



• U C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Aparas metálicas como matéria-prima para processos aditivos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Steel chips as raw material for additive manufacturing

Autor

Magda Carolina Pinto de Almeida

Orientadora

Maria Teresa Freire Vieira

Coorientadora

Renata Cláudio de Ataíde

Júri

	Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins
Presidente	Amaro Professora da Universidade de Coimbra
Vogal	Doutor André João Cavaleiro Leitão de Carvalho Investigador do INEGI
Orientadora	Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira Professora Catedrática da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2018

“How I wish
How I wish you were here
We're just two lost souls
Swimming in a fish bowl
Year after year
Running over the same old ground
What have we found?
The same old fears
Wish you were here”

Pink Floyd, "Wish You Were Here"

Para o meu avô.

Agradecimentos

Foi um percurso intenso e desafiador, não foi fácil, mas foi imensamente enriquecedor, a todos os níveis. Como em qualquer etapa da nossa vida, nunca estamos sozinhos, existem sempre as pessoas que nos acompanham, nos ajudam e que contribuem para o nosso sucesso, e é a essas pessoas que dirijo os seguintes agradecimentos:

Primeiramente, quero agradecer à **Professora Doutora Teresa Vieira**, pela transmissão de conhecimentos, por todo o apoio e orientação fornecidos ao longo da elaboração desta dissertação, e principalmente por me ter dado a oportunidade de fazer algo tão interessante e enriquecedor.

De seguida, quero agradecer à **Renata**, por todas as partilhas de conhecimento, principalmente no que toca ao manuseamento dos equipamentos, pelo acompanhamento ao longo deste percurso, pela disponibilidade infundável e por todo o apoio.

Ao **Fábio**, por todo o tempo disponibilizado para me ajudar, pelos ensinamentos de FDMet, e pelas sugestões e orientações ao longo dos últimos meses.

Ao **Sérgio**, por ter estado sempre disponível, qualquer que fosse o assunto, e pelos ensinamentos no que diz respeito aos tratamentos térmicos no forno.

Ao **Cristiano** e ao **Nuno**, por terem estado sempre disponíveis para ajudar, pelos conselhos e pela partilha de conhecimentos.

Ao **Daniel**, por todos os esclarecimentos e disponibilidade para ajudar.

À **Telma**, pela ajuda e transmissão de conhecimentos relativamente ao IFM.

Aos **colegas de laboratório**, pelos momentos de descontração e boa disposição partilhada.

Aos **meus pais**, a quem devo muito do que sou hoje, por nunca terem colocado barreiras no meu percurso, tanto académico como pessoal, pelos sacrifícios que fizeram por mim, por acreditarem nas minhas capacidades, por me motivarem, pelo apoio incondicional e por estarem sempre lá para mim. Sei que têm muito orgulho em mim.

À minha irmã, **Francisca**, por ser a pessoa especial que é, por ter aturado o meu mau feitio muitas vezes (foi mútuo), por estar sempre a uma chamada de distância, por todos os momentos ao longo da nossa vida, pelas gargalhadas, e por nunca ter deixado de me apoiar.

Ao **Brandon**, que partilhou todo este percurso académico comigo, pela pessoa maravilhosa que é, por tornar a minha vida mais fácil e descomplicada, e por cuidar tão bem de mim. Tenho muito orgulho em ti, como sei que tens em mim.

Aos meus avós, em especial ao meu **avô António**, por todo o apoio ao longo do meu percurso académico e por se ter orgulhado sempre de mim. Sei que agora também estaria muito orgulhoso.

Aos que puderam partilhar comigo a aventura que foram estes seis anos de vida académica, em especial à **Beatriz**, à **Gisela** e ao **Edgar**, por me terem acompanhado em todos os momentos, por terem sido uma fonte de apoio inesgotável e por terem tornado a minha vida mais colorida. É graças a vocês que esta cidade tem outro encanto para mim.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos de longa data, em especial à **Liliana**, por nunca me largar a mão, independentemente da distância.

MUITO OBRIGADA!

Resumo

Nas últimas décadas, tornou-se evidente a importância da sustentabilidade de processos no setor industrial, sendo que a reciclagem e valorização de resíduos industriais têm um papel fundamental nos dias de hoje.

O estudo detalhado de um resíduo e das suas características permite potenciar a sua valorização, transformando-o numa nova matéria-prima. É o caso das aparas metálicas de aço ferramenta (AISI H13), um resíduo proveniente de processos de corte a alta velocidade da indústria de moldes. Devido à deformação a que são sujeitas, possuem excelentes características, como a presença de partículas nanocristalinas, aliciantes para o meio industrial. Estas aparas, com elevada dureza, podem ser reduzidas a pó, e utilizadas em processos de pulverotecnologia, como o FDMet (do inglês *Fused Deposition of Metals*).

O objetivo principal deste estudo é avaliar a eficiência do pó de H13 proveniente de um resíduo da indústria de moldes (aparas de H13), no processo de FDMet, e comparar com pó H13 comercial.

A produção do pó de aparas H13 foi realizada através de um moinho de bolas, e para a produção de filamentos por FDMet recorreu-se a uma extrusora. Ambos os processos seguiram parâmetros já otimizados em outros estudos*.

No caso da mistura de pó de aparas H13 não foi possível produzir filamento com o diâmetro inicialmente pretendido, e conseqüentemente não foi possível avançar para a impressão 3D. No entanto, foi possível produzir pequenos filamentos, que possibilitaram a continuação do processo (etapas de remoção de ligante e sinterização). Após remoção total do ligante e sinterização das peças, houve contrações em todas as geometrias selecionadas. Na caracterização de peças, não foi possível fazer uma comparação direta entre o pó de aparas H13 e o pó comercial devido a complicações na impressão 3D. A peça produzida com pó H13 comercial apresenta elevada porosidade.

Palavras-chave: Aparas Aço H13, Maquinagem de Alta Velocidade, Resíduo, Moagem, FDMet.

* Vieira, M. T., Godinho, S., Farinha A. R., Fidelis, N. & Rosa, H. (2015). “Aparas metálicas de resíduo a matéria-prima”. O Molde: Inovação e Tecnologia- Revista da Cefamol, 107: 36-38.

Cerejo, F. J. S. (2018). “Desenvolvimento de filamentos para impressão 3D de peças de aço”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.

Abstract

In recent decades, the processes sustainability in the industrial sector has become relevant, with recycling and recovery of industrial waste taking an important role nowadays.

The detailed study of a residue and its characteristics enhances its recovery/valorization, transforming it into a new raw material. This is the case of the steel chips (AISI H13), a residue from high-speed cutting processes in the mold industry. Due to the deformation they are subjected, they have excellent characteristics, appealing to the industry, such as the presence of nanocrystalline particles. These chips, with great hardness, can be reduced to powder and used in processes of pulverotechnology, like FDMet (Fused Deposition of Metals).

The main goal of this study is to assess the efficiency of the H13 powder (residue from the mold industry residue) in FDMet and compare it with commercial H13 powder.

The production of the H13 chip powder was carried out in a ball mill and was used an extruder for the FDMet filaments production. Both processes were based on other studies*.

As for the H13 chips powder mixture it was not possible to produce filament with the desired diameter and, therefore, it was not possible to advance to 3D printing. However, it was possible to produce small filaments, allowing the process to continue (binder removal and sintering). After the binder removal and sintering, were identified contractions in all the pieces. It was not possible to make a direct comparison between H13 chip powder and commercial powder, due to complications in 3D printing. The pieces produced with commercial H13 powder present high porosity.

Keywords H13 Steel Chips, High Speed Machining, Waste, Milling, FDMet.

* Vieira, M. T., Godinho, S., Farinha A. R., Fidelis, N. & Rosa, H. (2015). “Aparas metálicas de resíduo a matéria-prima”. *O Molde: Inovação e Tecnologia- Revista da Cefamol*, 107: 36-38.

Cerejo, F. J. S. (2018). “Development of filaments for 3D Printing of steel parts”. *Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.

Índice

índice de figuras.....	vi
índice de tabelas.....	viii
Simbologia e siglas.....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas.....	ix
Introdução.....	1
1. Revisão Bibliográfica.....	3
1.1. Resíduos industriais.....	3
1.2. Aparas metálicas.....	4
1.2.1. Setor metalúrgico e metalomecânico.....	4
1.2.2. Conceito de maquinagem a alta velocidade.....	6
1.2.3. Estudos realizados sobre aparas.....	8
1.2.4. Quadro ambiental.....	9
1.2.5. Processamento do material.....	10
1.3. Fabricação aditiva.....	12
1.3.1. FDMet.....	14
2. Materiais e Métodos.....	18
2.1. Aparas H13.....	18
2.2. Produção do pó de aparas.....	19
2.3. Caracterização dos pós.....	21
2.3.1. Tamanho de partícula.....	21
2.3.2. Estrutura.....	21
2.3.3. Morfologia.....	22
2.3.4. Escoabilidade.....	23
2.4. Produção de peças (FDMet).....	24
2.4.1. Mistura.....	24
2.4.2. Produção do filamento.....	27
2.4.3. Impressão 3D.....	27
2.4.4. Remoção do ligante e sinterização.....	29
2.5. Caracterização das peças.....	30
2.5.1. Dimensões.....	30
2.5.2. Densidade.....	30
3. Resultados e discussão.....	32
3.1. Caracterização das aparas.....	32
3.2. Caracterização dos pós.....	34
3.2.1. Tamanho de partícula.....	34
3.2.2. Estrutura.....	35
3.2.3. Morfologia.....	36
3.2.4. Escoabilidade.....	37
3.3. Misturas.....	38
3.4. Produção de filamentos.....	39

3.5. Obtenção das peças verdes.....	40
3.6. Remoção de ligante e sinterização	42
3.7. Caracterização das peças finais.....	43
3.7.1. Dimensões das peças	43
3.7.2. Densidade	46
Conclusões.....	48
Trabalhos futuros.....	50
Referências Bibliográficas.....	51
ANEXO A- Fichas técnicas de materiais	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Tecnologia subtrativa [12].	5
Figura 1.2- Macrografia das aparas com presença de óxidos [11].	10
Figura 1.3-As diferentes etapas do processo de fabrico aditivo [31].	13
Figura 1.4- Esquema comparativo entre a tecnologia FDM TM e as técnicas FDMet e FDC [1].	15
Figura 1.5-Esquema representativo do processo de FDMet [1].	16
Figura 2.1- Moínho de bolas Pulverisette 6 Fritsch [37].	19
Figura 2.2-Equipamento Vibratory Sieve Shaker, Analysette 3, da Fritsch.	20
Figura 2.3-Flodex TM [44].	23
Figura 2.4- Equipamento Plastograph® Brabender GmbH & Co. KG.	26
Figura 2.5- Extrusora Brabender GmbH.	27
Figura 2.6- Impressora 3D BQ Prusa i3 Hephestos.	28
Figura 2.7- Geometria das peças: a) 100% de enchimento, b) 40% de enchimento, c) 30% de enchimento [1].	29
Figura 2.8- Equipamento YDB-03, da KERN [48].	31
Figura 3.1- Imagem das aparas à lupa (1000x).	32
Figura 3.2- Foto das aparas.	32
Figura 3.3- Foto das aparas antes de sofrerem qualquer tipo de tratamento.	33
Figura 3.4- Foto das aparas após tratamento térmico.	33
Figura 3.5- Análise granulométrica do pó de aparas H13.	34
Figura 3.6- Análise granulométrica do pó H13 comercial.	34
Figura 3.7- Difractograma de pó de aço ferramenta H13 comercial [39].	35
Figura 3.8- Difractograma de pó de aparas de aço H13.	35
Figura 3.9- Imagens SEM do pó de aparas H13 (200 e 20 μm , respetivamente).	36
Figura 3.10- Imagens SEM do pó H13 comercial (50 e 20 μm , respetivamente).	36
Figura 3.11- Comportamento do binário das misturas 1 e 2.	38
Figura 3.12- Foto do granulado M-01 (esq.) e M-02 (dir.).	39
Figura 3.13- Foto do filamento de M-01.	39
Figura 3.14- Foto da peça A1 (esq.) e A2 (dir.).	40
Figura 3.15- Foto das geometrias obtidas através da M-02.	41

Figura 3.16- Foto das peças após remoção do ligante (Peça B1 M-02 (esq.), peça A2 M-01 (centro) e peça B2 M-02 (dir.)).	42
Figura 3.17- Fotos das peças após remoção do ligante (Peça B1 M-02 (esq.), peça A2 M-01 (centro) e peça B2 M-02 (dir.)).	43
Figura 3.18- Foto da peça B1.	44
Figura 3.19- Foto da peça B2.	44
Figura 3.20- Peça A2 em verde (IFM).	45
Figura 3.21- Peça A2 sinterizada (IFM).	45
Figura 3.22- Imagem da peça A2 (MO) (50x).	47
Figura 3.23- Imagem da peça B2 (MO) (500x).	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1- Dureza das peças após sinterização produzidas com pó de H13 resultante de aparas e pó H13 comercial (injeção a baixa e alta pressão) [11].	8
Tabela 1.2- Resíduos gerados (em toneladas) por categoria de resíduos baseado no Regulamento Estatístico dos Resíduos (Regulamento CE n.º 2150/2002, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de novembro de 2002), de acordo com EWStat 3.0 [20].	9
Tabela 1.3- Formas possíveis das aparas (ISO 3685) [25].	11
Tabela 1.4- Classificação dos processos de fabrico aditivo e seus princípios e tecnologias [1, 30].	12
Tabela 2.1- Composição química típica do aço ferramenta H13 [36].	18
Tabela 2.2- Condições de moagem utilizadas [11].	19
Tabela 2.3- Constituintes do moinho utilizado e suas características.	20
Tabela 2.4- Valores da densidade de cada material [1] (Figura A.3- Anexo A).	25
Tabela 2.5- Misturas realizadas.	26
Tabela 3.1- Análise de escoabilidade.	37
Tabela 3.2- Parâmetros utilizados na impressão 3D.	41
Tabela 3.3- Peso da peças.	43
Tabela 3.4- Dimensões das peças de pó de aparas H13 e % de contração.	44
Tabela 3.5- Dimensões da peça de pó H13 comercial e % de contração.	46
Tabela 3.6- Valores das densidades e % de porosidade.	46

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

n – Número inteiro

λ – Comprimento de onda da radiação incidente

d – Distância entre planos incidentes

θ – Ângulo de incidência dos raios X

k – Coeficiente de atrito entre partículas

g – Aceleração da gravidade

r – Raio da abertura do disco

d_{pour} – Densidade

ρ – Densidade

m – Massa

V – Volume

P_{exp} – Peso expectável após sinterização

P_{verde} – Peso antes da remoção de ligante

% Aço – Percentagem de aço em peso na mistura

A – Massa da amostra “em seco”

B – Massa da amostra submersa em água

ρ_0 – Densidade da água em função da temperatura

Siglas

AISI- American Iron and Steel Institute

AM- Additive Manufacturing

ASTM- American Society for Testing and Materials

CAD- Computer Aided Design

CIP- Cold Isostatic Pressure

DIDP- Diisodecyl phthalate

EBAM- Electron Beam Additive Manufacturing

FAV- Fresagem a Alta Velocidade
FDC- Fused Deposition of Ceramics
FDMet- Fused Deposition of Metals
FDMTM- Fused Deposition Modelling
HIP- Hot Isostatic Pressure
HSC- High Speed Cutting
HSM- High Speed Machining
HSM- High Speed Milling
ICDD- International Center of Diffraction
IFM- Infinite Focus Microscope
IPN- Instituto Pedro Nunes
IUPAC- International Union of Pure and Applied Chemistry
LENS- Laser Engineered Net Shaping
LER- Lista Europeia de Resíduos
LOM- Laminated Object Manufacturing
MAV- Maquinagem a Alta Velocidade
MJM- Multi Jet Modeling
MO- Microscópio Ótico
PIM- Powder Injection Molding
POM- Polyoxymethylene
SDS- Shaping, Debinding and Sintering
SEBS- Styrene- Ethylene- Butylene- Styrene
SEM- Scanning Electron Microscopy
SL- Stereolithography
SLM- Selective Laser Melting
SLS- Selective Laser Sintering
TPE- Thermoplastic Elastomer
XRD- X-ray diffraction
3D- Três Dimensões
3DP- Impressão 3D

INTRODUÇÃO

Num mundo em constante desenvolvimento e carente de sustentabilidade é cada vez maior a procura de “novas” matérias-primas, assentes no conceito de economia circular.

