

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Renan Mury Nepomuceno

**Desenvolvimento de um Processamento de Sucata para Impressão
3D de Componentes Mecânicos na Indústria**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado Ao Departamento de Engenharia Mecânica
da PUC-Rio

Orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro
Coorientador: Daniel Luiz de Mattos Nascimento

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me guiado, me fortalecido e me ajudado a definir os melhores caminhos e escolhas durante toda minha caminhada no curso de Engenharia Mecânica.

Dedico este trabalho aos meus pais, Lorrane Mury Nepomuceno e Fernando Sebastião Nepomuceno, pela paciência, motivação, dedicação, por todo apoio para vencer mais essa etapa da minha vida. Sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

Agradeço o companheirismo e o incentivo de sempre, aos meus amigos Nicholas de Carvalho Ribeiro e Mateus Aguiar Rodrigues Lima que durante anos compartilharam comigo apoio, amizade e parceria. Hoje são os irmãos que a engenharia me presenteou.

Gostaria de agradecer a Helena Lamego Fernandes por ser minha companheira, parceira, por estar presente na minha vida em cada luta, me motivando todos os dias a vencer, sem me deixar desanimar um dia sequer.

Agradeço ao meu orientador Jaime Tupiassú Pinho de Castro, pela confiança, pelos sábios conselhos e sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato ao meu coorientador, Daniel Luiz de Mattos Nascimento, pelo incentivo desde o início do trabalho, pela paciência, auxílio sempre que necessário, e por todas as oportunidades que me proporcionou.

Obrigado também à professora Bruna Brito do CEFET pelo apoio, pelas sugestões e por compartilhar seus conhecimentos comigo sempre disponível a me ajudar.

Agradeço aos meus companheiros de trabalho Vitor Heitor e Rodrigo Caiado pela orientação e apoio para desenvolver este trabalho. Obrigado ao Instituto Tecgraf pela oportunidade proporcionada, e a PUC-Rio pela qualidade no ensino.

RESUMO

Desenvolvimento de um Processamento de Sucata para Impressão 3D de Componentes Mecânicos na Indústria

O objetivo deste estudo é projetar um processo sustentável de reciclagem de sucatas de metal, através do seu uso como matéria-prima para a fabricação de um pó que alimentará uma impressora 3D de metal. Serão investigados todos os processos que possibilitam uma aplicação real, verificação de suas propriedades mecânicas e comparação com os componentes produzidos por métodos tradicionais. A discussão é, no entanto, verificar a viabilidade da implementação da Manufatura Aditiva (MA) através de práticas de Economia Circular (CE), listar os processos e métodos para todas as etapas do processo e como este poderia beneficiar a sustentabilidade dentro de uma indústria. Utilizando uma abordagem baseada em revisão da literatura, seguida de uma pesquisa de campo em ferros velhos para explorar o uso de sucatas de metal, aplicação de grupos focais com engenheiros especialistas de uma indústria multinacional do setor automotivo, seguido da proposta de um modelo conceitual para o tratamento das sucatas e por fim foram feitos ensaios de tração em corpos de prova impressos em PLA para caracterização do material. Portanto, as contribuições deste trabalho abrangem a unificação das tecnologias de impressão 3D com sustentabilidade e imersão numa cadeia produtiva real, desenvolvendo um novo modelo para apoiar a cadeia de sucata. Pode-se inferir através dos resultados dos testes de tração no material a influência real dos parâmetros de impressão no componente final e adquirir conhecimento para pesquisas futuras. Conclui-se também que os resultados das entrevistas com engenheiros especialistas, pesquisas de campo e da literatura que o modelo pode ser usado para reinserção das sucatas como matéria-prima para fabricar produtos sob demanda, podendo então ter implicações sociais e ambientais em um momento de rápida mudança de tecnologia, estabelecendo um modelo sustentável que recicla resíduos de materiais como sucata, um problema notável nas Megacidades.

Palavras Chaves: Manufatura Aditiva, Economia Circular, Sustentabilidade, Material Reciclado, Metais de Sucata, Metalurgia do Pó, PLA, Impressão 3D, Ensaio de Tração.

ABSTRACT

Development of a Scrap Processing for 3D Printing Mechanical Components in the Industry

The purpose of this study is to design a sustainable metal recycling process through its use as a raw material for the manufacture of a powder that will supply a 3D printer. Will be investigated all the tests performed with the actual product, verification of mechanical properties and a comparative study with components produced through traditional processes. However, the discussion is to verify the feasibility of the implementation of Additive Manufacturing (AM) through Circular Economy (CE) practices, listing the processes and methods for all stages of the process and how the model could benefit the sustainability within an industry. With approaches of the literature review, followed by a field research in junkyards toward exploring the use of metal scrap, applying focus groups interviews with experts of a multinational automotive industry, followed by the proposal of a conceptual model for the treatment of scraps and finally tensile strength tests were conducted on specimens printed in PLA for characterization of the material. Therefore, the contributions of this work cover the unification of the technologies of 3D printing with sustainability and immersion in a real productive supply chain, developing a new model to support the chain of scraps. It can be inferred through the results of the tensile strength tests the real influence of the 3D printer's parameters in the final component and acquire knowledge for future research. It is also concluded that the results of the interviews with expert engineers, field surveys and literature review that the model can be used to reinsert the scrap as raw material to make products on demand, and may then have social and environmental implications at a time of rapid change of technology, establishing a sustainable model that recycles waste materials such as scrap, a notable problem in Megacities.

Keywords: Additive Manufacturing, Circular Economy, Sustainability, Recycled Material, Scrap Metals, Powder Metallurgy, PLA, 3D Printing, Tensile Test.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2.	Background	2
2.1	Manufatura Aditiva (MA)	2
2.2	Economia Circular (Circular Economy - CE)	4
3	Estrutura do Trabalho	6
4	Revisão da Literatura	7
4.1	Processos de Trituração	7
4.1.1	Moinhos de Trituração	7
4.1.2	Atomização	9
4.1.3	Eletrólise	12
4.1.4	Outros Processos	13
4.2	Indução por Plasma	14
4.3	Metalurgia do Pó (PM)	16
4.3.1	Morfologia	20
4.4	Propriedades Mecânicas dos Materiais	21
4.4.1	Dureza	22
4.4.2	Ductilidade	22
4.4.3	Elasticidade	23
4.4.4	Curva Tensão x Deformação	24
4.5	Ensaio mecânicos e suas aplicações em impressão 3D	25
4.5.1	Ensaio de Fadiga	25
4.5.2	Teste de Resistência à Tração	26
4.5.3	Teste de Dureza	28
4.5.4	Desempenho Estrutural	29
4.5.5	Rugosidade e metrologia dimensional	30

5	Coleta de Dados	30
5.1	Classificação das Sucatas	30
5.2	Entrevistas com Grupo Focal	32
6	Desenvolvimento do Modelo Conceitual	33
6.1	Visão Geral do Modelo Proposto — Transformação das Sucatas em Componentes	33
7	Resultados e Implicações do Modelo Conceitual	35
7.1	Resultados do Grupo Focal	35
7.2	Aplicações do Estudo	37
8	Estudo de Caso Aplicado — Ensaio Mecânico em Corpos de Prova impresso em PLA	38
8.1	Impressão dos Corpos de Prova	38
8.2	Ensaio de Tração Aplicado	39
8.3	Resultados dos Testes	41
9	Conclusões da Pesquisa	44
9.1	Limitações da pesquisa	46
9.2	Futuro da pesquisa	46
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

Lista de figuras

Figura 1: Esquema do processo de funcionamento da impressora 3D tipo SLS (NANNAN et al, 2013).	3
Figura 2: Esquema do processo de funcionamento da impressora 3D tipo FDM (Adaptado de CARASU et al, 2018).	3
Figura 3: Ciclo de vida do aço reinserido na cadeia produtiva da economia circular (Adaptado de ARCELORMITTAL, 2016).	4
Figura 4: (a) Esquema do Moinho Triturador; (b) Esquema do Triturador Atritor; (c) Esquema do Triturador Vibratório (adaptado de RODRIGUES, 2004).	8
Figura 5: (a) Estrutura dos Atomizadores de Gás ou água; (b) e (c) Estrutura dos tipos de atomizadores de centrifugação (adaptados de PLOOKPHOL, 2017 e CHEN, 2018).	11
Figura 6: Detalhe da desintegração durante atomização a gás (Rodrigues 2004).	11
Figura 7: Ilustração da tocha do equipamento de Indução por Plasma (adaptado de BOULOS, 2011 e SALAZAR et al., 2012).	14
Figura 8: Partículas de carboneto de tungstênio antes e depois do processo de indução por plasma. (BOULOS, 2011).	15
Figura 9: Ilustração dos espaços intersticiais das partículas menores e maiores em uma camada de pó na impressão 3D. (MURR 2012).	18
Figura 10: Morfologia das Partículas após produção do pó (Adaptado de FREITAS, 2013).	20
Figura 11: Diagrama Tensão x Deformação convencional e real (BUFFONI, 2013).	24
Figura 12: Representação das possíveis posições de impressão. (Adaptado de UDDIN et al 2017).	27
Figura 13: Framework do modelo conceitual que reúne os processos para aplicação.	34
Figura 14: (a) Foto do modelo da impressora 3D Cliever CL2 Pro. (b) Corpos de prova na plataforma de vidro após impressão.	38
Figura 15: Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração norma ASTM D638.	39
Figura 16: (a) Máquina Instron para ensaio de tração. (b) Bancada experimental pronta para realização do teste.	40
Figura 17: Curva de Tensão x Deformação dos CP's testados.	42
Figura 18: (a) CP logo após fratura na máquina de tração. (b) Área transversal fraturada do CP. (c) Vista superior do CP.	43

