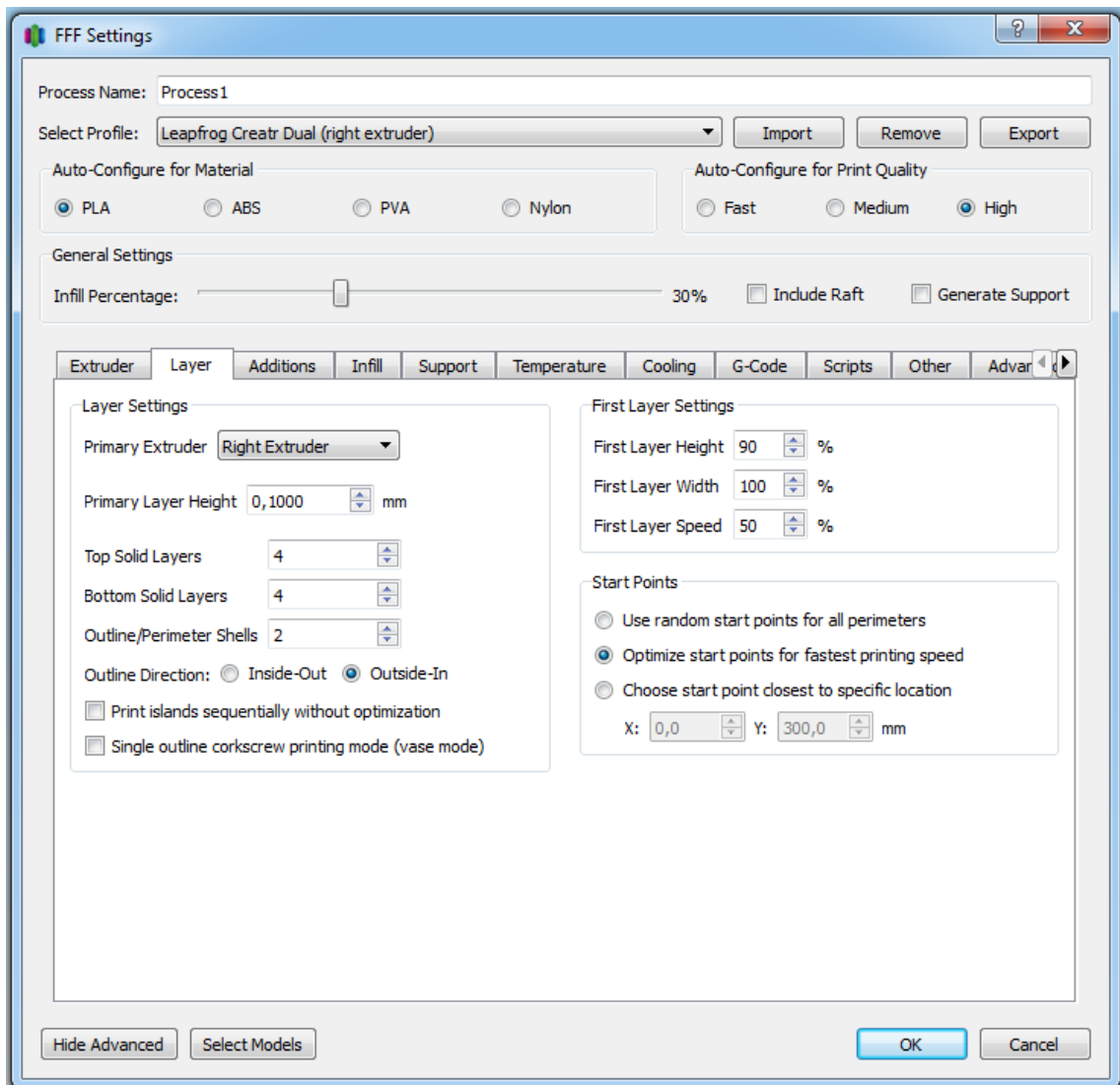


Figura 53 – Especificações da camada com qualidade alta