A indústria de moldes, incluída no setor metalúrgico e metalomecânico, tem por base processos subtrativos, onde é removido o material indesejado até se atingir a forma pretendida do molde. Estes processos levam à produção de elevadas quantidades de resíduos, que se convertem num grave problema ambiental.

As operações de maquinagem de aços ferramenta, frequentemente utilizados na indústria de moldes, são operações de corte de alta velocidade, de onde resultam toneladas de resíduos de aparas metálicas. As aparas, objeto de estudo deste trabalho, de elevada dureza, tornam-se interessantes do ponto de vista da valorização do resíduo, devido à possibilidade da sua moagem, transformando-as em pó. Desta forma, é possível criar uma nova matéria-prima para, por exemplo, processos de pulverotecnologia², contribuindo para a minimização dos impactes ambientais resultantes do fabrico de moldes.

A pulverotecnologia tem assumido, cada vez mais, um papel relevante na produção de peças metálicas, devido à popularidade dos processos aditivos (processos de produção camada a camada). Em particular, a tecnologia FDMet (do inglês *Fused Deposition of Metals*), possibilita a produção de filamentos, a partir de misturas de pós metálicos e diferentes componentes poliméricos, semelhantes às que são utilizadas pela tecnologia PIM (do inglês *Powder Injection Molding*). A conformação da peça é feita através do processamento dos filamentos por uma impressora 3D, em plataforma livre.

A técnica FDMet, ainda que recente, tem várias vantagens, quando comparada com outras tecnologias relevantes para o fabrico de componentes metálicos, como o PIM e o SLM (do inglês *Selective Laser Melting*): não precisa de moldes, processo mais simples, máquinas de tamanho reduzido, fabrico menos dispendioso, entre outras [1]. Do ponto de vista ambiental, é um processo bastante benéfico, pois é uma tecnologia limpa, ou seja, contribui para a redução dos impactes ambientais, através da diminuição do consumo de matérias-primas e de energia durante o ciclo produtivo. Não utiliza nenhum tipo de laser e, mais

² Pulverotecnologia- Metalurgia do pó.

importante, é um processo onde não existe desperdício de material (ou o desperdício de material é mínimo), contribuindo para uma redução da geração de resíduos.

Os estudos reportados na bibliografia sobre FDMet são recentes e escassos. Com base no enorme potencial desta técnica, será de elevado interesse todos os estudos que possam contribuir para a afirmação deste processo aditivo de materiais metálicos. O presente estudo é particularmente interessante dado que o material metálico utilizado provém de um resíduo. Atualmente, não existe qualquer estudo publicado, relativamente ao FDMet, por esta abordagem.

O pó de aços ligados, como os aços ferramenta e os inoxidáveis, são os materiais mais utilizados na indústria, mas possuem um custo bastante elevado, quando comparado com o do mesmo material em maciço. Neste contexto, a transformação das aparas em pó, também poderá contribuir para um decréscimo significativo dos custos associados à matéria-prima de processos aditivos.

No contexto da fabricação aditiva (AM do inglês *Additive Manufacturing*), adicionalmente à seleção do tipo de aço ligado que se pretende utilizar, é necessário a caracterização do pó. Este procedimento é crucial, pois terá repercussões nas etapas de fabrico posteriores, independentemente da seleção dos melhores equipamentos/parâmetros.

A caracterização do pó teve por base a metodologia de avaliação dos 4S's³, que se baseia no estudo do tamanho e distribuição granulométrica das partículas, morfologia e da estrutura do pó.

Em suma, este trabalho estuda a aplicação de aparas de aço ferramenta temperado (AISI⁴ H13), provenientes de operações de corte a alta velocidade, na produção de componentes metálicos pela tecnologia FDMet. É também realizada uma comparação com peças produzidas por pó comercial H13, com o objetivo de apurar se é possível substituir um material dispendioso, por um proveniente da valorização de um resíduo industrial.

Esta dissertação está dividida em três partes: revisão bibliográfica, onde estão discriminados os conteúdos essenciais para uma melhor compreensão do tema; metodologia utilizada na produção do pó metálico e das peças finais; resultados e discussão; e conclusões e trabalhos futuros.

³ 4S's- Particle Size, Size particle distribution, Shape, Structure.

⁴ AISI- Norma utilizada para classificação de aços, pela American Iron and Steel Institute

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica que aborda o aproveitamento de um resíduo gerado na maquinagem de alta velocidade (aparas metálicas) e a sua valorização através de processos aditivos (FDMet).

1.1. Resíduos industriais

Nas últimas décadas, com a intensificação das atividades económicas e o aumento da pressão sobre os recursos naturais é notória uma crescente preocupação com o meio ambiente. Neste contexto, é de salientar a importância das políticas relacionadas com o ambiente, sendo hoje indissociáveis de um equilibrado desenvolvimento social e económico [2].

O setor industrial contribui com uma quantidade elevada de resíduos produzidos, sendo que as empresas têm a responsabilidade de fazer a sua gestão: recolha, transporte, tratamento (se necessário), e encaminhamento para o destino final [3].

Segundo a Diretiva 2008/98/CE, um resíduo é qualquer substância ou objeto, que o detentor se desfaz ou tem intenção/obrigação de se desfazer. Neste sentido, resíduos com potencial de valorização, podem, em alguns casos, tornar-se matérias-primas desperdiçadas.

Ao contrário do que é constatado em países mais desenvolvidos, a introdução do conceito de prevenção da poluição na estratégia de gestão dos resíduos industriais, encontra-se num nível primário em Portugal [4]. Na realidade, as empresas têm consciência sobre o tratamento de resíduos, mas, até há bem pouco tempo, tal atividade representava custos adicionais insuportáveis. Muitas vezes, também só se focavam no tratamento de fim de linha [3-5]. Atualmente, a prevenção e gestão de resíduos toma um papel mais importante, como meio de dar continuidade ao ciclo de vida de materiais, sendo um passo fundamental no desenvolvimento de materiais e energias úteis à economia [2]. Esta alteração de mentalidade deve-se ao estabelecimento de medidas e metas, tanto de redução da produção de resíduos como da diminuição de resíduos eliminados, que levam ao decréscimo de custos associados à sua gestão [6].

As empresas que possuem uma boa rede de gestão de resíduos, através do devido encaminhamento, tratamento, reaproveitamento e incorporação no processo, podem tornar-se mais competitivas [3-5].

Os resíduos podem ser, tipicamente, divididos em duas grandes categorias: perigosos e não perigosos. Caso não o sejam, podem ser utilizados como matéria-prima num processo. Neste contexto, têm sido adotadas alternativas relativas ao fim de vida dos resíduos quando é provado que têm valor para serem utilizados como matéria-prima, no mesmo processo que os originou ou noutra. Assim, a reciclagem e a valorização de resíduos tornam-se opções importantes, que permitem o decréscimo da deposição de resíduos em aterro, reduzindo os impactes associados a esta operação.

A ecologia industrial, que assenta nos princípios de economia circular, tem como objetivos a minimização da utilização de matérias-primas virgens, a redução da geração de resíduos, reintrodução de material no ciclo produtivo, a minimização de desperdícios e a valorização de resíduos cuja produção é inevitável. Desta forma, existe uma gestão eficiente e sustentável dos resíduos, onde é promovido o fecho do ciclo de vida dos materiais e o aumento da produtividade dos recursos [2]. Graças a esta metodologia é, ainda, possível a redução de custos com matérias-primas virgens e a diminuição de custos associados à deposição, transporte e/ou tratamento dos resíduos [7].

No sentido de atingir um setor industrial mais sustentável, a eliminação de resíduos deve ser sempre a última solução aplicada em gestão ambiental industrial [4]. Assim, o futuro sustentável da indústria passa pela transformação de resíduos em matérias-primas.

1.2. Aparas metálicas

1.2.1. Setor metalúrgico e metalomecânico

Dos vários resíduos metálicos produzidos pelo setor industrial (limalhas, aparas, chapas, etc.), é nas indústrias metalúrgicas e metalomecânicas que se produzem maiores quantidades destes resíduos [8].

O setor metalúrgico e metalomecânico é um setor muito heterogéneo, que integra um conjunto alargado de atividades industriais e diversidade de produtos, desde a metalurgia de base aos equipamentos elétricos e não elétricos, contribuindo expressivamente para a produção de resíduos [7].

No setor referido está incluído o fabrico de moldes metálicos para injeção de plástico, onde Portugal desempenha um papel importantíssimo, sendo um dos principais fabricantes a nível mundial [9]. Com o passar dos anos, esta indústria tem revelado uma elevada capacidade de inovação e adaptação às evoluções e mudanças, tanto ao nível das tecnologias, como dos produtos e mercados. Para garantir fatores de competitividade elevada é fundamental a qualidade do molde produzido, níveis de produtividade que permitam custos de produção reduzidos e uma capacidade de desenvolvimento, fabrico e montagem de moldes em períodos de tempo mais curtos [10].

A principal indústria servida por o setor dos moldes é a indústria automóvel, onde a procura por novos materiais, de tamanho reduzido, e com características excecionais é recorrente. Também outras indústrias beneficiam deste setor, desde a aeronáutica à dos dispositivos médicos [9].

Os principais processos utilizados no fabrico de moldes baseiam-se em tecnologias subtrativas (corte por arranque de apara), onde é removido o material indesejado até se atingir a forma do molde pretendida, gerando uma elevada quantidade de aparas metálicas (Figura 1.1) [11]. O corte por arranque de apara pode resultar de diversas formas de maquinação: torneamento, fresagem, furação, etc. [6].



Figura 1.1- Tecnologia subtrativa [12].

Estas aparas metálicas, provenientes de aços duros, devido aos processos a que estão sujeitos, como o corte de alta velocidade, são diferentes das aparas resultantes de processos de corte convencional. Nos processos convencionais com baixa velocidade de corte, atingem-se temperaturas mais elevadas na formação da apara devido ao período de tempo em que a ferramenta está em contacto com o material a maquinar. Contrariamente, na maquinação a alta velocidade o tempo de contato é muito reduzido, estando a apara sujeita a temperaturas mais baixas, e atingindo-se elevadas taxas de deformação do material [6].

É possível atingir baixas temperaturas devido à percentagem de calor que a apara consegue dissipar, ou seja, a alta velocidade não permite que o calor seja transferido para todo o material [10]. A deformação induzida pelo corte, resulta em aparas de reduzida dimensão, e contribui para a sua nanocristalinidade [6]. Na maquinagem de aços endurecidos é necessária uma aresta de corte resistente ao desgaste por abrasão, estável quimicamente e de elevada dureza a quente [10].

Devido ao tamanho das partículas e sua microestrutura, elemento central que determina as propriedades mecânicas do material [13], as aparas resultantes de processos de maquinagem a alta velocidade tomam grande importância em processos de microfabricação. As aparas convencionais, por possuírem um baixo valor comercial são enviadas para fundição, processo simples e prático, onde grande parte do material é recuperado para ser reutilizado nos processos de produção, sendo que apenas uma pequena parte do material se perde devido a fenómenos de oxidação. Durante a fundição, existe mudança do estado físico do material, ocorrendo um aumento do tamanho de grão durante o arrefecimento, que degrada as propriedades mecânicas. Esta técnica é bastante dispendiosa devido aos gastos energéticos, e não oferece benefícios no que diz respeito às propriedades mecânicas [6]. Quando não existe a refusão das aparas, estas são vendidas a sucateiros ou, quando contaminadas, acabam, na maioria das vezes, em aterros [14].

1.2.2. Conceito de maquinagem a alta velocidade

A maquinagem a alta velocidade surge geralmente na literatura como High Speed Machining (HSM), mas existem outras designações: High Speed Cutting (HSC) ou High Speed Milling (HSM). Em Portugal, são utilizadas as designações correspondentes: Maquinagem a Alta Velocidade (MAV) e a Fresagem a Alta Velocidade (FAV). No entanto, a utilização do termo fresagem apenas direciona para uma das vertentes da maquinagem a alta velocidade, sendo que esta tecnologia também é aplicada noutros processos como furação, torneamento e roscagem [15].

O setor industrial está constantemente exposto à competição internacional, e requer investimentos elevados, tanto em equipamento como em ferramentas, com o objetivo de atingir processos produtivos eficientes, redução de custos e de tempos de produção, e aumento da produtividade, sem descuidar a gestão ambiental [10].

A recente evolução significativa dos processos e ferramentas de maquinagem permite, agora, velocidades de corte bastante elevadas e um melhor desempenho. Ainda, o aparecimento de ferramentas motorizadas permitiu a combinação de operações de torneamento e fresagem na mesma máquina.

Existem duas condições básicas e fundamentais na HSM, as elevadas velocidades de rotação e de avanço, que estão condicionadas pelo tipo de operação, geometria da peça, material, e respetivo tratamento térmico, caso exista [15].

A HSM, é assim uma tecnologia com um papel fundamental na indústria produtora de moldes, principalmente na maquinagem de superfícies complexas sobre materiais endurecidos, e que permite superar restrições relativas ao aumento de produtividade e de redução da geração de resíduos [10].

As vantagens mais significativas da utilização desta tecnologia na indústria de moldes, são as apresentadas de seguida [10] [15]:

- melhoria da qualidade superficial da peça e maior precisão dimensional;
- aumento da produtividade das operações (aumento da taxa de remoção de material, redução dos tempos de maquinagem, e existência de um melhor controlo do processo);
- melhor gestão dos processos (redução ou eliminação de processos indiretos e matérias-primas, redução ou eliminação de processos manuais de acabamento final e redução ou eliminação de outros processos tecnológicos);
- criação de medidas e metodologias relacionadas com a diminuição da geração de resíduos.

Segundo Custódio, P. M. e Selada, A. (2013), “mais eficaz do que tratar resíduos é a utilização de tecnologias mais limpas”. Assim, a HSM consegue conciliar o aumento da produtividade e qualidade com a redução ou até mesmo eliminação de resíduos, tornando-se uma tecnologia que respeita os sistemas ecológicos, ao contrário da maioria dos processos convencionais [10].

1.2.3. Estudos realizados sobre aparas

Os estudos relacionados com aparas de aço são vários, nomeadamente, de aparas de aço inoxidável austenítico (316L) e de aço ferramenta (H13), com a finalidade da sua valorização. Desta forma, já existe uma caracterização detalhada e análise da viabilidade da sua reciclagem, dado serem boas candidatas a matérias-primas devido às suas características únicas. As aparas de aço foram moídas e transformadas em pó, para posterior consolidação ou comparação com pó comercial [11, 16-17]. Na Tabela 1.1 estão resumidos os principais resultados de uma comparação, em termos de dureza, entre peças resultantes de pó de aparas e de pó comercial após sinterização⁵. É possível observar valores de dureza similares entre os pós [11].

Tabela 1.1- Dureza das peças após sinterização produzidas com pó de H13 resultante de aparas e pó H13 comercial (injeção a baixa e alta pressão) [11].

<i>Condição de injeção</i>	Baixa Pressão	Alta Pressão
<i>Pó de apara</i>	157 HV _{0.25}	218 HV _{0.25}
<i>Pó comercial</i>	194 HV _{0.25}	193 HV _{0.25}

Num outro estudo o objetivo foi encontrar um processo de substituição à sinterização convencional de pós, onde o crescimento de grãos é muito significativo devido à temperatura utilizada ser elevada [16]. O processo encontrado foi a consolidação dinâmica dos pós com recurso a explosivos, onde a energia que é transmitida ao pó a uma pressão elevada, num período de tempo extremamente reduzido, leva por efeito de atrito à ligação entre as partículas. Desta forma, não existem efeitos significativos associados à temperatura, havendo possibilidade de contornar o problema do crescimento descontrolado de grão, e obter um material consolidado com propriedades acrescidas [6] [16].

Dos estudos realizados, constatou-se que as aparas de aço podem funcionar como matéria-prima na produção de nanomateriais, para aplicação na microfabricação, devido às suas propriedades submicrométricas ou nanométricas, levando a crer que são adequadas para processos aditivos [11] [14].