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tabela comparativa dos vários processos de produção de pó.	13
Tabela 2: Técnicas e Métodos para caracterização pó.	19
Tabela 3: Morfologia das partículas e processos atuais para obtê-los.	21
Tabela 4: Lista de aços martensíticos encontrados em componentes de ferro velho atualmente	31
Tabela 5: Dimensões dos CP's medidas em laboratório antecedendo os testes.	40
Tabela 6: Propriedades mecânicas do material PLA.	41
Tabela 7: Propriedades mecânicas resultados dos testes de tração.	42

1 Introdução

Conhecida como a "4ª Revolução Industrial", a Indústria 4.0 marca a transição da evolução da tecnologia de sistemas embarcados para sistemas cyber-físicos. Um dos aspectos cruciais é permitir que tecnologias criassem objetos ou equipamentos que ligam o virtual e o mundo físico com redes inteligentes e processos de gestão independentes. A Manufatura Aditiva (MA) é a principal tecnologia que veio com o advento dessa Indústria. Neste contexto, a tecnologia MA permitiu a criação de peças tridimensionais diretamente de modelos CAD, adicionando os materiais camada por camada até o produto final. No entanto, este estudo trata de um método de inovação, uma vez que está lidando com materiais reciclados, algumas das metodologias necessárias foram encontrados em um número considerável de referências que propõem diversos cenários na sua implementação.

(QUINTANA et al., 2017), (ASGARI et al., 2018) compararam amostras de componentes impressos em 3D utilizando pós metálicos reaproveitados com aqueles fabricados diretamente com pó virgem em diversos materiais. Com base nos resultados experimentais obtidos e pelas diversas técnicas utilizadas em suas pesquisas, afirmam que a média do tamanho das partículas, microestrutura, as orientações/direções de impressão (vertical/horizontal) e as propriedades mecânicas são semelhantes com a dos materiais originais, com algumas divergências devido aos métodos experimentais que já foram analisados e corrigido por eles. Isso permite dizer que a atual pesquisa prediz resultados significantes.

O presente trabalho utiliza uma abordagem de diversos métodos, explorando as possibilidades na manufatura aditiva sustentável. A pesquisa é baseada na revisão da literatura, seguida de uma pesquisa de campo em ferros-velhos para explorar o uso de sucatas de metal como matéria-prima para a fabricação de um pó que seria utilizado por uma impressora 3D de metal. Foram aplicados grupos focais e entrevistas com especialistas da indústria para validá-lo. Como proposta prática foram realizados ensaios mecânicos segundo a norma ASTM D638 para ensaios de tração em corpos de prova de plástico, utilizando PLA impressos em 3D, já que o processo completo do modelo proposto foi impossibilitado por questões de investimento e falta de equipamentos. A ideia principal é unir as novas tecnologias com sustentabilidade aplicando conceitos de economia circular e que podem ser aplicados na indústria.

2. Background

2.1 Manufatura Aditiva (MA)

De acordo com (BHAVAR et al. 2014), é a principal tecnologia inteligente, onde objetos muitas vezes complexos geometricamente são produzidos pela deposição de sucessivas camadas de material. Esses sistemas da MA são capazes de produzir componentes funcionais de impressão sem a necessidade de ferramentas e produzir o mínimo de desperdício. Vários processos de impressoras 3D têm sido introduzidos no mercado por empresas industriais e comerciais (NANNAN *et al.*, 2013), (GOLDSBERRY, 2014). De acordo com (MURR, 2012), existem diversos tipos de impressoras 3D, cada uma processando propriedades e processos de impressão, tais como: SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Fitting), EBM (Electronic Beam Melting), LOM (Laminated Object Manufacturing), BJ (Binder Jetting), FDM (Fused Deposition Modeling) etc. Neste trabalho as impressoras de sinterização a laser para pós metálicos (SLS) e a de deposição por fusão (FDM) para polímeros serão analisadas e estudadas.

O processo é iniciado na construção de uma peça em sistemas CAD 3D e são convertidos por softwares apropriados para permitir uma construção do componente. Para as impressoras de metal, um braço interior (roller), tem a função de distribuir o material em pó na plataforma de impressão. Com as seções XY da peça no projeto gráfico, o arquivo 3D então guia o laser sobre a substância em pó em pontos específicos, o material é aquecido a temperaturas muito elevadas, o pó é fundido e transformado em um objeto sólido. A plataforma da impressão é então rebaixada a uma distância que é igual à espessura de uma camada assim que o material tenha sido solidificado. O braço deslizante distribui mais material sobre a plataforma, que é, em seguida, aquecida pelo laser (para impressoras metálicas), e todo esse processo é repetido diversas vezes até que a última camada tenha sido concluída. Um exemplo deste processo pode ser visualizado na Figura1. abaixo:

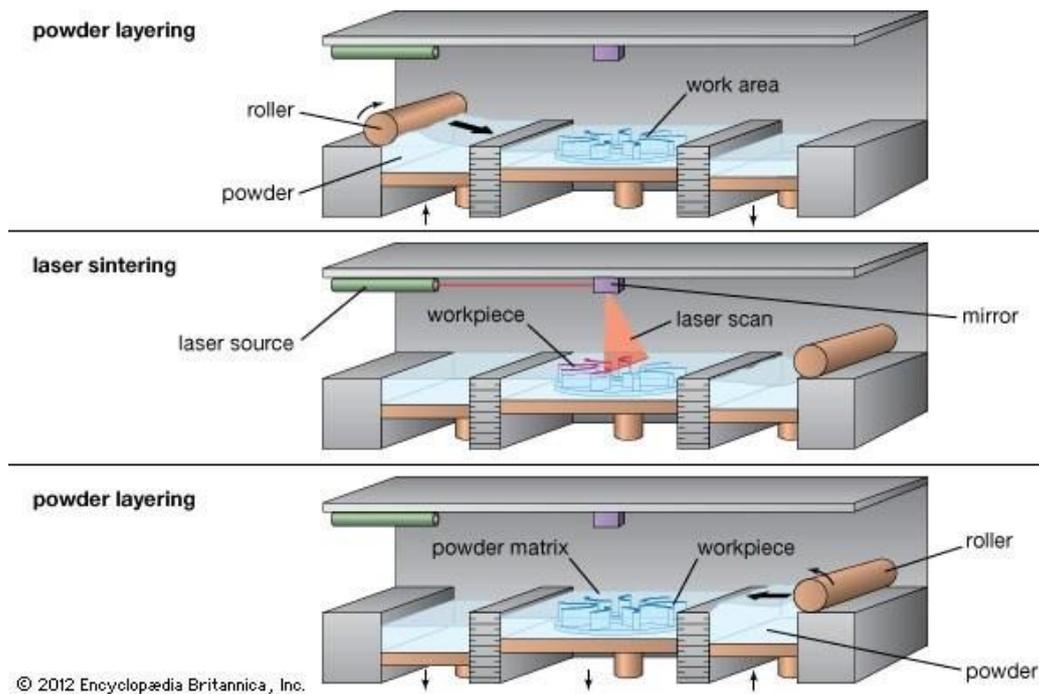


Figura 1: Esquema do processo de funcionamento da impressora 3D tipo SLS (NANNAN et al, 2013).

Da mesma forma que as impressoras metálicas, as impressoras FDM, entretanto, utilizam um filamento termoplástico que é aquecido até chegar ao seu ponto de fusão e, em seguida, é extrusado da mesma forma de camada por camada até se tornar um objeto tridimensional. Esse processo pode ser visto na Figura 2 a seguir:

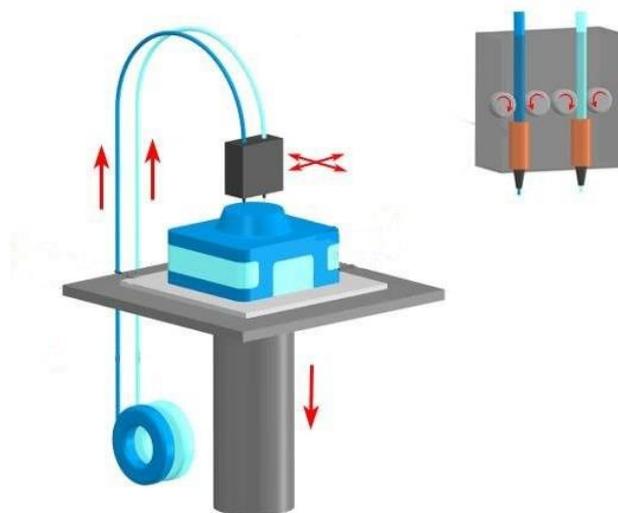


Figura 2: Esquema do processo de funcionamento da impressora 3D tipo FDM (Adaptado de CARASU et al, 2018).