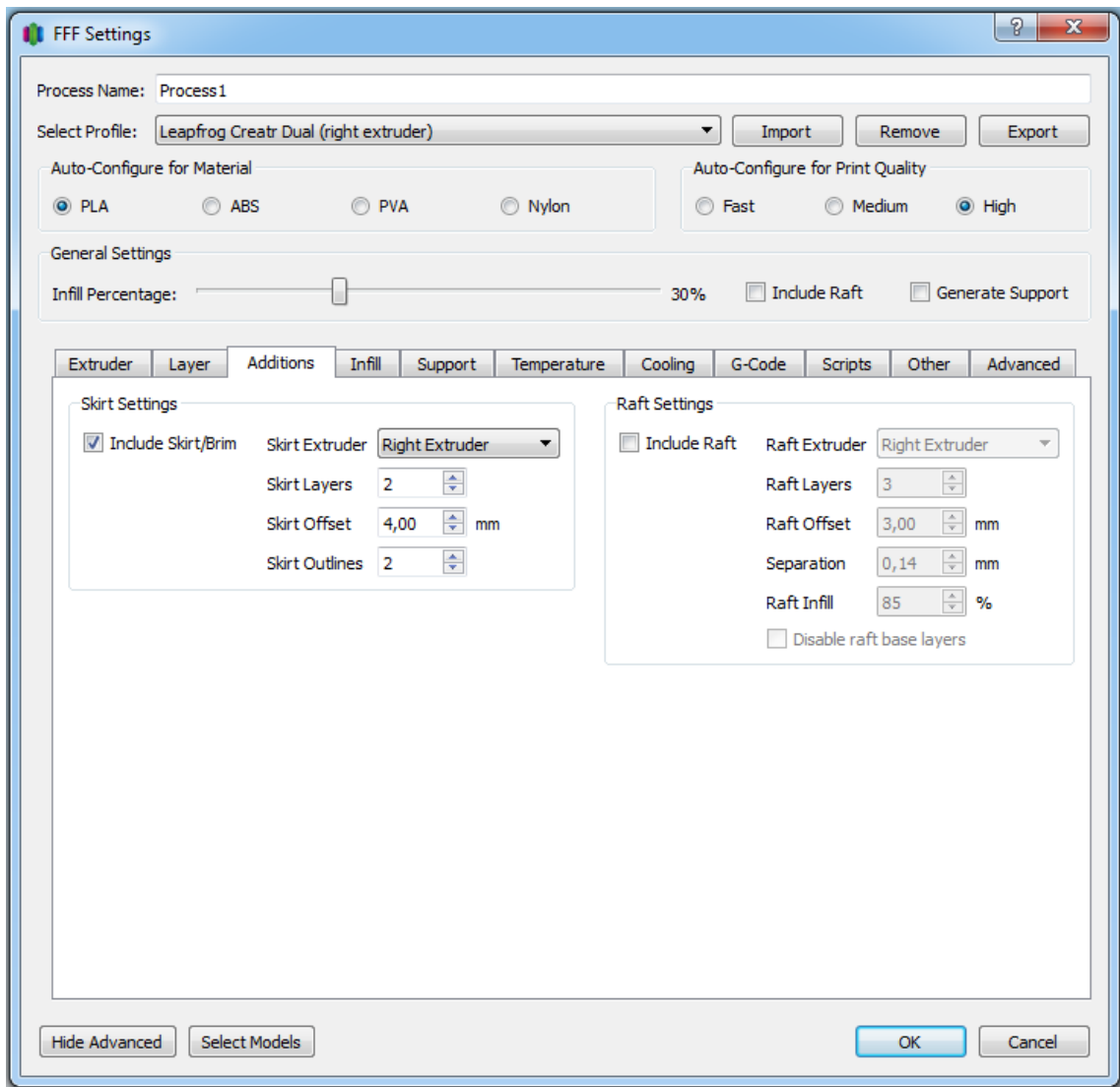


Figura 54 – Especificações adicionais com qualidade alta