Além dos estudos de aparas de aço, existem outros sobre materiais resultantes da maquinagem a alta velocidade, como cobre, ligas de alumínio e titânio. Em todos os casos,

⁵ Sinterização- Operação que consiste na aglomeração e compactação de pós a elevadas temperaturas, para obtenção de peças sólidas. Processo que consiste na diminuição da superfície específica de pós por ação da pressão e da temperatura, conduzindo à formação de um sólido.

houve formação de grãos submicrométricos ou mesmo nanométricos e, conseqüentemente, aumento da dureza, características cada vez mais desejadas [18-19].

1.2.4. Quadro ambiental

As aparas metálicas utilizadas neste estudo estão incluídas na categoria de “resíduos metálicos ferrosos (não perigosos)”. Segundo dados europeus, entre 2008 e 2012 foram produzidas 5 310 693 toneladas deste tipo de resíduos (Tabela 1.2).

Tabela 1.2- Resíduos gerados (em toneladas) por categoria de resíduos baseado no Regulamento Estatístico dos Resíduos (Regulamento CE n.º 2150/2002, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de novembro de 2002), de acordo com EWCStat 3.0 [20].

<i>Categoria de resíduo</i>	2008	2009	2010	2011	2012	Total
<i>Resíduos metálicos ferrosos (não perigosos)</i>	1 024 479	995 951	1 097 334	1 163 794	1 029 135	5 310 693

Portugal é um país com enorme potencial em recursos minérios metálicos, imprescindíveis à indústria metalomecânica, e um dos maiores produtores de tungsténio, cobre e zinco. No que diz respeito ao ferro e à realidade nacional, a qualidade não corresponde à quantidade. Portugal, como o resto da Europa, está dependente do exterior para obter recursos minerais essenciais para a indústria. Assim sendo, a reciclagem torna-se uma solução para contornar esta dependência, e uma forma de gerir os resíduos produzidos [14].

Num contexto ambiental, no sentido de existir informação disponível sobre os resíduos, foi criada a Lista Europeia de Resíduos (LER), que compila a sua origem e composição. Esta lista agrupa resíduos de acordo com a atividade geradora de resíduos, como industrial, urbana, agrícola e hospitalar, ou por tipo de processos [21].

Nem todas as substâncias ou matérias presentes na LER constituem um resíduo, pois só se atribui a natureza de resíduo se o detentor se desfizer desta, ou tiver a intenção ou obrigação de o fazer [21].

As aparas metálicas ferrosas, estão inseridas no código LER 12 01 01- aparas e limalhas de metais ferrosos [22], e, segundo a Diretiva 2006/12/CE pertencem à categoria de resíduos Q10, correspondente a resíduos de maquinagem ou acabamento.

Para cada tipo de resíduo existem operações de valorização e eliminação específicas. No caso das aparas metálicas, podem ser aplicadas as operações de valorização R3⁶ e R4⁷, e as operações de eliminação D1⁸ e D9⁹ [23-24].

1.2.5. Processamento do material

As aparas (resíduo), antes de serem utilizadas em processos de pulverotecnologia, devem ser avaliadas e caracterizadas. Pode ser necessário recorrer a tratamentos prévios derivados de potenciais contaminações provenientes do local que lhes deu origem. Muitas vezes as aparas exibem uma cor azulada, indicando a presença de óxidos (Figura 1.2). A forma variada que apresentam (Tabela 1.3), depende dos parâmetros da sua produção [11].



Figura 1.2- Macrografia das aparas com presença de óxidos [11].

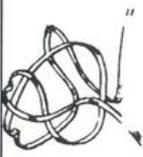
⁶R3- Reciclagem/recuperação de substâncias orgânicas não utilizadas como solventes (incluindo digestão anaeróbia e ou compostagem e outros processos de transformação biológica).

⁷R4- Reciclagem/recuperação de metais e compostos metálicos.

⁸D1- Depósito no solo, em profundidade ou à superfície (como por exemplo em aterro).

⁹D9- Tratamento físico-químico não especificado (p. ex. evaporação, secagem ou calcinação).

Tabela 1.3- Formas possíveis das aparas (ISO 3685) [25].

1 Ribbon chips ¹⁾	2 Tubular chips ¹⁾	3 Spiral chips	4 Washer-type helical chips ¹⁾	5 Conical helical chips ¹⁾	6 Arc chips ²⁾	7 Elemental chips	8 Needle chips
1.1 Long 	2.1 Long 	3.1 Flat 	4.1 Long 	5.1 Long 	6.1 Connected 		
1.2 Short 	2.2 Short 	3.2 Conical 	4.2 Short 	5.2 Short 	6.2 Loose 		
1.3 Snarled 	2.3 Snarled 		4.3 Snarled 	5.3 Snarled 			

O estado de oxidação, a forma e o tamanho são características importantes que devem ser devidamente consideradas quando se caracteriza as aparas. Caso apresentem um estado de oxidação elevado, e uma forma e tamanho não adequados à sua aplicação em pulverotecnologia, deve ser aplicado o correto tratamento. Este tratamento poderá passar por um processo relativamente económico e viável: moagem em atmosfera controlada com argon hidrogenado. Este método contribuiu na minimização da oxidação, de onde resultam partículas mais arredondadas, com um fator de forma próximo de 1, e com uma dimensão compatível com os processos aditivos. Este tipo de tratamento é possível devido à elevada dureza das aparas [11] [26].

Na moagem deve ser feita a otimização da velocidade de rotação, do tempo de moagem e do rácio bolas/massa de aparas, com base nas características pretendidas.

Durante a moagem as partículas sofrem deformação plástica, que leva ao refinamento de grão [11]. Com a diminuição do tamanho de grão é possível atingir maior resistência, dureza e ductilidade, logo maior dificuldade de rotura [26].

1.3. Fabricação aditiva

A fabricação aditiva (AM do inglês *Additive Manufacturing*), ou impressão 3D, tem sido vista como uma área incontornável da mais recente revolução industrial, a indústria 4.0, sendo cada vez maior o número de indústrias que recorrem a este tipo de tecnologia [1, 27-28]. A AM reúne um conjunto de tecnologias modernas que se definem como processos de junção de materiais, para criar objetos a partir de modelos 3D, geralmente camada a camada, ao contrário do que é aplicado em processos de fabricação subtrativa [27] [29].

Em 2010, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), classificou os processos de fabrico aditivo em sete tipos, de acordo com a ASTM-Standard F2792 (Tabela 1.4) [1].

Tabela 1.4- Classificação dos processos de fabrico aditivo e seus princípios e tecnologias [1, 30].

Categoria	Princípio	Tecnologia
<i>Jato ligante</i>	Um agente ligante líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó	3D Printing (3DP)
<i>Deposição de energia direta</i>	Energia térmica concentrada utilizada para fundir os materiais enquanto estes são depositados (revestimento a laser)	Deposição de metal a laser (LMD/LENS) Fabrico aditivo por feixe de eletrões (EBAM)
<i>Extrusão de material</i>	O material é distribuído seletivamente através de um bocal ou orifício	Modelação por extrusão de material (FDM; FDMet; FDC)
<i>Jato de material</i>	Gotículas de material são depositadas seletivamente	Modelação por jato múltiplo (MJM)
<i>Fusão em camadas de pó</i>	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS) Fusão seletiva a laser (SLM) Fusão por feixe de eletrões (EBM)
<i>Laminação de folhas</i>	Folhas de material são ligadas para formar um objeto	Fabricação de objetos por camadas (LOM)
<i>Fotopolimerização em tina</i>	Um fotopolímero líquido colocado numa tina é seletivamente polimerizado através de ativação por luz	Estereolitografia (SL)

Este conjunto de tecnologias aditivas permitem a fabricação de componentes 3D com características geométricas diferenciadas. A AM é economicamente mais vantajosa para a fabricação de geometrias complexas, mesmo quando estas são exequíveis por processos convencionais, por ser um processo de fabricação rápida e de desperdício praticamente nulo. Esta tecnologia possibilita também o fabrico de geometrias extremamente complexas

impossíveis de obter por outras tecnologias. Por exemplo, a tecnologia SLM é atualmente utilizada pelos fabricantes de moldes para obter insertos metálicos com canais de refrigeração conformáveis, colocando seletivamente material, e eliminando a reprodução de defeitos na peça plástica [27].

A conceção de uma peça fabricada por AM inicia-se com um modelo CAD (*Computer Aided Design*) em 3D. Este modelo digital é, posteriormente, dividido em camadas, através de softwares específicos, possibilitando a sua construção camada a camada (Figura 1.3) [27].

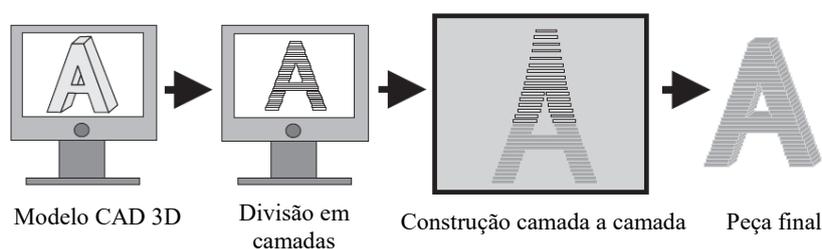


Figura 1.3-As diferentes etapas do processo de fabrico aditivo [31].

Uma das principais vantagens da AM, é o facto de não necessitar de moldes, acessórios ou ferramentas, diminuindo drasticamente o tempo de produção da peça [27]. Mais, as impressoras 3D têm agora a capacidade de criar sistemas multimateriais, ou seja, ao longo de um único componente, as propriedades (p. ex. dureza ou resistência à corrosão) podem ser definidas nas áreas onde necessitará o componente.

Desta forma, a AM engloba três conceitos essenciais para uma ideia revolucionária: universal, prática e eficiente [28].

Um estudo realizado pela *European Aeronautic Defence* em conjunto com a *Space Company Innovation Works* e com o *EOS Innovation Center*, demonstrou que a AM é capaz de reduzir o consumo de matérias-primas até 75,4%. Esta tecnologia apresenta, ainda, grande potencial no que diz respeito à poupança energética e à redução da pegada de carbono, quando comparada com processos convencionais (processos subtrativos) [27].

Também foram comparados processos aditivos com os de maquinaria convencional, no que diz respeito aos impactes cumulativos nos recursos, qualidade do ecossistema e na saúde humana, considerando os efeitos de extração de matéria-prima, produção de pó, transporte, produção do componente e reciclagem. Os resultados indicam que a AM tem um impacte ambiental total 70% menor que a maquinaria convencional [27].

Em 1992, Scott Crump, da Stratasys Inc., desenvolveu uma tecnologia que se baseia na utilização de filamentos para produção aditiva de componentes poliméricos, o FDM™ (do inglês *Fused Deposition Modelling*) [1] [32].

Esta tecnologia veio revolucionar a indústria aditiva de objetos poliméricos 3D. Atualmente, está implementada na indústria, como uma ferramenta para a validação da concepção dos produtos, ou seja, fabricação rápida de protótipos, mas também como produção contínua. O aumento da popularidade desta tecnologia está relacionado com a variedade e baixo custo dos materiais poliméricos e, o facto de ser um processo simples [1] [33].

A fabricação aditiva por FDM™ preconiza o processamento de um filamento polimérico através de um bico de extrusão, numa plataforma livre, camada a camada. Os contornos geométricos da peça, tal como a altura da camada, são reproduzidos pelo equipamento de acordo com a informação contida no ficheiro 3D concebido. A cabeça de impressão move-se ao longo do eixo vertical Z, o que permite controlar a espessura da camada, e a base do equipamento move-se ao longo dos eixos X e Y [1].

1.3.1. FDMet

Com base na tecnologia FDM™ surgiram duas técnicas: a FDC (do inglês *Fused Deposition of Ceramics*), para o fabrico de componentes cerâmicos, e a FDMet, para o fabrico de componentes metálicos funcionais. No último caso, os filamentos são constituídos por pó metálico disperso num sistema orgânico, denominado de ligante [1].

Comparando a tecnologia de base (FDM™), com as tecnologias FDMet e FDC, elas apenas se diferenciam nas últimas duas etapas (Figura 1.4) [1].

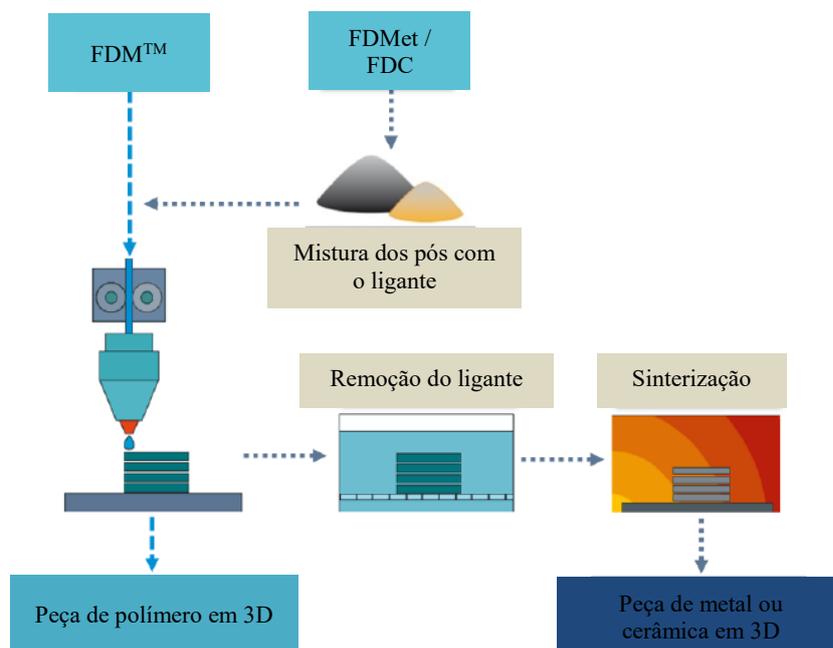


Figura 1.4- Esquema comparativo entre a tecnologia FDM™ e as técnicas FDMet e FDC [1].

A rota de fabricação da técnica de FDMet é também conhecida como processo de “*shaping*”, “*debinding*” e “*sintering*” (SDS) [1].

O interesse científico e industrial pela técnica aditiva FDMet é bastante atual. A possibilidade de reunir as principais vantagens do PIM (processamento de misturas com elevado teor de carga metálica) e do SLM (fabricação camada a camada) numa única técnica, e ainda suprir algumas desvantagens dessas tecnologias, tornam o FDMet bastante atrativo. A fabricação aditiva de componentes metálicos estruturalmente funcionais e respetiva reprodutibilidade é o principal desafio do FDMet. O alcance deste objetivo traduz-se numa produção mais sofisticada (geometricamente) e económica de peças metálicas com aplicação direta em grandes indústrias, como a automóvel, aeronáutica, aeroespacial, entre outras [1].

Quando comparado com outras tecnologias, o FDMet possui inúmeras vantagens. A tecnologia PIM necessita de moldes, o que torna o fabrico muito caro e apenas lucrativo na produção de grandes quantidades. O aumento da complexidade geométrica, quando exequível, torna-se muito dispendioso, contrariamente ao que acontece no FDMet. O SLM, opera em atmosfera controlada e a fonte de energia para a fusão do material é um laser, evidenciando o FDMet como uma alternativa muito vantajosa [1].

A tecnologia em que se insere o FDMet, a extrusão de material, permite a utilização de uma grande gama de materiais acessíveis à fabricação 3D. O princípio base de operação

desta tecnologia pode colmatar a limitação do laser (em SLM) no que concerne a materiais com elevados pontos de fusão (por exemplo, cerâmicas técnicas), e também a utilização de pó com tamanho de partícula mais reduzido comparativamente ao SLM.

O FDMet é, ainda, uma tecnologia limpa e simples de usar. O equipamento para a conceção 3D possui dimensões reduzidas, pode ser utilizado em espaços limitados, tornando o processo de fabrico de peças funcionais mais rápido e económico [1] [32].

A fabricação aditiva por FDMet, até à produção do objeto 3D pode ser dividida em seis etapas: seleção dos pós e ligante; mistura; fabricação do filamento; impressão 3D; remoção do ligante e sinterização (Figura 1.5) [1].