Os principais parâmetros que influenciam o processo de sinterização são a potência do laser (%) (para o caso de impressoras metálicas), a velocidade de varredura (mm / s) e a distância entre linhas de varredura (mm). De acordo com (SLOTWINSKI e GARBOCZI 2015), existem vários obstáculos associados com materiais da MA. Algumas das necessidades técnicas que lhes estão associados incluem:

1. Relações entre as propriedades dos materiais e propriedades do pó são limitada;
2. Caracterização dos materiais da MA é necessária, incluindo as características do material de entrada, tais como o tamanho do pó, morfologia e química;
3. Não existem métodos padronizados específicos para a condução desses materiais em estudos —interlaboratoriais
4. Os fatores que variam de máquina para máquina;
5. Formação de matéria-prima de material, incluindo os pós metálicos, é limitada.

2.2 Economia Circular (Circular Economy - CE)

CE é um novo modelo de negócio que pode ajudar as organizações e mover a sociedade para o desenvolvimento sustentável (MCDOWALL et al., 2017). Os processos de fabricação tradicionais que seguem uma cadeia linear, onde a última etapa é o descarte do material, podem retornar para a cadeia produtiva com as práticas da economia circular. Um exemplo da aplicação prática deste conceito, pode ser visto na Figura 3, onde é mostrado o ciclo de vida do aço e toda a sua cadeia de produção:

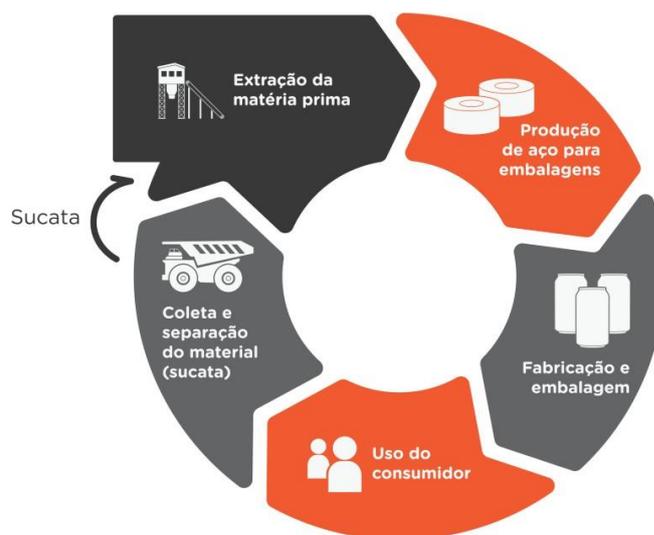


Figura 3: Ciclo de vida do aço reinserido na cadeia produtiva da economia circular (Adaptado de ARCELORMITTAL, 2016).

De acordo com (DESPEISSE et al., 2016), para melhorar radicalmente a eficiência dos recursos da CE, é necessário eliminar o conceito de resíduos a partir do modelo linear *-take-make-waste*. As práticas da CE permitem pensar em um processo com a sustentabilidade, devido ao final de um processo ser o começo de outra, minimizando significativamente os resíduos dos processos, que são normalmente depositados no meio ambiente. (MACARTHUR et al., 2015), sugere que a CE é baseada em dois ciclos principais: uma técnica e uma biológica. O ciclo técnico exalta a extensão de tempo de vida de um produto que apresenta estratégias circularidade incluindo a reutilização, reparação, remodelação e condicionamento (ZHAO et al., 2015). Para o ciclo biológico, o uso de materiais renováveis e reutilização da energia, pode regenerar os ecossistemas. Mantendo esse conceito, os autores acreditam que a CE pretende criar um sistema de circuito fechado, onde os recursos são conservados e trazem de volta para o ciclo de vida depois de ser usado (GAUSTAD et al., 2018).

(GIURCO et al., 2014) afirma que o ponto entre a concepção de sistemas de alto desempenho com entradas de materiais complexos, que também são complexos de reciclar, em comparação com os sistemas mais simples, representa um ponto de tensão. Isso precisa ser considerado com cuidado manufatura aditiva, para não perturbar os modelos de negócios da produção em massa centralizada. Também é importante mencionar que sempre haverá perdas de um sistema de reciclagem como ditado pela Segunda Lei da Termodinâmica e destacado por (REUTER et al., 2013). Assim, a disseminação da sua aprovação trata algumas barreiras que são facilmente encontradas (TORSTENSSON, 2016) e podem ser classificadas em categorias (SHAHBAZI et al., 2016) tais como, barreiras financeiras, estruturais, operacionais, tecnológicas, culturais, sociais, políticas e econômicas.

Barreiras de acordo com alguns autores (SHAHBAZI et al 2016), (RANTA et al 2017), que se superadas terão uma crescente atenção e apoio na sua implementação para abordar os novos sistemas de gestão sustentáveis. Assim, para alcançar a circularidade no modelo, o estudo deve aderir práticas de CE combinados e gestão da cadeia de fornecimento sustentável.

3 Estrutura do Trabalho

Este estudo pretende propor um modelo sustentável circular de impressão em 3D para reciclagem de sucatas, proporcionando uma inovadora metodologia para os produtores de pó de metal a serem utilizados em processos da manufatura aditiva com práticas CE. Os resultados podem ser utilizados para caracterizar as propriedades de pós de metais e incluí-los dentro da cadeia de fornecimento sustentável. A pesquisa consistiu das seguintes etapas:

- i. Revisão da Literatura: nesta etapa uma pesquisa teórica foi realizada para adquirir conhecimentos e estudos relevantes e avaliar suas respectivas contribuições na criação do processo. Bases de dados, incluindo Scopus (scopus.com), Springer (springerlink.com) e Elsevier (sciencedirect.com), foram usadas. Para a busca da literatura, critérios de inclusão e exclusão contendo palavras-chave globais 'Manufatura Aditiva'; 'Indústria 4.0'; 'CE'; 'Processos de Fabricação de Pós'; 'Material reciclado' e outras palavras-chave específicas para as seções de literatura a ser conduzida foram utilizadas. Este conteúdo foi discutido e explicado na seção 4, em que as questões conceituais de processos de fabricação do pó, caracterização dos materiais na metalurgia do pó, propriedades mecânicas e ensaios mecânicos foram abordados por pesquisas relevantes da literatura.
- ii. Análise documental e observações diretas: nesta etapa a coleta de dados exploratórios na classificação das sucatas foi aplicada através de pesquisa de campo em ferros-velhos. O material de aço inox martensítico foi escolhido para configurar uma forma de classificar e separar os componentes que podem ser reciclados, permitindo uma abordagem de revisão documental qualitativa. A partir daí, foi possível propor um modelo conceitual para os processos de transformação da sucata e a integração entre as práticas CE e tecnologias da MA. Este procedimento pode ser melhor visto nas seções 5.2 e 6.
- iii. Entrevistas com grupo focal: nesta etapa entrevistas com os engenheiros de uma montadora e fábrica automotiva multinacional foram conduzidas, com o intuito de adquirir informações relevantes para a pesquisa e a aplicação do modelo conceitual de transformação da sucata em componentes mecânicos, incluindo as barreiras, desafios e obstáculos à sua implementação. Os resultados serão abordados nas seções 5.1 e 6.

- iv. Ensaaios em materiais Impressos: nesta seção uma aplicação prática foi realizada, abordando as últimas etapas do modelo de transformação da sucata, onde são aplicados os ensaios mecânicos para validação do material. Por motivos de investimento e falta de equipamentos para as primeiras etapas do processo (trituração da sucata e tratamentos em pó), foram utilizados corpos de prova impressos em PLA para exemplificar os testes mecânicos que necessitariam ser feitos no componente reciclado. Os procedimentos e resultados serão discutidos na parte de estudo de caso na seção 8.

4 Revisão da Literatura

4.1 Processos de Trituração

A trituração é o processo de quebra e separação do material agregado, para fabricação do pó. A Metalurgia do Pó (MP) tem uma influência significativa na fabricação de produtos na indústria aditiva. Existem diversos processos para a obtenção do pó de metal, e a sua escolha depende do conjunto de propriedades do material e as características do pó que são desejadas, e que irão depender da aplicação a que se destina. Alguns deles serão entendidos no presente estudo. Os processos mais conhecidos são:

1. Os Moinhos de Trituração (Grinding Mills);
2. Atomização;
3. Eletrólise;
4. Redução de Óxidos;
5. Processo de Carbonila;

Neste estudo serão tratados apenas os três primeiros processos, mas uma breve explicação sobre os outros será feita na subseção final. Os últimos processos possuem algumas dependências dos três primeiros.