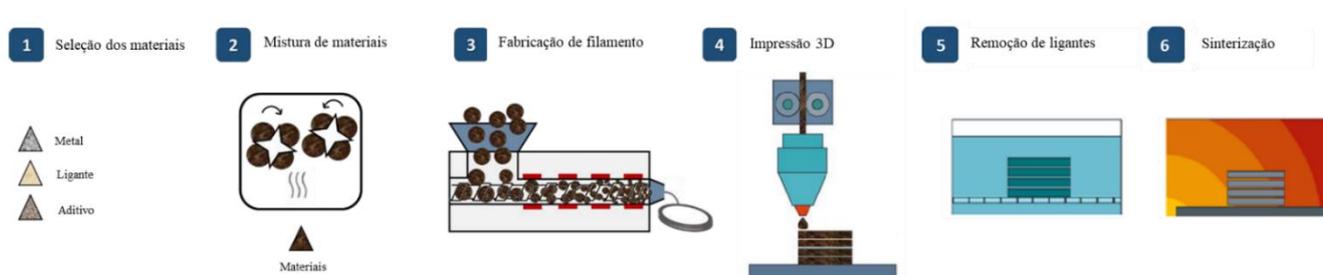


Figura 1.5-Esquema representativo do processo de FDMet [1].

A seleção dos materiais, visa identificar, em função dos pós metálicos selecionados, os materiais poliméricos (ligante) adequados para a mistura, de forma a favorecer a produção do filamento com as propriedades desejadas (balanço entre flexibilidade e rigidez).

Os componentes poliméricos funcionam como um veículo temporário do pó inorgânico. Estes componentes, durante a mistura e a extrusão do material, têm a função de promover uma viscosidade desejável. Durante os ciclos térmicos de remoção, estes componentes devem ter cinéticas de degradação diferentes, para a conservação da geometria da peça produzida. A degradação do ligante deve ser total e não reativa com os restantes constituintes da mistura [1].

No contexto do estudo realizado o ligante é normalmente composto por três tipos de polímeros [1]:

- ceras - possuem baixa viscosidade e baixa temperatura de fusão;
- polímero de base - mantém as partículas juntas, mantendo a forma da peça até à eliminação do ligante;
- aditivos - melhoram a molhabilidade do pó e promovem a flexibilidade.

Na segunda etapa é realizada a mistura dos materiais. Para obter peças metálicas funcionais, é necessário que a carga metálica não seja inferior a 50 vol. %. Esta premissa evidencia um dos grandes desafios do FDMet, a obtenção de filamentos flexíveis [1]. Durante a mistura, é avaliada a variação do binário em função do tempo de mistura. Este procedimento permite inferir sobre a homogeneidade e viscosidade da mistura [34]. Posteriormente, as misturas selecionadas são extraídas na forma de filamento.

A fabricação aditiva é realizada através do processamento do filamento fabricado na etapa anterior, camada a camada. O balanço entre a rigidez e flexibilidade do filamento aliado às propriedades reológicas¹⁰, são os fatores mais preponderantes para o sucesso do processamento do filamento [1].

Após a fabricação do objeto 3D (peça em verde), é necessário proceder à eliminação do ligante e à consolidação das partículas metálicas. Na remoção do ligante, podem ser utilizadas diversas abordagens: decomposição térmica, utilização de solventes ou uma combinação das duas. Embora a decomposição catalítica promova a celeridade deste processo, a decomposição térmica é, normalmente, a estratégia selecionada devido ao baixo impacto ambiental. Independentemente do método aplicado, o principal objetivo é remover o ligante no menor período de tempo, contudo evitando defeitos internos e superficiais ou geométricos na peça [1].

Após remoção do ligante, a peça é sinterizada, onde ocorre a consolidação das partículas metálicas, resultando uma peça com uma forma quase final (“*near net shape*”).

¹⁰ Propriedades reológicas- Viscosidade, plasticidade, elasticidade, entre outras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, o processo de obtenção de pó a partir das aparas, e a metodologia utilizada na caracterização dos materiais.

2.1. Aparas H13

As aparas utilizadas neste estudo foram fornecidas pela empresa Moldes R.P., situada num dos maiores centros de produção de moldes, Marinha Grande (Portugal), e dedicada ao fabrico de moldes para injeção de plástico. Estas aparas resultam de uma operação de maquinaria de alta velocidade, denominada de fresagem, que utiliza uma ferramenta rotativa com múltiplas arestas de corte (fresa) e que permite trabalhar uma peça fazendo furos ou modificando-lhe a forma [5] [35]. Segundo dados da empresa, apenas desta operação resultam, anualmente, cerca de 500 kg de aparas metálicas de H13.

Na indústria de moldes, os materiais mais utilizados são os aços ferramenta e os inoxidáveis, que possuem excelentes propriedades como boa ductilidade, elevada resistência mecânica e tenacidade. Geralmente são aços fáceis de maquinar, dependendo da dureza do material [14].

As aparas estudadas resultam da fresagem de aços ferramenta H13 (AISI), cuja composição química é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Composição química típica do aço ferramenta H13 [36].

<i>Elemento</i>	C	Si	Cr	Mo	V	Fe
<i>% pd</i>	0,32-0,40	1,0	5,13-5,25	1,33-1,4	1,0	restante

Este aço, é um aço ligado, ou seja, tem uma percentagem de elementos de liga superior a 5%. É facilmente temperável, com excelente resistência ao desgaste e tenacidade [36].

2.2. Produção do pó de aparas

Para produzir pó através das aparas recorreu-se à moagem, um processo económico e viável para produzir partículas mais arredondadas e com tamanho adequado. Antes da moagem, as aparas sofreram uma limpeza com acetona em ultrassons, para evitar possíveis contaminações de óleo. Devido ao nível de oxidação, as aparas foram ainda sujeitas a um tratamento térmico num forno (da Termolab-Superkental) a 800 °C durante 4 horas, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera controlada de árgon hidrogenado.

A moagem foi realizada no moinho de bolas Pulverisette 6 da Fritsch (Figura 2.1) e baseada em parâmetros de produção otimizados num outro estudo, com base no tamanho de partícula final (Tabela 2.2) [11].



Figura 2.1- Moinho de bolas Pulverisette 6 Fritsch [37].

Tabela 2.2- Condições de moagem utilizadas [11].

Razão bolas/massa de aparas	Rotações por minuto	Tempo de moagem (min)	Pausa (min)
10:1	300	270	10

A Tabela 2.3 apresenta os constituintes do moinho utilizado.

Tabela 2.3- Constituintes do moinho utilizado e suas características.

<i>Moinho</i>	Pulverisette 6
<i>Material das taças e bolas</i>	Aço inoxidável
<i>Volume das taças</i>	500 ml
<i>Diâmetro das bolas</i>	20 mm

Após a moagem, para eliminar o material grosseiro, o pó de aparas foi peneirado por ação de vibração, em malha de 100 e de $45\mu\text{m}$ (Figura 2.2). Deste procedimento, resultaram partículas com tamanho igual ou inferior ao diâmetro da última peneira utilizada.



Figura 2.2-Equipamento Vibratory Sieve Shaker, Analysette 3, da Fritsch.

Com objetivo de reduzir os desperdícios, as partículas mais grosseiras de pó, que não passaram na última peneira ($45\mu\text{m}$), sofreram uma segunda moagem, de forma a existir um melhor aproveitamento de material.

2.3. Caracterização dos pós

Neste subcapítulo são apresentadas as diversas técnicas utilizadas para a caracterização dos pós (pó de aparas e de H13 comercial). Esta caracterização segue a metodologia de avaliação dos 4S's, por ser recomendada e adequada para caracterização do material. Foi ainda realizado o estudo da escoabilidade dos pós.

2.3.1. Tamanho de partícula

Na análise do tamanho de partícula dos pós, foi utilizada a espectrometria de difração laser (espectrómetro Mastersizer 3000, da Malvern). Esta técnica permite a caracterização de tamanhos de partícula e sua distribuição, através da medição da variação de ângulos na intensidade da luz difundida, à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas numa amostra. As partículas de maiores dimensões tendem a dispersar a luz em pequenos ângulos, enquanto que as partículas mais pequenas em ângulos maiores. Assim, é possível calcular o tamanho das partículas através dos diferentes padrões de dispersão angular (teoria de difusão de luz de Mie) [38].

2.3.2. Estrutura

A difração de raios X (XRD¹¹) é uma técnica versátil e não destrutiva que possibilita o estudo da estrutura atômica do pó, permitindo conhecer a estrutura cristalina, composição física, entre outras características [38].

O bombardeamento de um alvo metálico com um feixe de elétrons de elevada energia gera os raios X. Esta radiação possui um determinado comprimento de onda, que é da mesma ordem de grandeza dos espaçamentos atômicos nas estruturas cristalinas [38-39]. Da sua interação com a amostra, parte da radiação incidente é refletida pelo primeiro plano de átomos, enquanto que a radiação restante penetra na estrutura, sendo depois refletida pelos restantes planos de átomos interiores. O percurso da radiação refletida pelo primeiro plano de átomos é inferior ao do plano de átomos interiores [40].

Este fenómeno origina a difração com base na lei de Bragg (Equação 2.1), onde é obtido um difractograma com a representação da intensidade da radiação difratada em

¹¹ XRD- X-ray diffraction.

função do ângulo de difração ou da distância entre planos cristalinos, que contém sequências de picos caracterizados pela sua posição, intensidade, forma, largura, etc. [38-40].

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{Equação 2.1})$$

Na Equação 2.1, n representa um número inteiro, λ o comprimento de onda da radiação incidente, d a distância entre planos cristalinos e θ o ângulo de incidência dos raios X [39-40].

Como cada fase/substância tem um difractograma de raios X característico, os picos de difração do difractograma obtido são comparados com os de uma base de dados de referência, sendo a mais utilizada a ICDD¹², para o mesmo comprimento de onda [38].

Neste estudo, foi utilizado o equipamento de raios X X'Pert MPD da Philips, com ampola (anticátodo) de cobalto.

2.3.3. Morfologia

A microscopia eletrônica de varrimento (SEM - do inglês *Scanning Electron Microscopy*), é uma técnica bastante utilizada na caracterização de pós, por possibilitar o conhecimento da morfologia e topografia da superfície [38]. Esta técnica permite obter imagens com uma grande gama de ampliação, entre 10 e 1000000 x.

A técnica de SEM consiste na incidência de um feixe de elétrons com uma determinada energia, num ponto da superfície da amostra. A interação entre o feixe de elétrons e a amostra permite obter um conjunto alargado de informação que, depois de ser processada, traduz-se em imagens, espectros, mapas de análise química, entre outros [38] [40].

O equipamento utilizado foi um SEM da marca FEI, modelo Quanta 400 FEG ESEM.

¹² ICDD- International Center of Diffraction Data.

2.3.4. Escoabilidade

A escoabilidade é um parâmetro bastante importante que afeta o manuseamento e o processamento dos pós e, conseqüentemente as propriedades mecânicas do produto final [41-43].

Foi utilizado o equipamento Flodex™, da Hanson Research (Figura 2.3), que permite a determinação da escoabilidade pelo cálculo do coeficiente de atrito entre partículas (k) (Equação 2.2). Este método utiliza discos com aberturas de diferentes diâmetros para analisar a facilidade com que o pó passa livremente na abertura. Quanto maior o coeficiente k, menor será a capacidade de escoabilidade do pó.



Figura 2.3-Flodex™ [44].

$$k = \frac{g \times r \times d_{\text{pour}}}{2} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Na Equação 2.2, g representa a aceleração da gravidade [m/s²], r o raio da abertura do disco [mm] e d_{pour} a densidade [kg/m³] [43].

2.4. Produção de peças (FDMet)

A produção de peças através do processo FDMet teve como base um estudo anterior onde foram realizados inúmeros testes com misturas de pó metálico e ligante (componentes poliméricos), que permitiram a produção de um filamento com as propriedades pretendidas para a impressão 3D [1]. Os parâmetros otimizados de mistura e de produção de filamento foram utilizados neste trabalho.

2.4.1. Mistura

Os parâmetros utilizados na mistura, correspondem aos utilizados na mistura que apresentou os melhores resultados apresentados por Cerejo, F. (2018). No presente estudo, foram realizadas duas misturas, com iguais quantidades de material, diferindo apenas na origem do pó metálico (pó H13 obtido a partir de aparas metálicas e pó H13 comercial).

A produção de peças metálicas por SDS necessita que a percentagem de volume das partículas de pó metálico presentes na mistura não seja inferior a 50 %. Neste caso, a percentagem em volume é de 60 %, que torna este processo bastante desafiante, visto que a mistura tem que ser transformada em filamentos. Por este motivo, toda a formulação das misturas tem de ser otimizada para alcançar os resultados pretendidos. Se a percentagem de volume do pó metálico estiver em excesso, pode prejudicar as propriedades reológicas, deixando as peças expostas a defeitos (por exemplo, porosidade). Isto acontece devido à quantidade insuficiente de ligante para que todos os espaços entre as partículas fiquem preenchidos. Contrariamente, uma baixa percentagem de volume de pó metálico afeta a qualidade da peça final pois, durante a remoção do ligante pode ocorrer colapso da peça [1].

A escolha dos materiais poliméricos deve ser feita de acordo com os resultados pretendidos, e de forma a que os componentes orgânicos não reajam com o pó metálico, ou não prejudiquem a remoção do ligante. É, ainda, necessário que os polímeros adicionados tenham temperaturas de fusão distintas, para que a peça possa reter a sua forma [1].

Neste estudo foram utilizados três componentes orgânicos distintos:

- ligante principal (M1) - mistura multipolimérica de ceras poliolefínicas e polioximetileno (POM) (da Atect, *Figura A.1- Anexo A*);
- termoplástico elastómero (TPE) - copolímero tribloco linear de estireno e etileno/butileno (SEBS) (da Kraton, *Figura A.2- Anexo A*);

- aditivo - plastificante externo, denominado de ftalato de di-isodecilo (DIDP) (IUPAC¹³: bis (8-metilnonil) bezeno- 1,2- dicarboxilato; C₂₈H₄₆O₄).

O ligante principal é utilizado por ter um bom desempenho durante a remoção do ligante, pois é uma mistura multipolimérica com diferentes cinéticas de degradação, mas que permite a temperaturas da ordem dos 600 °C a sua eliminação total, ou seja, sem deixar resíduos carbonosos, que durante a sinterização tenham efeito na composição do aço, em particular no teor de carbono [1].

Os aditivos são necessários pela sua elevada viscosidade e baixa flexibilidade da mistura em forma de filamento [1]. A utilização de plastificantes (principalmente ftalatos) é alvo de restrições por parte da União Europeia.

O plastificante utilizado, segundo a Comissão Europeia, não representa qualquer risco para a saúde humana ou para o meio ambiente [45].

O rácio aplicado, 60 % em volume de pó metálico e 40 % em volume de polímeros (ligante), permite a obtenção de peças metálicas com elevada densificação [1].

Para calcular a massa de cada material necessário à mistura, é necessário ter em conta a densidade de cada material (Tabela 2.4) e o volume da câmara da misturadora (Equação 2.3).

$$\rho = \frac{m}{V} \Leftrightarrow m = \rho \times V \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Onde, ρ corresponde à densidade do material [kg/m³], m à massa [kg], e V ao volume da câmara da misturadora [m³].

Tabela 2.4- Valores da densidade de cada material [1] (Figura A.3- Anexo A).

<i>Material</i>	Pó H13 comercial	Pó H13 aparas	M1	SEBS	Plastificante
<i>Densidade [kg/m³]</i>	7728	7728	970 ± 1	1025 ± 12,2	965 ± 0,6

A Tabela 2.5, apresentada as misturas realizadas, que diferem apenas no tipo de pó de H13 utilizado.

¹³ IUPAC- International Union of Pure and Applied Chemistry.

Tabela 2.5- Misturas realizadas.

<i>Mistura</i>	Ligante (40 %)					Pó (60 %)	
	Ligante principal	% Vol. Ligante principal	Elastômero	% Vol. Elastômero	Aditivo	% Vol. de aditivo	Tipo
1	M1	X	SEBS	Y	Plastificante	5	H13 comercial
2	M1	X	SEBS	Y	Plastificante	5	H13 aparas

* As percentagens em volume de M1 e SEBS são confidenciais. Sendo que X e Y representam as suas quantidades (% Vol.).

A percentagem de ligante utilizada permite alcançar filamentos processáveis através do FDMet [1].

Para a realização das misturas foi utilizado o equipamento Plastograph® (Brabender GmbH & Co. KG) (Figura 2.4), nas seguintes condições:

- temperatura - 180 °C;
- tempo total da mistura - 30 min;
- rotação das lâminas - 30 rpm.



Figura 2.4- Equipamento Plastograph® Brabender GmbH & Co. KG.

Este equipamento permite avaliar a variação do binário em função do tempo de mistura.

O processo de mistura é bastante crítico, pois o objetivo é obter uma mistura homogénea. Desta forma, a análise do binário permite compreender a viscosidade da matéria-prima e a homogeneidade da mistura [34].

2.4.2. Produção do filamento

O material resultante da mistura é granulado e introduzido na extrusora para produzir filamentos. A extrusora utilizada, Brabender GmbH (Figura 2.5), é do tipo parafuso. É constituída essencialmente por um corpo cilíndrico, onde se encontra um fuso que através de um movimento de rotação, obriga o material a passar através de um orifício [1] [46]. Esta extrusora possui cinco zonas aquecidas de forma controlada, variando a temperatura entre os 165 e 180 °C. A velocidade de rotação do parafuso é de 5 rpm e o diâmetro da fieira é de 1,75 mm.



Figura 2.5- Extrusora Brabender GmbH.

2.4.3. Impressão 3D

Na impressão 3D obtém-se as “peças verdes”, designação atribuída às peças antes da remoção do ligante e sinterização. Esta etapa consiste na utilização de filamentos como fonte de alimentação da impressora. Como o filamento utilizado possui uma elevada quantidade

de material metálico, o equipamento deve ser resistente ao contacto com as partículas. Desta forma, foi utilizado um orifício de extrusão de material à base de latão revestido a níquel [1].

No processo de impressão, o material é aquecido e empurrado através de um orifício, com 0,4 mm de diâmetro, e depositado numa plataforma camada a camada, produzindo a peça [34]. As peças foram produzidas através da impressora 3D BQ Prusa i3 Hephestos (Figura 2.6), num intervalo de temperatura entre 190 e 195 °C. O ficheiro 3D utilizado foi projetado através do software Ultimaker Cura (Figura 2.7) [1].

O grande desafio na impressão destas peças é o de conseguir uma boa adesão das camadas iniciais à base de construção. Por este motivo, apenas se coloca duas camadas totalmente preenchidas na base da peça, pois se se aumentasse o número destas camadas a peça não aderiria à base de construção, impedindo a produção das peças. Desta forma, a estratégia de construção adotada foi a seguinte [1]:

- 1) duas camadas densas na base (essenciais para a adesão da peça);
- 2) várias camadas com um baixo grau de preenchimento;
- 3) número ideal de camadas no topo da peça.

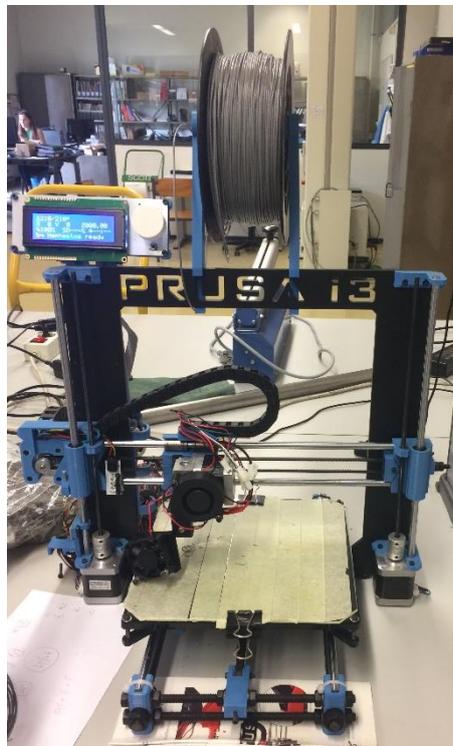


Figura 2.6- Impressora 3D BQ Prusa i3 Hephestos.

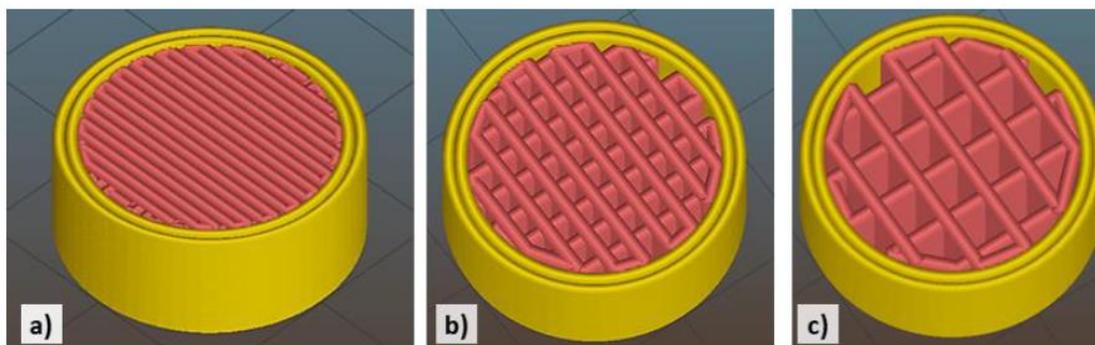


Figura 2.7- Geometria das peças: a) 100% de enchimento, b) 40% de enchimento, c) 30% de enchimento [1].

2.4.4. Remoção do ligante e sinterização

Para a obtenção das peças finais é necessário proceder à remoção do ligante. Foi utilizada a abordagem da decomposição térmica, onde as peças são sujeitas a um ciclo térmico em forno de alta temperatura (da Termolab-Superkental). Este ciclo foi definido com base num conhecimento prático prévio de outros estudos. Os patamares de temperaturas utilizadas neste ciclo coincidem com as faixas de temperaturas de degradação dos constituintes do ligante [1]. Este ciclo iniciou nos 65 °C, tendo atingido a temperatura máxima de 600 °C. A taxa de aquecimento foi de 1 °C/min, e a taxa de arrefecimento foi de 50 °C/min.

No que diz respeito à etapa de sinterização, a temperatura máxima atingida foi de 1250 °C, seguida de um repouso de 60 minutos neste patamar. Neste estágio a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, e a de arrefecimento de 50 °C/min.

Em ambos os ciclos as alterações de temperatura ocorreram de forma gradual, para não provocar defeitos nas peças

Tanto a remoção do ligante como a sinterização foram realizadas em atmosfera controlada, de forma a prevenir uma possível reação com os elementos de liga.

Antes e depois da remoção do ligante, as peças são pesadas de forma a validar a remoção total do ligante, comparando com o peso expectável calculado previamente (Equação 2.4). Depois da sinterização, para verificar se ocorreu alguma mudança neste estágio, as peças são novamente pesadas.

$$P_{exp} = P_{verde} \times \% \text{ Aço} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Na equação 2.4, P_{exp} representa o peso expectável após sinterização [gr], P_{verde} o peso antes da remoção de ligante [gr] e % Aço a percentagem de aço em peso na mistura.

2.5. Caracterização das peças

2.5.1. Dimensões

Para a caracterização geométrica das peças é essencial uma avaliação das suas dimensões, antes e depois de serem submetidas aos ciclos térmicos de remoção do ligante e de sinterização. É expectável que as peças sofram alterações, pois os ciclos térmicos podem provocar alterações drásticas, como por exemplo, o colapso da peça ou alteração significativa da sua forma.

A caracterização das peças obtidas, no que diz respeito à sua contração e dimensões, foi realizada pelo IFM (do inglês *Infinite Focus Microscope*), da Alicona Imaging GmbH. Este equipamento é um dispositivo ótico de medição 3D, que fornece informações topológicas da superfície 3D com elevada repetibilidade e uma resolução vertical até 10 nm. Esta tecnologia, cujo princípio de medição é baseado na variação de foco, combina a pequena profundidade de foco do sistema ótico com o varrimento vertical, fornecendo informações topográficas [1] [47]. O componente principal deste sistema é uma ótica de precisão, que contém vários sistemas de lentes, permitindo medições em diferentes resoluções [47].

2.5.2. Densidade

A densidade define-se como o quociente entre massa e volume. O cálculo da densidade permite o conhecimento do grau de densificação de um objeto, relacionando a existência ou não de porosidade.

Neste estudo recorreu-se ao método de Arquimedes (Figura 2.8), muito utilizado pela sua simplicidade e facilidade de utilização.



Figura 2.8- Equipamento YDB-03, da KERN [48].

Para o cálculo da densidade é realizada a medição da massa da peça “em seco” e da massa da peça submersa em água (Equação 2.5).

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0 \quad (\text{Equação 2.5})$$

Na Equação 2.5, ρ representa a densidade da peça [kg/m^3], ρ_0 a densidade da água em função da temperatura [kg/m^3], A a massa da amostra “em seco” [gr] e B a massa da amostra submersa em água [gr].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização das aparas

Como referido no subcapítulo 1.2.5, dependendo do tipo de material maquinado, da geometria da ferramenta, da velocidade de corte e de avanço, as aparas podem ter diferentes formas [14]. As aparas em estudo, apresentam uma forma em vírgula (Categoria 6 na Tabela 1.3), e tamanho irregular (Figuras 3.1 e 3.2).

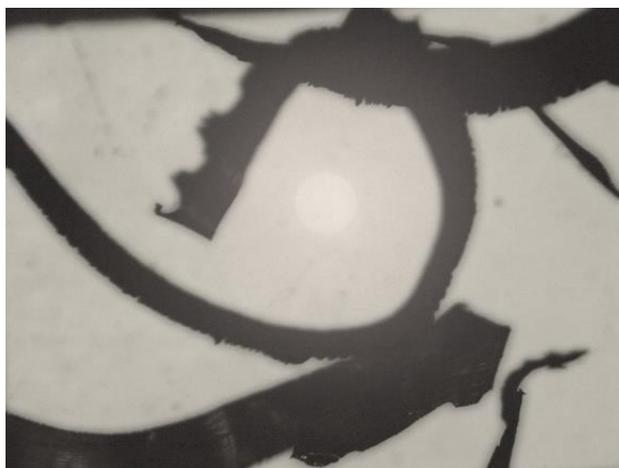


Figura 3.1- Imagem das aparas à lupa (1000x).



Figura 3.2- Foto das aparas.

A sua cor azulada e/ou rosada indica a presença de óxidos (Figura 3.3), não compatível com processos de pulverotecnologia.



Figura 3.3- Foto das aparas antes de sofrerem qualquer tipo de tratamento.

Após tratamento em forno de alta temperatura, ocorreu mudança de cor (Figura 3.4), sugerindo a remoção dos óxidos. Só depois deste tratamento, procedeu-se à moagem das aparas.



Figura 3.4- Foto das aparas após tratamento térmico.

3.2. Caracterização dos pós

3.2.1. Tamanho de partícula

A partir da técnica de espectroscopia de difração laser foi possível obter o tamanho e distribuição granulométrica dos pós utilizados (Figuras 3.5 e 3.6).

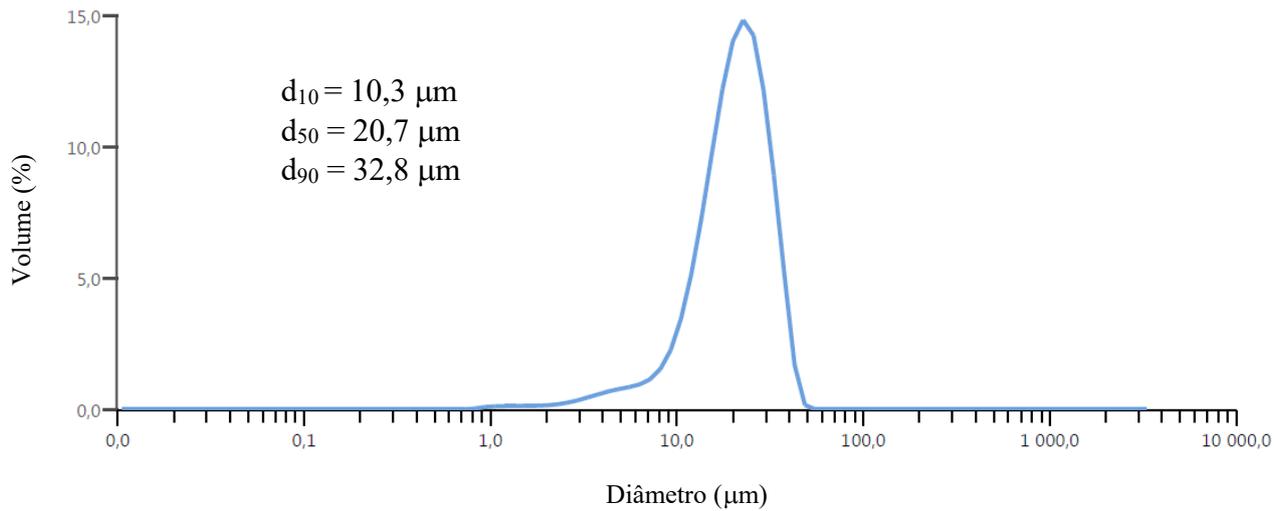


Figura 3.5- Análise granulométrica do pó de aparas H13.

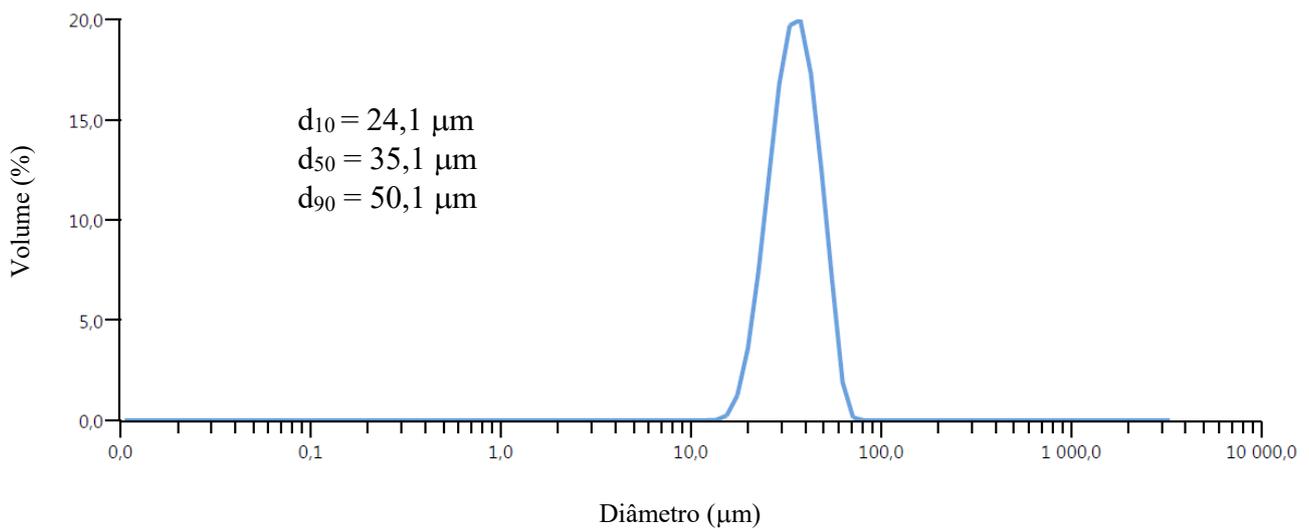


Figura 3.6- Análise granulométrica do pó H13 comercial.

A distribuição granulométrica do pó H13 comercial é mais uniforme e reduzida (intervalo de partículas entre 14,5 e 58,9 μm). Por sua vez, a distribuição de tamanhos mais alargada no pó de aparas deve-se à existência de partículas de dimensão reduzida (intervalo de partículas entre 0,767 e 45,6 μm). Estas partículas podem ser benéficas na obtenção de componentes com elevada densidade [39].