4.1.1 Moinhos de Trituração

É um processo mecânico que consiste em fragmentar o material em partículas para um determinado tamanho. Os moinhos de trituração mais comuns são os Trituradores Vibratórios, Atritores e Moinhos Trituradores, que possuem as bolas de moagem (grinding balls). Nestes processos o material encontra-se dentro de um cilindro oco que gira em torno do eixo. Dentro

estão bolas de moagem, feitas de um material duro, tal como aço inoxidável, aço cromado ou cerâmica, que serão responsáveis pela quebra do material. Diferentes métodos de trituração podem impor forças diferentes sobre as partículas, tais como a compressão, cisalhamento, atrito, impacto ou forças internas. Pesquisadores (KHAMMAN et al., 2009), (LIU et al., 2010), (ALMANGOUR et al, 2017.), (FORTUNATO et al., 2018) estudaram vários tipos de trituração, tais como os citados acima e observaram como o tempo e a velocidade influenciam nas propriedades das partículas produzidas. Um esquema físico de como funcionam esses trituradores pode ser visto na Figura 4 a seguir:

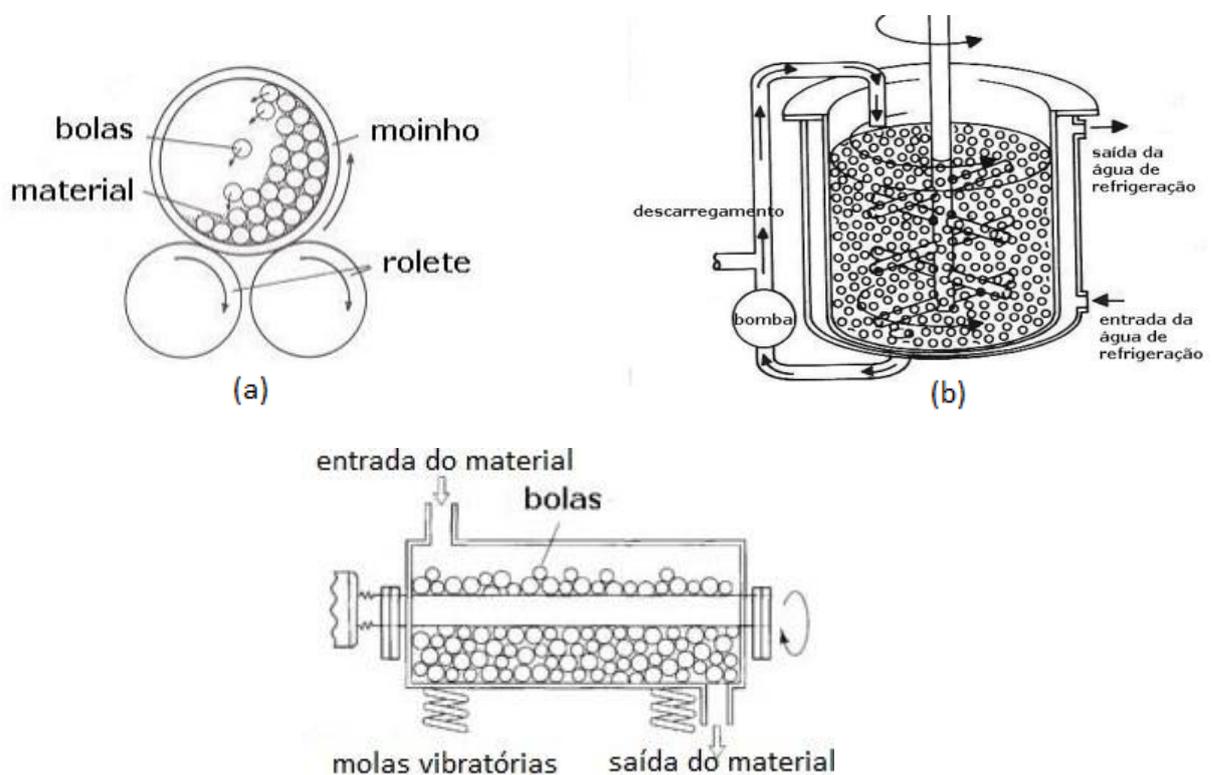


Figura 4: (a) Esquema do Moinho Triturador; (b) Esquema do Triturador Atritor; (c) Esquema do Triturador Vibratório (adaptado de RODRIGUES, 2004).

Os resultados inferem que o tempo de trituração influencia não apenas o desenvolvimento da reação em estado sólido dos materiais, mas também no tamanho e na morfologia das partículas. Em geral quanto mais tempo o material permanece na trituração, menor é o tamanho da partícula no produto final, mas um maior grau de aglomeração de partículas foi observado na continuação da moagem se permanecer por um longo tempo, como mencionado por (KHAMMAN et al., 2009). Estimar um tempo para um tamanho específico acaba em um problema relativo, porque cada material apresenta uma propriedade diferente e reage de maneiras diferentes. Por exemplo, uma faixa de 10 - 100nm pode ser

obtida em 10 - 25h no moinho. (CHARKHI et al., 2010), (KURLOV et al., 2013), para otimizar as condições de moagem, parâmetros efetivos podem ser selecionados e vários conjuntos de experimentos podem ser projetados com base em métodos estatísticos.

Além disso, a trituração por moinhos pode ser usada para -síntese mecânica, através desta técnica diferentes materiais de partículas são misturados e moídos de tal forma que tenham dispersão ou mesmo dissolução. Na vibro-moagem, tem-se uma maior intensidade do impacto, porém o ruído é elevado (RODRIGUES, 2004). Existe também a possibilidade do uso de moagem úmida ou o uso de aditivos para evitar a aglomeração de partículas que deve ser bastante eficiente. (MCCORMICK et al., 2001), (NGUYEN et al., 2018), (RAHAEI et al., 2012), apresentam trabalhos de ativação de reações químicas por moagem de reagentes em um moinho de bolas, adicionando diferentes agentes de controle do processo líquido. As forças de corte aumentam durante a trituração, porém a quantidade desse aumento depende da amostra; normalmente há um aumento máximo para as amostras não tratadas, provavelmente devido a altas tensões térmicas e reação entre óxidos de aço, e aumento mínimo para as amostras tratadas termicamente. A razão está relacionada ao -amolecimento térmico associado ao tratamento térmico utilizado.

A parte de trituração é a primeira etapa do processo conceitual para este trabalho. Na trituração devido à quebra das partículas há a perda das propriedades mecânicas do material, sendo necessário um pós-tratamento que será discutido na seção de indução por plasma.

4.1.2 Atomização

A Atomização é uma técnica para a produção de pós pela desintegração de metais líquidos puros, ou ligas metálicas. Neste processo, o metal fundido passa através de um orifício formando um filete líquido e é atacado por um jato. As principais categorias que podem classificar a atomização são: Atomização a Gás (ou Ar) (GA), Atomização a Água (WA) e Centrifugação (CA). A atomização de água e gás são os processos mais comuns para a produção de pós, geralmente necessitam de temperaturas superiores a 1600 °C. O metal ou liga metálica é fundido por um processo metalúrgico, tratado nos cadinhos de fusão e depois é transferido para um -funil, dentro dele, é gerado um filete de metal líquido que é desintegrado por um jato (ou vários) de água ou gás. O arranjo de atomização pode variar, o que se refere ao ângulo de atomização, ao número de jatos e ao diâmetro do filete de metal líquido. Apesar da semelhança, ainda existem diferenças entre os dois processos no produto final.

(YENWISSET et al, 2011), (JIAO et al, 2017), (OGIHARA et al, 2017); analisaram as principais variáveis que influenciam a condição de funcionamento do processo de atomização de água, que afeta os tamanhos das partículas, formatos e distribuição de partículas de metal em pó. Com o aumento do ângulo de vértice, uma quantidade significativa do fluxo de energia cinética e turbulência são transferidas para o fluxo de metal líquido, o que facilita a sua desintegração. Conseqüentemente, as partículas mais finas são produzidas com maior ângulo de vértice quando a velocidade do jato de água se mantém constante. Outra maneira é através do aumento do diâmetro de jato de água, um gradiente de pressão estática mais alto é obtido ao longo da linha central do escoamento de aço líquido. Resultados sugerem que a alta pressão e taxa de fluxo levam à formação de pó com uma distribuição de tamanho de partícula relativamente estreita. É conhecido (TOYOSHIMA et al., 2005), que os pós de metal derivados de atomização de água, muitas vezes apresentam alto teor de oxigênio, devido ao conteúdo de oxigênio presente na água durante o processo de fratura do material. Pós atomizados à água tendem a ter uma superfície rugosa, mais ainda que os pós atomizados a gás.