O tamanho médio de partícula (d_{50}) é menor para o pó de aparas H13 (20,7 μm), comparativamente com o pó comercial (35,1 μm).

3.2.2. Estrutura

Graças à comparação com o difractograma do pó de aço ferramenta H13 comercial (Figura 3.7), é possível validar o uso do pó de aparas H13. É possível identificar a presença da fase martensítica predominante (representada com a letra M), como acontece no pó de aço H13 comercial (≈ 52 - 54°) (Figura 3.8). Desta análise, verifica-se que o pó obtido, em termos de estrutura, é similar ao pó comercial.

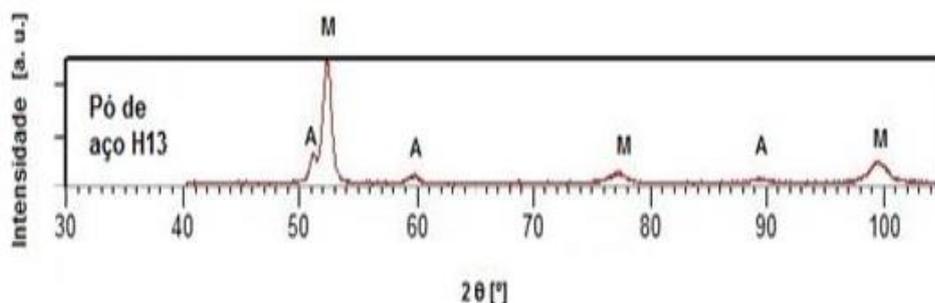


Figura 3.7- Difractograma de pó de aço ferramenta H13 comercial [39].

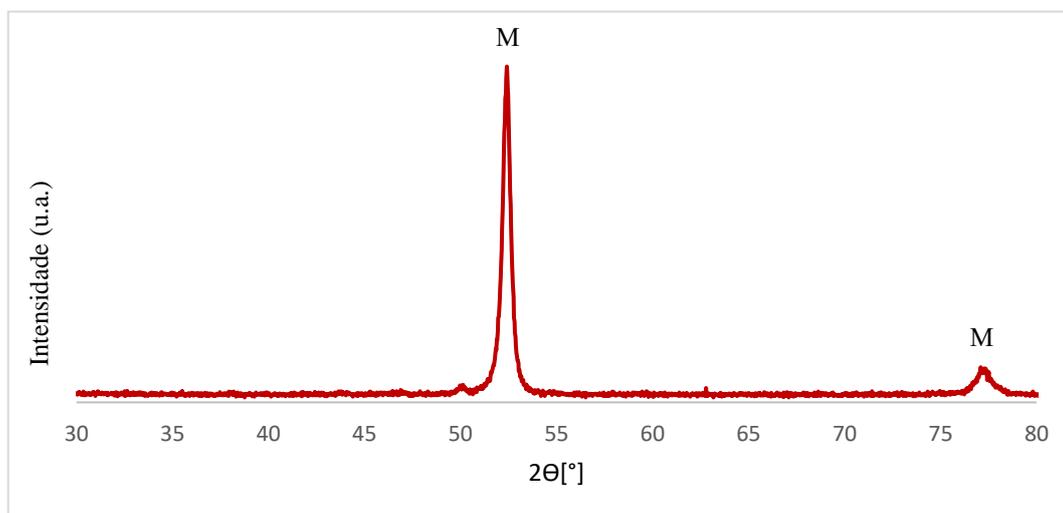


Figura 3.8- Difractograma de pó de aparas de aço H13.

3.2.3. Morfologia

A Figura 3.9 apresenta as partículas de pó de aparas H13 resultantes do tratamento térmico, moagem e peneiração (45 μm).

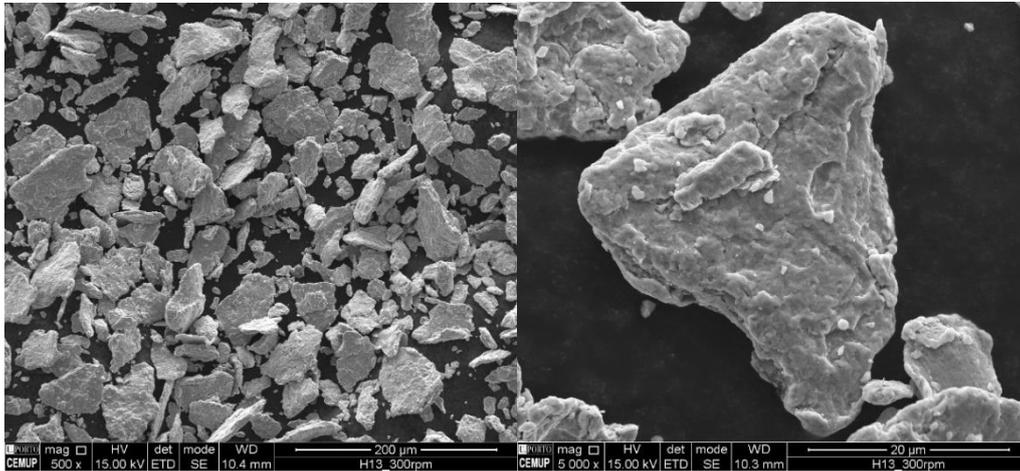


Figura 3.9- Imagens SEM do pó de aparas H13 (200 e 20 μm , respetivamente).

As partículas de pó de aparas H13 apresentam uma forma pouco arredondada, achata e, bastante irregular. Também é possível observar partículas de tamanho reduzido, que podem beneficiar a densidade da peça, ocupando os espaços vazios entre as partículas de maior dimensão [39]. Contrariamente, as partículas de pó H13 comercial possuem esfericidade elevada (fator de forma próximo de 1), tipicamente recomendada para produção aditiva, e que podem beneficiar a escoabilidade do pó. Ainda assim, o pó H13 comercial apresenta também algumas partículas com forma alongada (Figura 3.10).

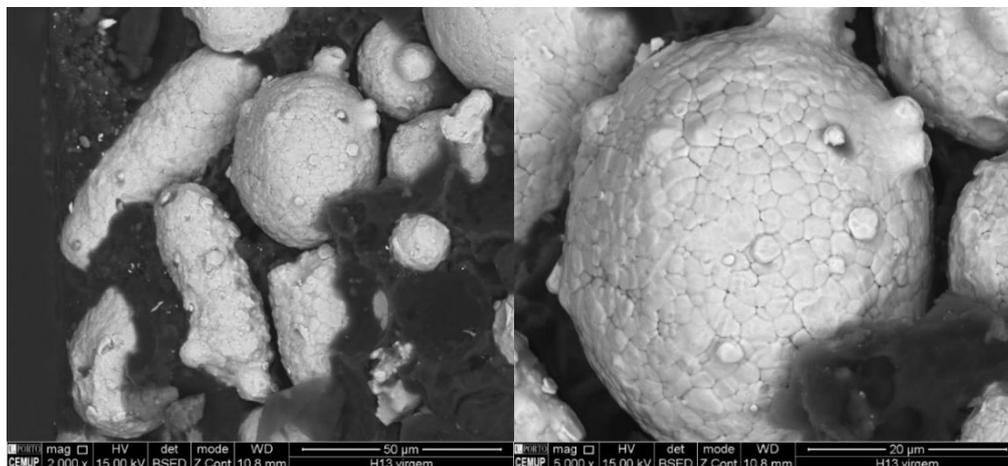


Figura 3.10- Imagens SEM do pó H13 comercial (50 e 20 μm , respetivamente).

Embora os estudos publicados sobre FDMet sugiram tamanhos de partícula similares aos utilizados na tecnologia PIM (d_{50} entre 4 e 8 μm) [1] [34], neste estudo foi estudada a viabilidade da utilização de partículas maiores e com formas irregulares, devido ao processo de recuperação de aparas utilizado.

3.2.4. Escoabilidade

Para a análise da escoabilidade foi utilizado o método Flodex, explicado no ponto 2.3.4. A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos. É também apresentada a escoabilidade do pó de aço utilizado noutro estudo de FDMet, para servir de comparação.

Tabela 3.1- Análise de escoabilidade.

<i>Pó</i>	m [g]	V [$\times 10^{-6}$ m³]	d_{pour} [$\times 10^3$ kg/m³]	r [$\times 10^{-3}$ m]	k [Pa]
<i>Pó H13 comercial</i>	50	11,5	4,35	3	64
<i>Pó aparas H13</i>	50	16,0	3,13	5	77
<i>Pó de aço 316L [1]</i>	50	13,0	3,85	11	207

O pó de aparas H13 apresenta um coeficiente de atrito (k) ligeiramente superior ao do pó H13 comercial, ou seja, apresenta pior escoabilidade, justificada pela menor densidade e pela morfologia irregular das partículas (subcapítulo 3.2.3).

O outro pó de aço analisado [1], possui um coeficiente de atrito muito elevado, devido à presença de partículas de tamanho reduzido que promovem a formação de aglomerados, dificultando a escoabilidade do pó.

3.3. Misturas

Para garantir a qualidade das misturas (M-01 e M-02), foi necessário controlar as variações do binário em função do tempo de mistura (Figura 3.11).

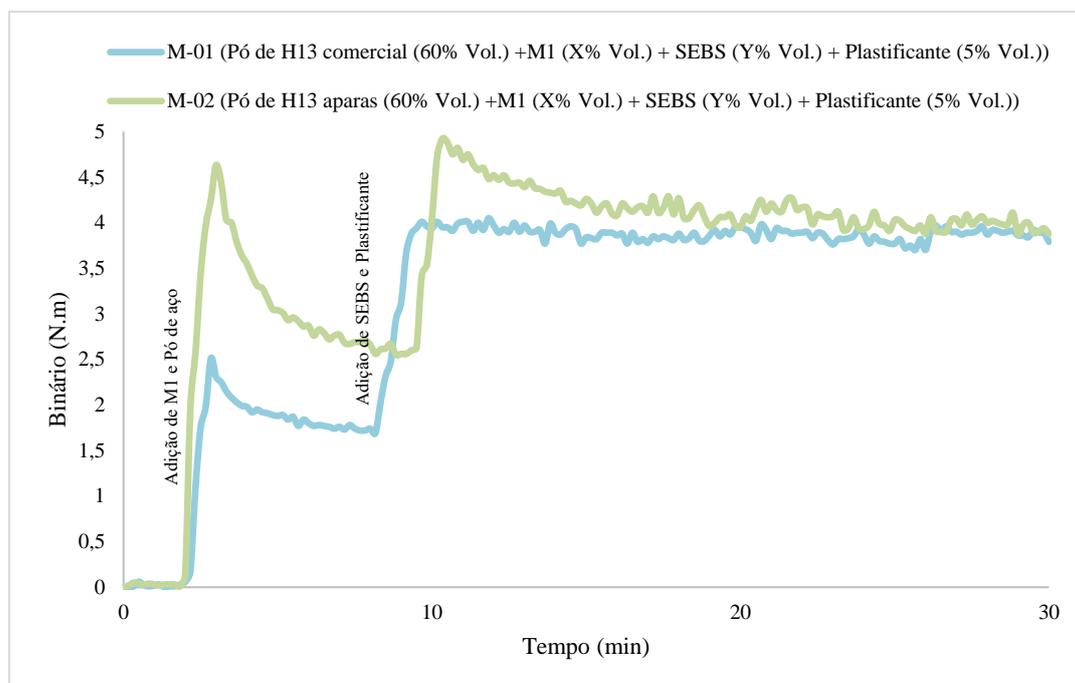


Figura 3.11- Comportamento do binário das misturas 1 e 2.

Em ambas as misturas existem dois picos no binário. O primeiro correspondente à adição de M1 e do pó de aço, e o segundo à adição de TPE (SEBS) e Plastificante.

O binário de M-01 (3,8 N.m) é inferior ao de M-02 (3,9 N.m), sendo que quanto maior o binário, mais viscosa é a mistura. Assim, pode-se concluir que a mistura contendo pó de aparas H13 tem viscosidade ligeiramente mais elevada. O binário é um pouco mais estável em M-01.

No caso do estudo base [1], as mesmas condições de mistura, com tamanhos de partículas distintos originaram valores de binário diferentes. A mistura com o menor tamanho de partículas originou um binário superior. Em consequência do tamanho reduzido, a escoabilidade desse pó é pior, o que torna a sua mistura mais difícil. Em suma, o tamanho de partícula pode influenciar o valor do binário e, conseqüentemente, a homogeneidade da mistura. No entanto, não é possível comparar o valor de binário das misturas deste estudo,

com a equivalente no estudo base, pois existiu variação da forma das partículas (partículas de pó de M-02 irregulares).

3.4. Produção de filamentos

Após produção das misturas (M-01 e M-02), e obtenção do granulado (Figura 3.12), foram processados os filamentos. Apenas foi possível produzir filamentos para impressão 3D a partir do granulado da M-01, devido a complicações com o equipamento (Figura 3.13).



Figura 3.12- Foto do granulado M-01 (esq.) e M-02 (dir.).



Figura 3.13- Foto do filamento de M-01.

Contrariamente ao pretendido, apenas foi possível produzir filamento com um diâmetro de 1,60 mm. Idealmente o filamento deve ter um diâmetro de 1,75 mm, dado ser um dos diâmetros mais utilizados nas bobinas de filamentos para impressoras. Como o diâmetro final do filamento é definido por ação da gravidade, a altura entre a fiação e a superfície da bobina deverá permanecer constante ao longo de todo o processo de extrusão, pois é necessário preservar o diâmetro ao longo do filamento [1].

Para a M-02 não foi possível a produção de filamento a partir da fiação com diâmetro de 1,75 mm e, conseqüentemente, não progrediu para a etapa seguinte, a impressão 3D. Dado que a forma geométrica das partículas do pó utilizado nesta mistura era irregular e a viscosidade elevada, o que dificulta a tarefa de extrusão do material. Uma vez que a pressão necessária para processar esta mistura não foi compatível com aquela que o equipamento admite, a extrusora não conseguiu passar o material pelo orifício da fiação. O tamanho das partículas de pó e a formação de aglomerados também poderão ter complicado a sua extrusão [34].

Para contornar esta limitação, o material que não passou na fiação foi ainda assim estudado (subcapítulo 3.5).

3.5. Obtenção das peças verdes

Através do filamento de M-01 foi possível produzir duas peças (Figura 3.14).

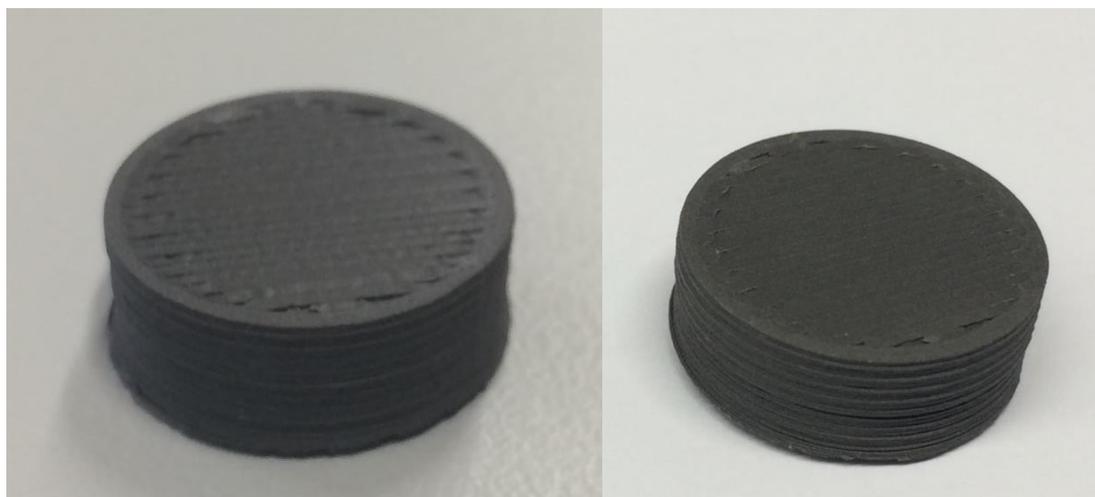


Figura 3.14- Foto da peça A1 (esq.) e A2 (dir.).

Na produção das peças, foram adotados diferentes valores para alguns dos parâmetros (Tabela 3.2). De notar que, tanto o número de camadas sólidas usadas para o início da deposição, como os valores do diâmetro do filamento e da espessura das camadas se mantiveram iguais para as duas peças. No que diz respeito ao parâmetro de extrusão de material este foi definido para um valor acima de 1, para se ajustar à diferença do diâmetro do filamento em relação ao diâmetro da feira da extrusora (1,75 mm).

Tabela 3.2- Parâmetros utilizados na impressão 3D.

PEÇA	Temperatura (°C)	Extrusão de material	Camadas sólidas na base	Camadas sólidas no topo	Diâmetro do fio (mm)	Espessura das camadas (mm)
A1	195	1,2	2	15	1,6	0,2
A2	190	1,3	2	25	1,6	0,2

Na produção da peça A1, as camadas de topo não estavam muito próximas. Por este motivo, na produção da peça A2 o valor de extrusão de material foi diferente, sendo possível obter uma peça com melhores acabamentos nas camadas de topo. Na peça A2, também foi alterado o número de camadas sólidas no topo, para aumentar a densidade da peça, e para servir de comparação com a A1.

Como referido anteriormente, não foi possível produzir filamento através da M-02. Em alternativa, a geometria após a extrusão do material (sem feira) (Figura 3.15), foi submetida aos ciclos térmicos e posterior avaliação da densidade.



Figura 3.15- Foto das geometrias obtidas através da M-02.

3.6. Remoção de ligante e sinterização

Após obtenção das peças verdes, seguiram-se as etapas de remoção do ligante e de sinterização.

As peças verdes foram colocadas num suporte em forma de rede, antes de serem inseridas no forno, para que pudesse ocorrer eficazmente a extração do ligante.

Antes das peças serem colocadas no forno para remoção do ligante foram pesadas, de forma a que o seu peso inicial pudesse ser comparado com o peso final. Este procedimento permitiu verificar se a remoção do ligante foi ou não bem-sucedida. No entanto, em consequência da fragilidade das peças, após o ciclo térmico de remoção de ligante, a peça A1 desfez-se. Como a pesagem após remoção de ligante é uma medida de controlo extra, e de forma a evitar a perda das restantes peças (Figuras 3.16 e 3.17), não se procedeu à sua pesagem.

As peças após remoção do ligante são, geralmente, muito frágeis, pois a temperatura nesta fase não é suficiente para promover difusão entre as partículas e consequente consolidação. A resistência da peça em verde está muito dependente da proximidade entre partículas. Neste contexto, a ausência de elevadas pressões para compactar as peças na tecnologia selecionada e, ainda a forma irregular das partículas, aumentaram significativamente a fragilidade das peças.

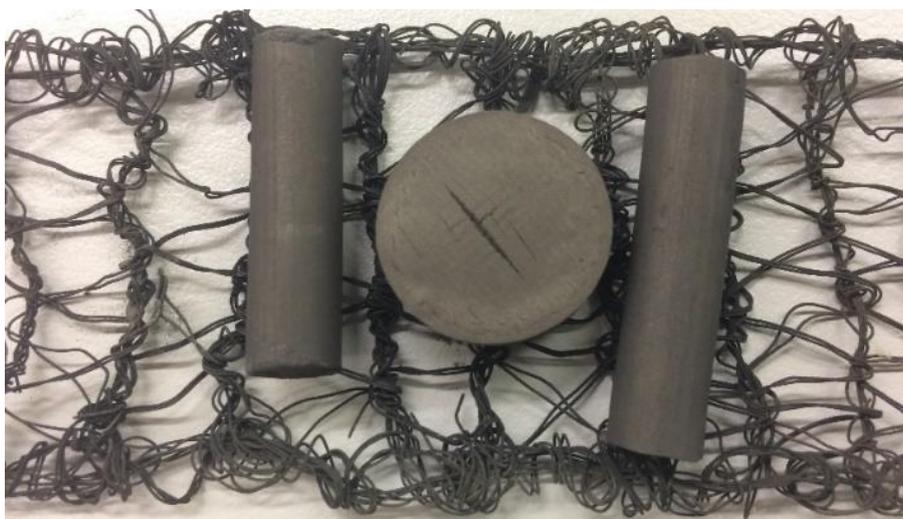


Figura 3.16- Foto das peças após remoção do ligante (Peça B1 M-02 (esq.), peça A2 M-01 (centro) e peça B2 M-02 (dir.)).

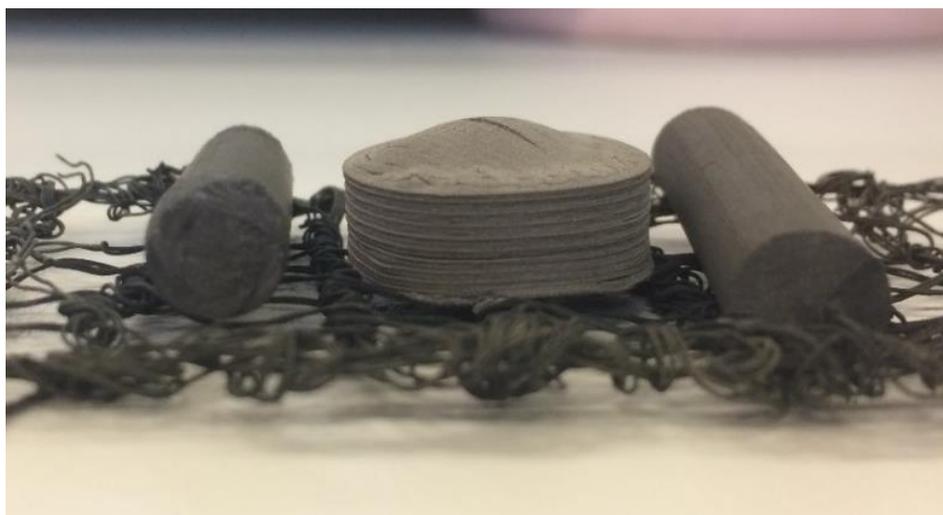


Figura 3.17- Fotos das peças após remoção do ligante (Peça B1 M-02 (esq.), peça A2 M-01 (centro) e peça B2 M-02 (dir.)).

Após a sinterização, as peças foram pesadas novamente e comparadas com o peso inicial (Tabela 3.3).

Tabela 3.3- Peso da peças.

<i>Peça</i>	Peso antes da remoção de ligante (gr)	Peso expectável após sinterização (gr)	Peso após sinterização (gr)
<i>A2</i>	8,5821	7,9135	7,4747
<i>B1</i>	6,8857	6,3493	6,2676
<i>B2</i>	7,7042	7,1040	6,7819

Para todas as peças, a diferença entre o peso após sinterização e o peso expectável (calculado a partir do peso inicial das peças, com base nas densidades do ligante e do pó de aço) é pouco significativa.

3.7. Caracterização das peças finais

3.7.1. Dimensões das peças

Antes e após os ciclos térmicos foram avaliadas as dimensões das peças. Esta avaliação permite verificar potenciais modificações nas dimensões das peças, nomeadamente se existiu contração.

Foram caracterizadas duas peças da M-01, designadas de A1 e A2, e duas peças da M-02, designadas de B1 e B2 (Figuras 3.18 e 3.19).



Figura 3.18- Foto da peça B1.



Figura 3.19- Foto da peça B2.

Como referido no subcapítulo anterior (3.6), a peça A1 após o ciclo térmico de remoção de ligante, desfez-se durante o seu manuseamento. Por este motivo, não foi possível adquirir as suas dimensões finais.

As dimensões das peças de pó de aparas H13 (B1 e B2), avaliadas com recurso a um paquímetro, estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Dimensões das peças de pó de aparas H13 e % de contração.

<i>Peça</i>	Diâmetro (mm)			Comprimento (mm)		
	Peça Verde	Peça Sinterizada	<i>Contração (%)</i>	Peça Verde	Peça Sinterizada	<i>Contração (%)</i>
<i>B1</i>	7,92	6,48	18	30,00	26,60	11
<i>B2</i>	7,93	6,42	19	33,14	30,24	9

Em ambas as peças, existiu contração, tanto no que diz respeito ao diâmetro como ao seu comprimento. As contrações quer no diâmetro quer no comprimento são similares em ambas as peças.

A avaliação das dimensões da peça A2, foi realizada por IFM (Figuras 3.20 e 3.21).

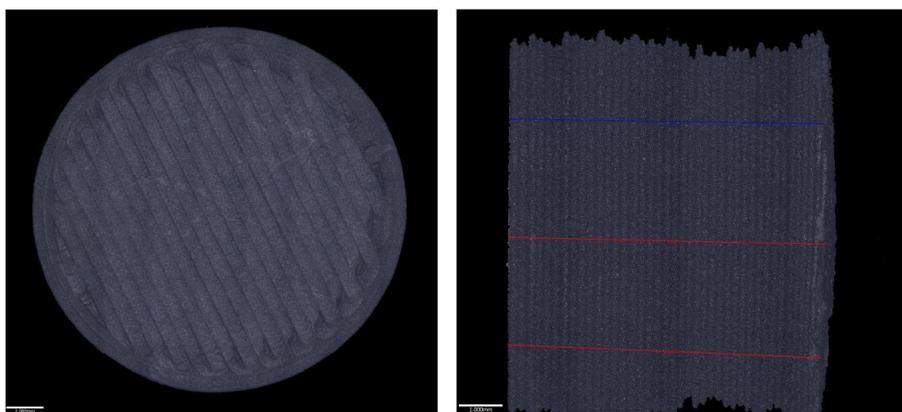


Figura 3.20- Peça A2 em verde (IFM).

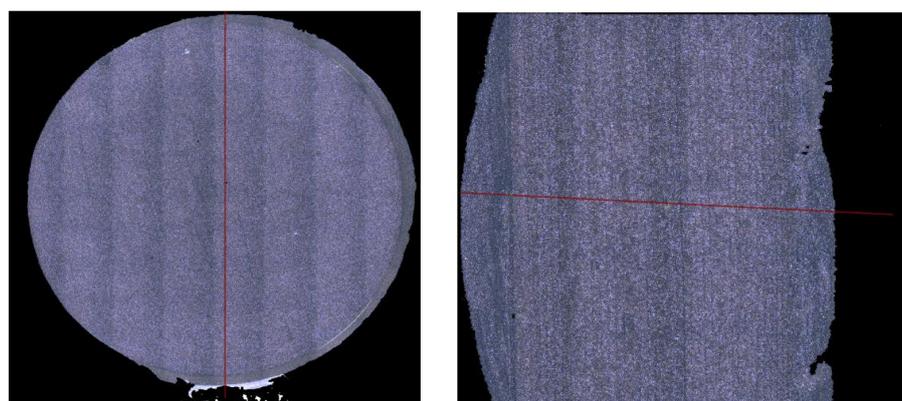


Figura 3.21- Peça A2 sinterizada (IFM).

Da análise das dimensões da peça A2 em verde, verifica-se que a fabricação da peça verde foi realizada com elevada precisão no que diz respeito à circularidade da peça, pois as medidas realizadas em duas direções aleatórias são similares.

Na Figura 3.21 é possível observar que a peça durante os ciclos térmicos de remoção de ligante e de sinterização sofreu um empeno, o que dificultou as medições. As dimensões da peça A2 são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5-Dimensões da peça de pó H13 comercial e % de contração.

Peça	Altura (mm)			Diâmetro (mm)		
	Peça Verde	Peça Sinterizada	Contração (%)	Peça Verde	Peça Sinterizada	Contração (%)
A2	7,158	6,792	5	19,932	18,567	7

As contrações existentes eram da ordem de 5 e 7 % relativamente à altura e ao diâmetro, respetivamente.

Por último, não foi possível fazer uma comparação entre a contração sofrida pelas peças A2, B1 e B2, devido à geometria diferenciada, que condiciona o teor de contração.

3.7.2. Densidade

Na Tabela 3.6, são apresentadas as densidades obtidas para as peças A2 e B2, ambas sinterizadas.

Tabela 3.6- Valores das densidades e % de porosidade.

Peça	A (gr)	B (gr)	T (°C)	ρ_0 (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	% poros
A2	7,425	5,924	23	997,6	4935	36
B2	6,768	5,888	22	997,8	7674	1

A peça de pó H13 comercial (A2) apresenta menor densidade e, conseqüentemente, elevada porosidade (Figura 3.22). Por sua vez, a peça B2 apresenta cerca de 1 % de porosidade (Figura 3.23). De referir que a mistura da peça B2 não foi sujeita à fieira da extrusora, nem à fieira existente na impressão 3D, o que pode justificar estes resultados. Este procedimento pode ter contribuído para a elevada porosidade detetada na peça A2, devido à falta de compactação das camadas após impressão 3D, ou seja, a uma menor proximidade entre as partículas.

As Figuras 3.22 e 3.23, evidenciam a maior percentagem de poros na peça A2, comparativamente com a peça B2.

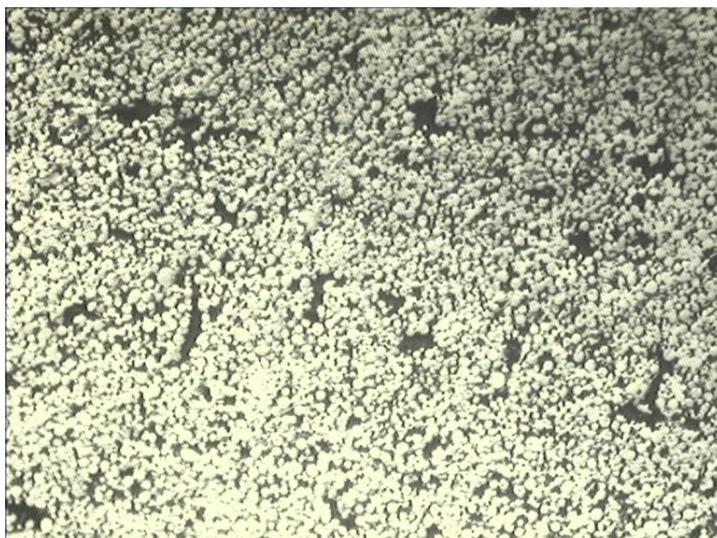


Figura 3.22- Imagem da peça A2 (MO) (50x).



Figura 3.23- Imagem da peça B2 (MO) (500x).

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo valorizar aparas de aço H13 (resíduo), proveniente de maquinagem a alta velocidade, para aplicação em FDMet. Para a obtenção de pó H13, através das aparas, recorreu-se à técnica de moagem em moinho de bolas. Deste estudo foi possível retirar diversas conclusões, de destacar as seguintes:

- o tratamento térmico em forno com atmosfera redutora controlada permitiu a remoção eficaz dos óxidos presentes nas aparas;
- a moagem das aparas de aço H13 (rácio bolas/massa de aparas 10:1; 300 rpm; 270 min), gerou partículas com uma distribuição granulométrica entre 0,8 e 45,6 μm , e tamanho médio de partícula de 20,7 μm ;
- a estrutura do pó de aparas H13 apresenta uma fase martensítica predominante, característica do pó comercial;
- o pó de aparas H13 possui partículas com uma forma pouco arredondada e achatada, contrariamente ao pó H13 comercial (fator de forma próximo de 1); o presente estudo permitiu concluir que apesar da forma irregular das partículas, a produção de pó através de um resíduo industrial é um processo bastante simples;
- a escoabilidade do pó de aparas tem um coeficiente de atrito (k) superior ao pó H13 comercial (77 e 64 Pa, respetivamente), ou seja, pior escoabilidade; a morfologia irregular das partículas do pó de aparas H13 pode estar na origem deste comportamento.

No que diz respeito à aplicação do pó resultante de aparas de H13 como filamento para FDMet há que concluir o seguinte:

- nas misturas, o binário da M-01 (pó H13 comercial) é similar ao da M-02 (pó de aparas), 3,8 e 3,9 N.m; a M-02 apresentava uma viscosidade ligeiramente mais elevada; no entanto, os valores atingidos são semelhantes e aceitáveis, e permitem a incorporação do pó de aparas H13 nesta etapa;

- na produção de filamentos, não foi possível obter um filamento com o diâmetro pretendido (1,75 mm) para a M-02 e, conseqüentemente, realizar a impressão 3D;
- devido à enorme fragilidade das peças após o ciclo térmico de remoção do ligante, uma das peças de pó H13 comercial desfez-se; ainda assim, foi possível inferir que o ligante foi removido na sua totalidade nas restantes peças;
- após a sinterização, foi possível verificar que existia uma contração similar em ambas as peças constituídas por pó de aparas H13; a peça constituída por pó de aparas H13 apresenta densidade superior à resultante do pó comercial, e, conseqüentemente, menor porosidade; contudo é de notar que pode ter havido um efeito prejudicial para a mistura durante a extrusão propriamente dita do filamento e a que ocorre durante o processamento da peça por FDMet.