Para comparação, HOEGES et al., (2017) foram utilizados corpos de prova construídos de ambos os processos água e gás de atomização, resultando que os valores para o módulo de elasticidade, resistência à deformação, resistência à tração, alongação e dureza variam ligeiramente em relação de um para outro. As investigações com respeito à atomização a gás e as características dos pós em termos de microestrutura, porosidade, teor de gás e de poros é de grande relevância. Segundo os autores (WANG et al, 2016), (YANG et al, 2017), (CHEN et al, 2018), argônio e nitrogênio são os gases mais utilizados neste processo. O teor de gás e a porosidade nos pós aumentam com o aumento do tamanho das partículas para cada tipo de pó.

Além da atomização do fluido com gás ou água, é possível obter o pó através da atomização por centrifugação. Ela ocorre pela desintegração através da energia cinética derivada da rotação de uma barra metálica durante sua fusão, geralmente obtida pelo arco elétrico; ou o metal derretido é diretamente injetado em um disco giratório e se fragmenta em pequenas gotas. (FOLIO et al., 2000), (TIAN et al., 2017), estudaram os parâmetros de atomização centrífuga com discos giratórios que influenciam as características do pó. Um disco maior tem uma força centrífuga maior na borda, então a velocidade de desintegração do fundido é maior, isto é, com o aumento da velocidade angular as partículas tornam-se mais finas por causa da maior força centrífuga que espalha a película de metal líquido na superfície do disco. A Figura 5 a seguir exemplifica os equipamentos de atomização que são utilizados:

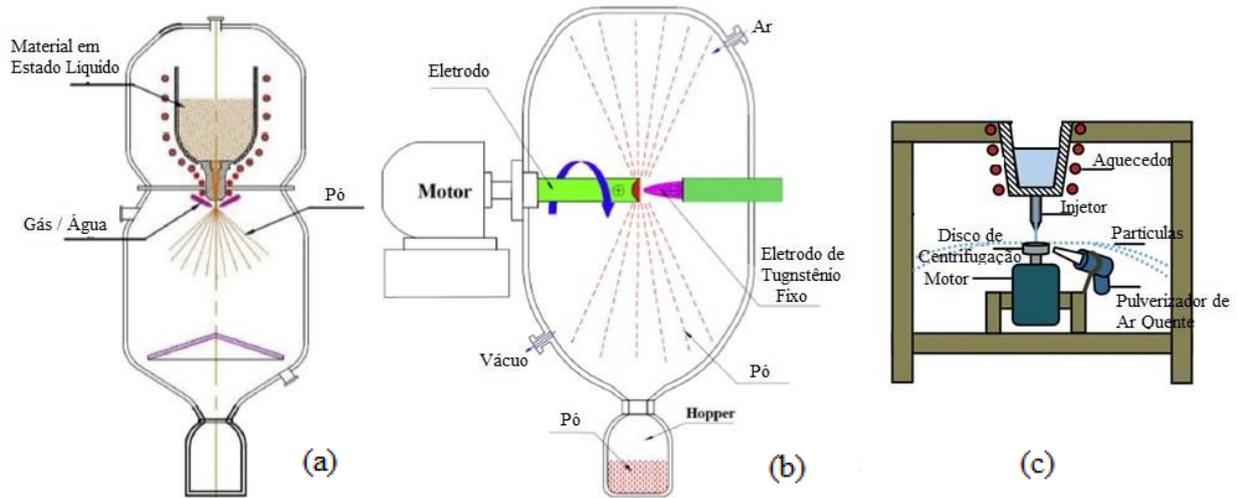


Figura 5: (a) Estrutura dos Atomizadores de Gás ou água; (b) e (c) Estrutura dos tipos de atomizadores de centrifugação (adaptados de PLOOKPHOL, 2017 e CHEN, 2018).

É importante enfatizar que a maioria das partículas no processo de atomização a gás e a água são arredondadas, na centrifugação pode ocorrer flocos irregulares e alongados. O pó de forma irregular é comumente desejado para algumas aplicações particulares, por exemplo, o pó de zinco usado como material de fricção para fabricar pastilhas de freio na fabricação de peças automotivas. Assim, a atomização é um processo muito flexível e fácil de controlar e pode ser aplicada a um grande número de produtos, o que a torna bastante atraente.

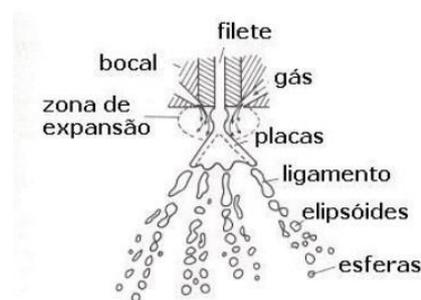


Figura 6: Detalhe da desintegração durante atomização a gás (Rodrigues 2004).

Um tempo de atomização longo resulta em partículas mais arredondadas e com uma maior tensão superficial do líquido, maior será a tendência de formar partículas arredondadas. O tamanho da partícula na atomização do gás depende da taxa de fluxo do metal (dM_M/dt), da taxa de fluxo do gás (dM_G/dt) e do fator β que leva em conta o projeto do bocal de atomização, o tipo de gás, metal, temperatura e as pressões (FREITAS, 2013):

$$d = \beta \frac{dM_M/dt}{dM_G/dt}$$

Equação 1: Equação do tamanho aproximado das partículas na atomização de gás.

4.1.3 Eletrólise

Em um processo de eletrólise, o material do ânodo é dissolvido e é depositado no material do cátodo. Um pó pode ser produzido por esta precipitação na superfície do cátodo dentro de uma célula eletrolítica sob certas condições de operação. Uma diferença de potencial externa ativa o processo. Após este processo, o depósito formado no cátodo é lavado, seco, moído, classificado e recozido. O pó formado pelo processo eletrolítico é geralmente dendrítico ou esponjoso. As propriedades específicas do pó dependem das condições durante a deposição e as operações. (HOROBIN et al., 2003), (LI et al., 2007), (WANG et al., 2011), estudos relataram que o consumo de energia do processo de eletrólise é geralmente menor do que o de outras tecnologias existentes, embora as variações possam ser significativas entre os diferentes óxidos metálicos.

A temperatura e o tempo de eletrólise são os dois fatores mais importantes geralmente observados, a sinterização de um pó metálico torna-se significativa quando a temperatura atinge ou está acima de dois terços do ponto de fusão (em Kelvin) do metal. O terceiro parâmetro de controle é a tensão da célula, porque a velocidade de redução eletromagnética aumenta com a tensão da célula. Uma tensão da célula maior significa um tempo menor para redução completa e, portanto, mais sinterização do pó metálico produzido no cátodo. (CHENG et al., 2015), (WITHERS et al., 2016). Observa-se também que a polarização mais forte do catodo levará a produtos mais finos com estrutura cúbica.

O aumento da densidade aparente da partícula pode ser esperado com aumento da concentração de íons, temperatura, intervalo de escovação, taxa de circulação de eletrólitos e concentração decrescente de eletrólito de suporte e densidades de corrente (PAVLOVIĆ et al., 2000), (ZANON et al., 2015). No processo de eletrólise, por exemplo, o pó de zinco eletrolítico é produzido com morfologia dendrítica e porosa para melhorar a operação de uma bateria, já que vários pesquisadores estudaram as baterias de zinco-prata (MOJTAHEDI et al., 2011). A maioria dos pós produzidos pelo processo de eletrólise são destinados a componentes com funções elétricas. Embora o processo eletrolítico esteja tecnicamente estabelecido para a produção de pós metálicos, alguns problemas ainda existem. A estabilidade química do banho é muito sensível; contaminantes ou impurezas podem dificultar a formação do tanque e somente pós elementares podem ser produzidos, o que limita muito o processo.

4.1.4 Outros Processos

No início da seção, foi feita uma lista de outros processos comuns para a produção dos pós. Como são processos que funcionam com materiais e métodos específicos, terão apenas uma breve explicação de seu funcionamento. Segundo (RODRIGUES, 2004); os pós de redução de óxido caracteristicamente exibem a presença de poros dentro de cada partícula de poeira e são, portanto, considerados esponjosos. O processo é caracterizado pela geração de gases como monóxido de carbono e hidrogênio e é dependente da temperatura do ponto de vista termodinâmico. A estabilidade do óxido, considerando o gás redutor usado, deve ser considerada. Do ponto de vista cinético, deve-se considerar a penetração do gás no interior do óxido, porque os pós obtidos contêm a maior parte dos óxidos residuais dentro das partículas.

A Carbonila é o processo que produz compostos gasosos da Me (CO) tipo X chamados Carbonilos, obtido pela temperatura e pressão do CO controlada. O tamanho e forma das partículas dependem da concentração de carbonilo e a temperatura no recipiente de decomposição. Quanto maior a temperatura e a pressão, mais fino os pós serão e com a tendência para formar partículas esféricas (BARBIS et al., 2015). Com o levantamento teórico e coleta de dados, uma tabela para avaliar o que a indústria pode adotar em sua fase de trituração com tamanho de partícula, morfologia, tempo e custo foi feita e pode ser visualizada na Tabela 1 a seguir.

Técnica	Estimativa de Tamanho de Partículas (mm)	Morfologia	Tempo (h)	Custo
Trituradores Mecânicos	1,5-100	Irregular	10-25	Moderado
Atomização de gás	10-40	Esférico	<1	Alto
Atomização de água	20-2000	Arredondado	<1	Moderado
Eletrólise	0,1-30	Dendrítico	2-10	Moderado
Redução de óxidos	1 -	Poroso	1-7	Moderado
Carbonila	1 - 10	Esférico	Não especificado	Baixo

Tabela 1: Tabela comparativa dos vários processos de produção de pó.

4.2 Indução por Plasma

Após um processo de trituração, as partículas geralmente perdem suas propriedades mecânicas, precisando ser recuperadas por um processo físico-químico. Além disso, as partículas não apresentam regularidade em suas formas, ou seja, cada partícula apresenta um tamanho e morfologias distintas. Esta é de longe uma péssima característica, por exemplo, para sua utilização em impressoras 3D, principalmente pelo fato de que na impressão 3D as partículas precisam estar as mais unidas possíveis, para que não haja poros no interior do componente final.

Para tal, o processo de Indução plasma, de acordo com (BOULOS, 2011) é responsável pela esferoidização de partículas, passando-as em um sistema de aquecimento e de fusão em um gás a extremas temperaturas (formação do plasma), seguida pelo recolhimento das gotículas fundidas, como partículas esféricas sólidas. Através deste processo, espera-se uma melhoria na densidade e compactação das partículas; remoção de partículas indesejáveis; redução do oxigênio que podem acumular em materiais reutilizáveis, como é o caso do presente trabalho; eliminar cavidades internas e fraturas no pó e alterar a morfologia da partícula, deixando-o em uma superfície de preferência esférica. O processo de indução por plasma pode ser visto na Figura 7 a seguir:

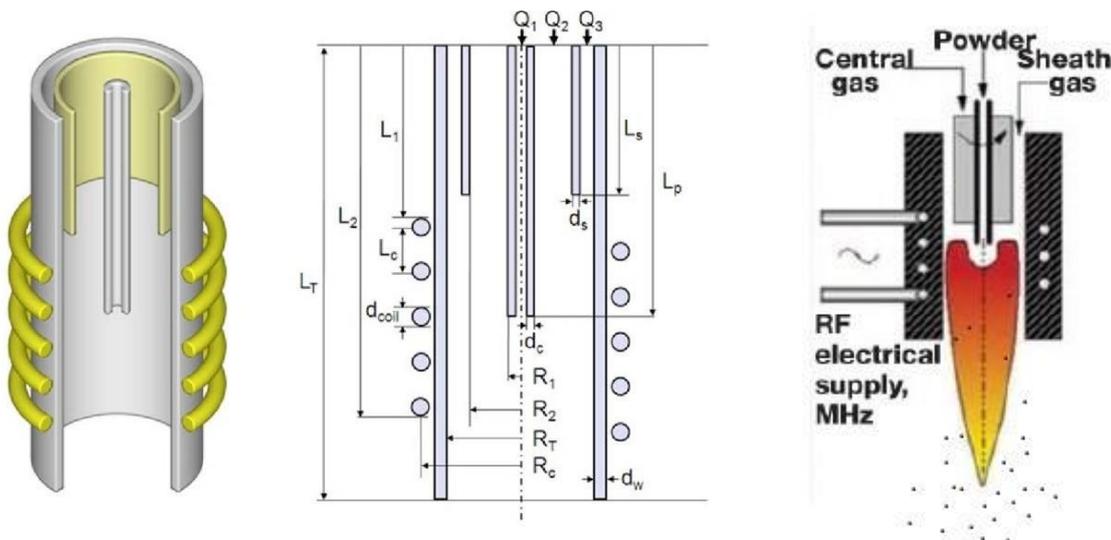


Figura 7: Ilustração da tocha do equipamento de Indução por Plasma (adaptado de BOULOS, 2011 e SALAZAR et al., 2012).

A tocha de plasma na figura acima é composta por dois tubos concêntricos e entre eles há uma pequena distância anular. O tubo externo, de raio R_T , geralmente feito de um material inerte e não condutor, como o quartzo ou a cerâmica, é chamado de tubo de confinamento do plasma. Na zona de descarga, este tubo de confinamento é envolvido por uma bobina de cobre comportando algumas espiras. Através dela, passa-se uma corrente alternada de alta frequência, induzindo um campo magnético alternado de alta frequência na região de descarga. Acoplando esse campo magnético com um material condutor, como o plasma, uma corrente induzida o aquece através de aquecimento ôhmico (um processo em que a corrente elétrica é passada através de materiais com o objetivo principal de aquecê-los). Esta bobina curta geralmente é resfriada por um fluxo circulante de água.

Um tubo intermediário do mesmo material que o externo, de raio R_2 , com a finalidade de canalizar um fluxo de gás Q_3 que escoar ao longo da parede do tubo de confinamento a fim de reduzir as perdas condutivas e convectivas do plasma. O tubo no centro da tocha permite a injeção axial dos materiais a serem tratados em Q_1 no centro da descarga. Isso garante a dispersão total do pó no fluxo de plasma e o aquecimento e fusão uniforme de todas as partículas. Entre o tubo intermediário e o tubo central é introduzido o fluxo de gás plasmático Q_2 onde ocorre a descarga ionizante explicada acima, onde o campo magnético da bobina com o plasma condutor gera a corrente indutiva para aquecer o plasma e conseqüentemente o material a ser tratado. O plasma é composto por gases parcialmente ionizados a temperaturas muito elevadas (5000- 20000 K).

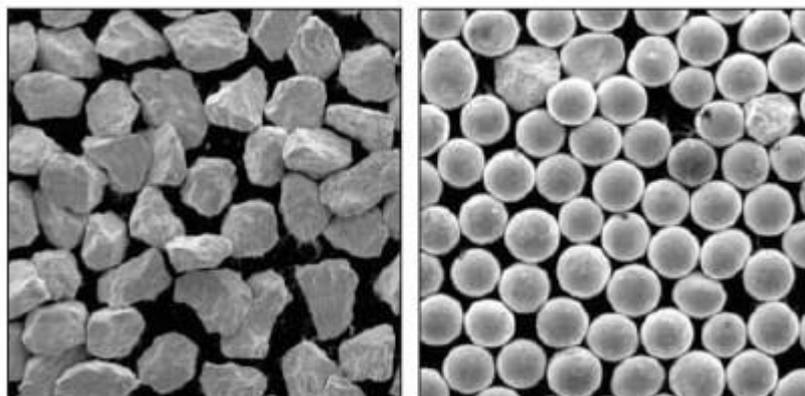


Figura 8: Partículas de carboneto de tungstênio antes e depois do processo de indução por plasma. (BOULOS, 2011).

De acordo com (YU et al, 2014), (KOTLYAROV et al, 2017), (WANG et al 2017), (CHEN et al 2018), (SUNGAIL 2018), no processo de plasma, o tamanho de partícula, morfologia e rendimento do pó é influenciada pelos fatores-chave tais como a potência do

gerador de plasma, a composição do gás e da pressão. Em geral, o rendimento de pó aumenta com o aumento da potência e da ventilação tal como a evaporação de metal torna-se maior. Assim, um equilíbrio entre a produção e o tamanho de partícula deve ser considerado.

4.3 Metalurgia do Pó (PM)

A Metalurgia do Pó (PM) tem uma grande influência na fabricação de produtos na indústria aditiva. De acordo com (DAWES et al 2015) a cadeia de fornecimento de pós metálicos utilizados na manufatura aditiva está atualmente experimentando crescimento exponencial e com esse crescimento surgem novos fornecedores de pós, novos métodos de fabricação de pós e aumento da concorrência. O elevado número de opções de cadeia de suprimentos torna um desafio significativo ao tomar decisões sobre a aquisição dos mesmos. Durante a sequência de construção de um componente em impressoras 3D, a matéria-prima de pó bruto é armazenada, e o método pelo qual o pó é introduzido na câmara de construção depende inteiramente do fabricante do equipamento. O impacto das propriedades químicas físicas e superficiais de um pó é demonstrado pelo comportamento do fluxo que pode ser adequadamente caracterizado pela reologia do pó (FREEMAN, 2007). Um avançado estudo e caracterização do pó fornecem informações sobre a energia necessária para determinado fluxo, a resistência ao fluxo do pó e o desempenho da sua compactação.