Tratando-se de um trabalho exploratório da possibilidade de utilização de pós obtidos a partir de aparas resultantes da maquinagem de alta velocidade, pode concluir-se que é possível a sua aplicação, no entanto, há necessidade de estudos mais aprofundados que permitam eliminar os pontos fracos do processo evidenciados no presente trabalho.

TRABALHOS FUTUROS

Como referido, o trabalho exploratório para aproveitamento de um resíduo de aparas metálicas, para aplicação em FDMet, obriga a ultrapassar as questões seguintes:

- otimização das condições de moagem para obtenção de partículas adequadas à aplicação em FDMet;
- otimização das condições de mistura para o aço H13;
- aumento do diâmetro da feira da extrusora, diminuindo a pressão gerada na extrusão do filamento;
- sujeitar as peças em verde (antes de eliminação do ligante) a pressão isostática (CIP do inglês, *Cold Isostatic Pressure*, ou HIP do inglês, *Hot Isostatic Pressure*), para promover uma maior proximidade entre partículas, que permitam após sinterização, uma densificação significativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cerejo, F. J. S. (2018). “Desenvolvimento de filamentos para impressão 3D de peças de aço”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [2] Ferrão, P. M. C., Lorena, A., Santos, M., *et al* (2014). “Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020”. Instituto Superior Técnico e Agência Portuguesa do Ambiente.
- [3] Kraemer, M. E. P. (2005). “A questão ambiental e os resíduos industriais”. Acedido em: 1 de março de 2018, em: http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_25.pdf.
- [4] Figueiredo, J. M., Gonçalves, A., Correia, A., *et al* (2001). “Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais”. INETI. Lisboa.
- [5] Figueiredo, J. M., Coelho, M. C., Pedrosa, F. & Oliveira, P. (2000). “Guia Técnico- Setor da Metalurgia e Metalomecânica”. INETI. Lisboa.
- [6] Godinho, S. C. C. (2012). “Consolidação de Aparas Metálicas por Explosivos”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [7] Mateus, A. & Associados, Sociedades de Consultores, Lda. (2011). “Setor Metalúrgico e Metalomecânico- Diagnóstico Competitivo e Análise Estratégica.”
- [8] Ferreira, H. & Heister, P. "Os resíduos metálicos gerados nas indústrias". Indústria da Sucata, 37.
- [9] Cefamol- Associação Nacional da Indústria de Moldes (2018). “A Indústria Portuguesa de Moldes”. Acedido em: 1 de março de 2018, em: https://issuu.com/cefamol/docs/ipm_2018.
- [10] Custódio, P. M. & Selada, A. (2013). “A Maquinagem de Alta Velocidade na Indústria de Moldes”. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e Centimfe- Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos.
- [11] Vieira, M. T., Godinho, S., Farinha A. R., Fidelis, N. & Rosa, H. (2015). “Aparas metálicas de resíduo a matéria-prima”. *O Molde: Inovação e Tecnologia- Revista da Cefamol*, **107**: 36-38.

-
- [12] 3Dnatives. (2018). *3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping?* Acedido em: 20 de julho de 2018, em: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>.
- [13] Perry, M. B., Kharoufeh, J. P., Shekhar, S., Cai, J. & Shankar, M. R. (2012).” Statistical characterization of nanostructured materials from severe plastic deformation in machining”. *IIE Transactions*, **44**:534-550.
- [14] Batista, C. D. (2013). “Valorização de aparas de H13 (AISI)”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [15] Correia, A. E. (2006). “Uma Abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade, utilizando turbinas pneumáticas de alta rotação”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [16] Farinha, A. R., Tavares, B., Mendes, R. & Vieira, M. T. (2012).” Energetic materials for nanocrystal-line stainless steel production”. *Journal of Alloys and Compounds*, **536S**: S575-S581.
- [17] Godinho, S. C., Santos, R. F., Vieira, M. T. (2017). “In the search of nanocrystallinity in tool-steel chips”. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, **29**: e62-e64.
- [18] Swaminathan, S., Shankar, M. R., Rao, B. C., Compton, W. D., Chandrasekar, S., King, A., H. & Trumble, K. P. (2007). “Severe plastic deformation (SPD) and nanostructured materials by machining”. *Nanostructured materials- processing, structures, properties and applications*, **42**: 1529-1541.
- [19] Sasikumar, R. & Arunachalam, R. M. (2009). “Synthesis of nanostructured aluminium matrix composite (AMC) through machining”. *Materials Letters*, **63**: 2426-2428.
- [20] Resolução do Conselho de Ministros nº11-C/2015 de 16 de março. *Diário da República-I Série*. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.
- [21] Agência Portuguesa do Ambiente. (2017). “Guia de Classificação de Resíduos”.
- [22] Decisão 2014/955/UE de 18 de dezembro. *Jornal Oficial da União Europeia*. Comissão Europeia. Bruxelas.
-

- [23] Portal Português da Gestão de Resíduos (NetResíduos). (2013). *Operações de valorização e eliminação de aparas e limalhas de metais ferrosos*. Acedido em: 25 de julho de 2018, em: <http://www.netresiduos.com/operatordir.aspx?menuid=21&lerid=2528&residuonome=APARAS%20E%20LIMALHAS%20DE%20METAIS%20FERROSOS>.
- [24] Decreto-Lei nº73/2011 de 17 de junho. *Diário da República nº 116 – I Série*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.
- [25] Ramana, M. V., Mohan Rao, G. K., Hanumantha Rao, D. (2014). “Chip morphology in turning of Ti-6Al-4V alloy under different machining conditions”. *Journal of Production Engineering*, **17**.
- [26] Enayati, M. H., Badandeh, M. R. & Nosohian, S. (2007). “Ball milling of stainless steel scrap chips to produce nanocrystalline powder”. *J Mater Sci*, **42**:2844-2848.
- [27] Zhai, Y., Lados, D. A. & Lagoy, J. L. (2014). “Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation”. *The Minerals, Metals & Materials Society*, **Vol. 66 N°5**.
- [28] Bandyopadhyay, A. & Heer, B. (2018). “Additive manufacturing of multi-material structures”. *Materials Science & Engineering R*, **129**: 1-16.
- [29] Prakash, K. S., Nancharaih, T. & Subba Rao, V. V. (2018). “Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing- An Overview”. *Materials Today: Proceedings*, **5**: 3873-3882.
- [30] Abreu, S. A. C. (2015). “Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo”. Dissertação de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [31] Attar, E. (2011). “Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes”. Dissertação para o grau de Doutor-Engenheiro na Faculdade Técnica de Erlangen, Alemanha.
- [32] Stratasys Ltd. (2018). *Tecnologia FDM*. Acedido em: 2 de agosto de 2018, em: <http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology>.
- [33] Masood, S. H. & Song W.Q. (2004). “Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling”. *Materials & Design*, **25**: 587-594.
- [34] Wu, G., Langrana, N. A., Rangarajan, S., McCuiston, R., Sadanjo, R., Danforth, S. & Safari, A. “Fabrication of Metal Components using FDMet: Fused Deposition of Metals”. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 775-782.

[35] Nicolau, B. M. (2017). “Estudo das Vibrações no Processo de Fresagem de Peças com Baixa Espessura”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Escola Superior de Tecnologia e Gestão- Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

[36] MatWeb- Material Property Data. (2018). *AISI Type H13 Hot Work Tool Steel*. Acedido em: 16 de agosto de 2018, em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e30d1d1038164808a85cf7ba6aa87ef7&ckck=1>.

[37] Fritsch GmbH. (2018). *Planetary Mono Mill Pulverisette 6*. Acedido em: 16 de agosto de 2018, em: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/planetary-mills/details/product/pulverisette-6-classic-line/>.

[38] IPN- Instituto Pedro Nunes. (2018). *Laboratório de Ensaios, Desgaste & Materiais-Ensaios*. Acedido em: 20 de junho de 2018, em: <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaios>.

[39] Gatões, D. A. C. (2016). “Processos híbridos step-by-step para a produção de componentes metálicos com geometrias complexas”. Dissertação de mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.

[40] Monteiro, A. J. S. C. (2004). “Revestimentos multicamada PVD com comportamento electrocrómico”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Física da Universidade do Minho, Braga.

[41] Spierings, A. B., Voegtlin, M., Bauer, T. & Wegener, K. (2016). “Powder flowability characterization methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing”. *Prog Addit Manuf*, **1**: 9-20.

[42] Campos, M. M. (2012). “Análise da escoabilidade de pós”. Dissertação de mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos.

[43] Oliveira, G. V. M. G. (2017). “Fusão Selectiva por Laser (SLM) como processo de eleição para a produção de componentes multimaterial”. Dissertação de mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, Coimbra.

[44] Teledyne Instruments, Inc. *Physical Testing- Flodex™*. Acedido em: 16 de julho de 2018, em: <https://hansonresearch.com/physical-testing/flodex-2/>.

[45] European Plasticisers. (2017). *Diisodecyl Phthalate (DIDP)*. Acedido em: 21 de agosto de 2018, em: <https://www.plasticisers.org/diisodecyl-phthalate-didp/>.

[46] Ciência e Tecnologia da Borracha. (2014). *Extrusoras Tipo Fuso*. Acedido em: 21 de agosto de 2018, em: https://ctborracha.com/?page_id=6387.

[47] Alicona Imaging GmbH. (2018). *InfiniteFocus*. Acedido em: 2 de setembro de 2018, em: <https://www.alicon.com/products/infinitefocus/>.

[48] KERN e SOHN GmbH. (2018). *YDB-03 Universal density set*. Acedido em: 17 de setembro de 2018, em: <https://www.kern-sohn.com/shop/en/accessories/accessories/YDB-03/>.

ANEXO A- FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAIS

2. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS	
SUBSTANCE/MIXTURE : MIXTURE	
Polyolefin-modified Polyoxymethylene : 60.0wt% ≥	
Paraffin Wax : 30.0wt% ≤	
Ester WAX : 20wt% ≥	
CHEMICAL FORMULA	
Polyolefin-modified Polyoxymethylene : $[(CH_2-O)_p-/[CH_2CH_2O]_q)_n$ (Base resin)	
Paraffin Wax : C_nH_{2n+2}	
Ester WAX : $RCOOC_nH_{2n+1}COOR$	
File No. in Official gazette	
Polyolefin-modified Polyoxymethylene : (7)-129(Base resin)	
Paraffin Wax : (8)-414	
Ester WAX : (8)-422,	
CAS REGISTRY NUMBER	
Polyolefin-modified Polyoxymethylene : 24969-26-4(Base resin)	
Paraffin Wax : 8002-74-2	
Ester WAX : 26787-65-5	
UN CLASS : Not applicable	
UN NUMBER : Not applicable	

Figura A. 1- Composição do ligante M1 [1].

KRATON

K0061 Europe 1/15/2018		KRATON™ G1651 E Polymer		Data Document
Identifier : K061DDf17E				
Description				
Kraton G1651 E is a clear, linear triblock copolymer based on styrene and ethylene/butylene, S-E/B-S, with bound styrene of 31.5% mass. It is supplied from Europe in the physical forms identified below.				
<ul style="list-style-type: none"> • Kraton G1651 EU - supplied as undusted fluffy crumb • Kraton G1651 ES - supplied as fluffy crumb dusted with amorphous silica 				
Kraton G1651 E is used as a base material for compound formulations and as a modifier of thermoplastics. The inherent stability of the mid block suggests the use of this product in applications that must withstand weathering and high processing temperatures.				
Sales Specifications				
Property	Test Method	Units	Sales Specification Range	Notes
Polystyrene Content	KM 03	%m	30.0 TO 33.0	
Total Extractables	KM 05	%m	< = 1.6	
Antioxidant Content	KM 08	%m	> = 0.03	
Volatile Matter	KM 04	%m	< = 0.5	
Ash (ES)	ISO 247	%m	0.3 TO 0.5	
Typical Properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product)				
Property	Test Method	Units	Typical Value	Notes
Solution Viscosity	KM05	Pa.s	1.5	a
Specific Gravity	ISO 2781		0.91	
a Measured on 10% m/m solution in toluene at 25Å°C using a Brookfield viscometer LVT model				

Figura A. 2- Ficha técnica do TPE (SEBS) [1].

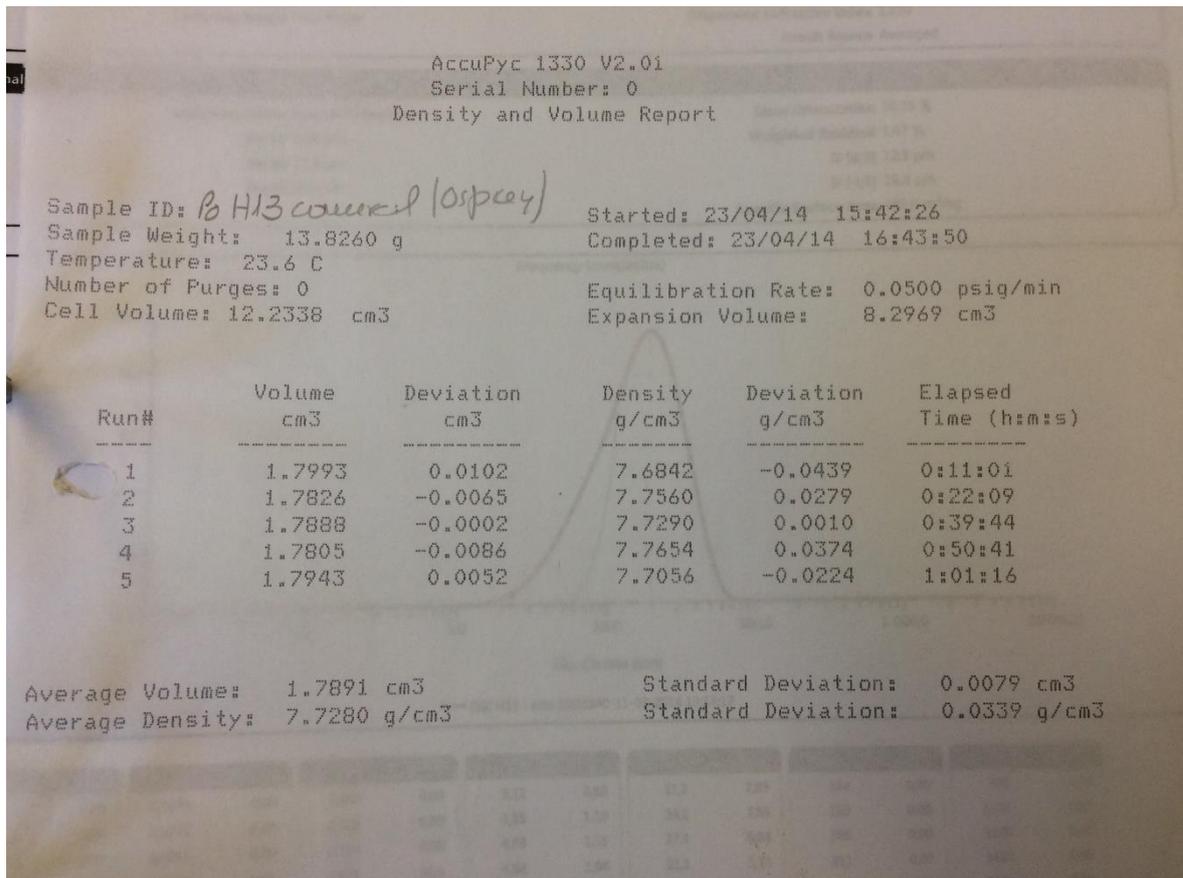


Figura A. 3- Densidade do pó de aço H13 comercial.