O comportamento do pó é dependente tanto da partícula quanto das variáveis externas (como por exemplo o tipo do equipamento que será utilizado), e é por isso que é tão complexo prever com precisão o desempenho do pó a partir de medições apenas das suas propriedades físicas. De uma perspectiva prática, muitas variáveis influenciam o comportamento do pó para viabilizar uma modelagem matemática precisa (FREEMAN, 2007). As principais propriedades que precisam ser analisadas são: escoamento; densidade; distribuição de tamanho; compressibilidade (ou embalagem) e morfologia (incluindo a esfericidade de partículas). Ao compreendê-los e controlá-los, as propriedades finais do material para diferentes aplicações podem ser melhoradas e se tornar mais confiáveis.

- (1) Escoamento (*flowability*): Pode ser descrito como a capacidade de um pó de escoar, sendo considerada uma característica comportamento multidimensional, o qual depende de muitas variáveis. Podem assim ser classificados em uma escala de livre fluxo (free-flowing) ou não fluentes (non-flowing) dependendo do seu comportamento nos equipamentos (PRESCOTT E BARNUM, 2000). O comportamento de

escoabilidade de um pó não é uma propriedade inerente do material, e sim um resultado da combinação entre suas propriedades físicas e o equipamento que vai utilizá-lo. De acordo com (FREEMAN, 2007), prever o desempenho do escoamento dos pós através de um determinado processo é de grande importância na indústria, onde intencionalmente as propriedades de fluxo dos pós mudam, muitas vezes resultando em paradas ou produtos de baixa qualidade. Os fatores que influenciam a escoabilidade de um pó incluem: tamanho de partícula, morfologia de partículas, distribuição de tamanho de partículas, teor de umidade e a natureza higroscópica (de absorver água) e eletrostática do material (WALTON, 2013). Existem muitas técnicas para determinar a fluidez dos pós (algumas delas serão discutidas mais adiante) com o objetivo de descrever o estado do pó no processo em questão. Os métodos podem ser classificados entre os que observam o comportamento do material durante o escoamento em seu estado consolidado (métodos diretos) e aqueles que determinam as propriedades de fluxo que devem estar conectadas com a escoabilidade em seu estado empacotado (métodos indiretos) (SANTOMASO E LAZZARO 2003).

(2) Densidade: Em pós, a densidade pode ser categorizada em densidade aparente (bulk density) e densidade batida (tapped density). A primeira é medida pela razão entre a massa e o volume (incluindo o volume vazio -interparticuladoll) de uma amostra de pó não aproveitada. A densidade batida é obtida quando uma quantidade de pó preenche livremente um volume conhecido, e é empacotado por batimentos sucessivos até que não haja mais variação de volume. Consequentemente, a densidade aparente depende da densidade das partículas de pó e do arranjo espacial das partículas (em impressoras 3D) (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2012).

(3) Distribuição do Tamanho: Pós com distribuição de partículas mais ampla e uma fração suficientemente alta de partículas pequenas apresentam maior propensão para obtenção de amostras densas. (MURR et al 2012) Ao lidar com a impressão 3D, a sinterização e o derretimento são mais facilmente alcançados para partículas menores, já que partículas pequenas podem compactar com mais eficiência, com menos volume intersticial. As partículas maiores têm espaços intersticiais maiores e podem ser preenchidas por partículas menores, como impurezas, sendo prejudiciais para um processo de impressão. Esta comparação pode ser visualizada na Figura 9 a seguir:

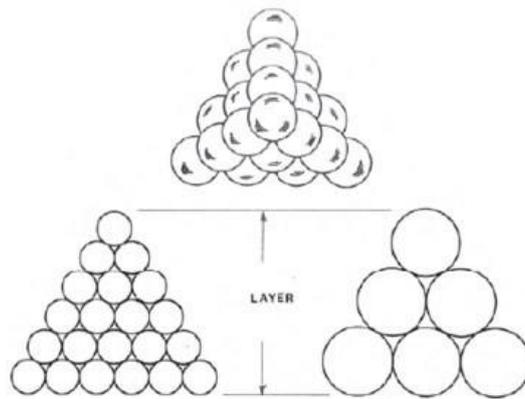


Figura 9: Ilustração dos espaços intersticiais das partículas menores e maiores em uma camada de pó na impressão 3D. (MURR 2012).

- (4) **Compressibilidade:** A compressibilidade dos pós metálicos depende de muitos fatores, incluindo propriedades morfológicas e mecânicas das partículas. Os elementos de liga, por exemplo, que aumentam o reforço da solução sólida de ferrita podem influenciar a compressibilidade dos pós de aço pré-ligados de acordo com (HRYHA et al., 2008). Quanto maior a compressibilidade, melhor as características do material e conseqüentemente do produto final, pois terá menor porosidade. Durante uma compactação, o pó exibe tensão ou endurecimento do trabalho, o volume diminui e a dureza aumenta (MONTES et al., 2018).
- (5) **Morfologia:** A forma de uma partícula tem um efeito profundo no desempenho do pó, uma vez que diz respeito a pressão, velocidade e acabamento final do produto. As formas disponíveis baseiam-se nas dimensões dos contornos de partículas bidimensionais, isto é, as sombras projetadas de um microscópio na tela por exemplo. A partícula pode ser dividida em categorias pela segunda sua forma: partículas aciculares, dendríticas, irregulares, flocos, esféricas, porosas, arredondadas e angulares (FREITAS 2013).

As propriedades podem ser separadas em extrínsecas, incluindo a morfologia do pó que atribui tamanho de partícula, forma, textura da superfície; e em propriedades intrínsecas que incluem a sua química em geral e sua microestrutura, que atribui porosidade interna e

estrutura cristalina. Cada uma dessas propriedades pode ser analisada e conduzida por testes e métodos padronizados e alguns deles seguem as normas da ASTM, tais como:

- Morfologia: Microscopia, Peneiras e Separadores, Difração a Laser;
- Microestrutura: X-Ray Diffraction (DRX), Focused ion beam (FIB), Microscopia;
- Química: Optical Emission Spectrometer (OES), X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS), Auger Electron Spectroscopy (AES);
- Reologia: Funil de Carney e Funil de Hall.

Algumas destas técnicas podem ser aplicadas em materiais particulares. Uma tabela em sequência pode organizar o tópico acima e definir os tipos de material que cada técnica pode ser utilizada:

	Técnica / Método	materiais
Morfologia da Partícula	Microscopia	Sólidos gerais
	Peneiras e Separadores	Sólidos gerais
	Difração a Laser	Sólidos gerais
Microestrutura da Partícula	DRX	Sólidos gerais
	FIB	Sólidos Condutores
	Microscopia	Sólidos gerais
Química da Partícula	OES	Metais
	XPS	Sólidos Condutores
	AES	Sólidos Condutores
Reologia da Partícula	Carney Funnel	Pós em Geral
	funil salão	Pós em Geral

Tabela 2: Técnicas e Métodos para caracterização pó.

Em adição à lista anterior, alguns procedimentos estão listados abaixo juntamente com alguns padrões e normas que são aplicados:

- Densidade aparente (medida de acordo com ASTM B212);
- Densidade Batida (ASTM B527);
- Funil de Hall (ASTM B213);
- Funil de Carney (ASTM B964);
- Análise em Peneiras (ASTM B214);
- Distribuição do Tamanho de Partículas por Difração a Laser (ASTM B822);
- Tratamento de imagens de Pó (Amostra para microscopia elétrica – SEM);
- Seção transversal do pó / Tratamento de imagens para porosidade (SEM);
- Preparação e exame de amostras Metalográficas (utilizando SEM) / Reometria e análise de cisalhamento.
- Densidade verdadeira por Picnometria (ASTM B923);
- Análise de Formas Quantitativas (Optical & SEM).

4.3.1 Morfologia

O que basicamente define a morfologia das partículas é o processo de trituração utilizado. Os vários métodos de obtenção de pós metálicos levam a várias formas, tamanhos, distribuições e outras características, sendo imprescindível o processo de caracterização de sua forma para a peça final e que atenda aos requisitos de engenharia. A Figura 10 abaixo, seguida pela Tabela 2, apresentam as possíveis morfologias obtidas na trituração e os processos para alcançar esses formatos:

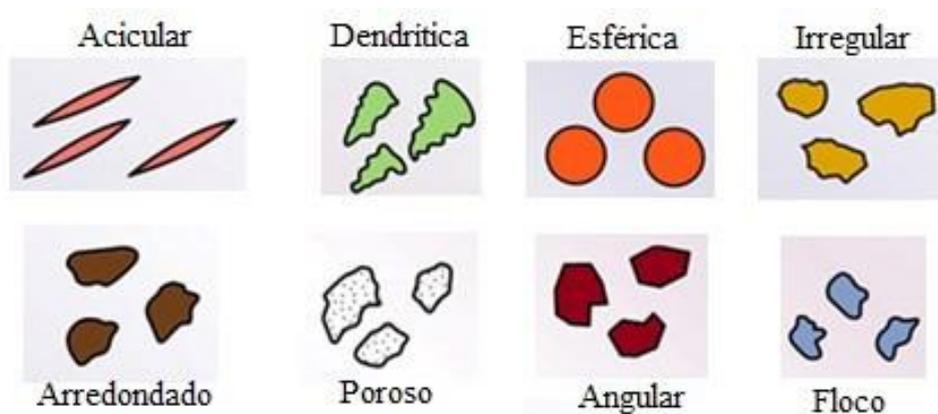


Figura 10: Morfologia das Partículas após produção do pó (Adaptado de FREITAS, 2013).

Morfologia	Processo de Produção
Acicular	Decomposição Química
Angular	Trituradores (e Processos mecânicos em geral); Carbonila;
Dendrítico	Eletrólise
Floco	Trituradores
Irregular	Decomposição Química
Poroso	Redução de Óxidos
Arredondado	Atomização; Decomposição Química
Esférico	Atomização; Carbonila; Precipitação

Tabela 3: Morfologia das partículas e processos atuais para obtê-los.

4.4 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Segundo (MEGGIOLARO E CASTRO, 2009), as propriedades do material quantificam as diferentes respostas do material às cargas que lhes são impostas. As cargas podem ser de tração, compressão ou cisalhamento, e sua intensidade pode ser constante ao longo do tempo ou pode variar continuamente. As principais propriedades a serem estudadas são dureza, ductilidade, elasticidade, tensão de escoamento e resistência à ruptura.

4.4.1 Dureza

A dureza quantifica a resistência à penetração, e pode ser medida pela relação entre as forças F aplicados através de um penetrador padronizado muito duro e a área A do dente residual deixada pelo penetrador na parte a ser analisado. Além disso, os métodos que vão definir os penetradores que serão utilizados nos seus testes (explicados na seção 4.5.3).

4.4.2 Ductilidade

A ductilidade é uma propriedade do material que indica a capacidade de tolerar as deformações plásticas antes de romper. Os materiais dúcteis possuem algumas vantagens, tais como escoar localmente sob tensões concentradas e permitir a conformação por processos que facilitam a fabricação em massa como por exemplo a laminação, forjamento, entre outros. Materiais como os metais e os polímeros são dúcteis nas $\theta > \theta_V$, (θ_V é a temperatura vítrea do material) enquanto cerâmicas, por exemplo, são frágeis. A deformação real (ε_{real}) que sofrem os materiais, é baseada na deformação de engenharia (ε_{eng}) que são baseadas nas dimensões dos corpos de prova (CP) utilizados nos ensaios:

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

Equação 2: Equação da deformação de engenharia de um CP em ensaio de tração.

Onde L_0 é o comprimento inicial antes de aplicar a carga e L_f o comprimento final do corpo de prova. A deformação real no processo de carregamento pode ser estabelecida imaginando-se uma sequência de etapas de carregamento onde o corpo alonga-se um valor

. Desta forma, a deformação pode ser definida através da integração da equação $d\varepsilon = dL/L$:

$$\varepsilon_{real} = \int \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$$

Equação 3: Equação da deformação real de um CP em ensaio de tração.

As deformações são adimensionais medidas em %. A ductilidade pode ser medida também pela Redução de Área do CP (RA):

$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

Equação 4: Equação da redução de área de um CP em ensaio de tração.

4.4.3 Elasticidade

A elasticidade é a capacidade de um corpo de resistir a uma influência distorcida e retornar ao seu tamanho e forma originais quando uma força é removida. Pode ser medida pelo Módulo de Elasticidade (E), quanto maior a elasticidade, menor a deformação elástica resultante da aplicação da tensão e mais rígido será o material. Ela pode ser calculada pela tangente do ângulo formado entre a curva de deformação Tensão x Deformação, isto é, a razão da tensão pela deformação no regime elástico.

4.4.4 Resistência ao Escoamento e à Ruptura

A resistência ao escoamento S_E (MPa) quantifica a resistência do material no início da deformação plástica medida num teste de tração uniaxial a partir de uma pequena deformação plástica residual (ϵ_p). Essa deformação normalmente normalizada com $\epsilon_E = 0,2\%$ para as ligas metálicas. A resistência ao escoamento por tração e por compressão são razoavelmente simétricas pois possuem disparidades desprezíveis na maioria dos sólidos, apesar de não valer para materiais particulados. A resistência à ruptura S_R (MPa) é medida dividindo a maior força suportada pelo corpo de prova no ensaio uniaxial (tração ou compressão) pela sua área original. As rupturas podem ser frágeis, acompanhadas de pouca deformação plástica, ou dúcteis, associadas a muita deformação plástica, onde a fratura nesse caso ocorre quando não há mais ductilidade do material. Pode-se dizer que geralmente os materiais mais frágeis apresentam $S_{Rt} \ll S_{Rc}$, ou seja, resistência de ruptura à tração bem menor que a resistência a ruptura por compressão.

4.4.5 Curva Tensão x Deformação

As curvas de tensão x deformação ($\sigma\epsilon$) são traçadas a partir de ensaios de tração num corpo de prova normalizados com definir as propriedades do material como pode ser visto na Figura 11:

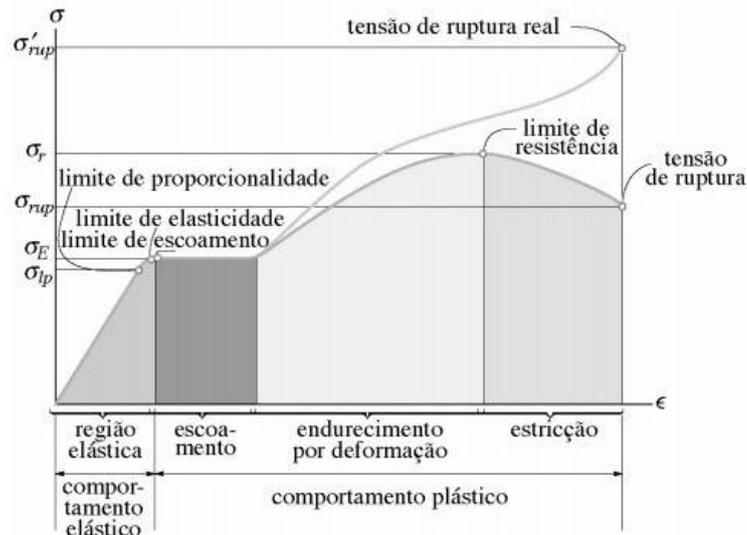


Figura 11: Diagrama Tensão x Deformação convencional e real (BUFFONI, 2013).

Através do gráfico pode-se então encontrar as propriedades já listadas acima, como a resistência ao escoamento e resistência à ruptura, mas também encontrar o módulo de elasticidades E . O registro desse gráfico é feito através de medições simultâneas da variação do comprimento sofrido pelo corpo de prova durante a realização do ensaio e também da força aplicada. Como na figura, podemos separar o gráfico em regiões, cada uma delas irá expressar o comportamento do material. Região elástica: é a fase onde o material, após a retirada dos esforços, recupera suas dimensões originais, ou seja, não sofre alteração das suas propriedades. É caracterizada pela deformação ser linearmente proporcional à tensão segundo a Lei de Hooke. Região de escoamento: aqui há o início do escoamento no material, agora o material entra em regime plástico, ou seja, suas deformações são permanentes e não mais linearmente proporcionais à tensão. Nesta região atinge-se o limite de escoamento do material, que corresponde à deformação plástica de 0,2% do material como já mencionado.

Região de encruamento ou endurecimento por deformação: é a região onde há um aumento da resistência à deformação plástica causada por uma anterior a ela, ou seja, há uma elevação da tensão de escoamento e um aumento da dureza devido a uma deformação plástica

que já ocorreu. Região de Estricção: região após o encruamento do material, em que encontramos seu limite de resistência mecânica, que caracteriza a tensão máxima suportada pelo corpo de prova que está sob tração. Assim se inicia a estricção, que consiste na redução de área da seção transversal no local onde irá ocorrer a fratura.

Curva real x Curva de Engenharia: a Curva de Engenharia considera que a tensão é a força sobre a área inicial, para todo o ensaio, após o limite de resistência a curva decresce. Já a Curva Real não trabalha com a área de seção transversal inicial do corpo de prova e sim com a área real, por isso a cada vez que vai diminuindo a área a tensão necessária para deformá-la aumenta, pois a tensão é a força sobre a área, quando a área reduz a tensão aumenta. É interessante lembrar, que quando um corpo de prova é tracionado, o seu comprimento varia e conseqüentemente suas moléculas tendem a se reajustar pois as forças de ligação moleculares ainda são fortes o bastante para não permitir a ruptura. Quando a quantidade de material, juntamente com as ligações moleculares for insuficiente para suportar a tração aplicada, ocorrerá a fratura.

4.5 Ensaios mecânicos e suas aplicações em impressão 3D

4.5.1 Ensaio de Fadiga

A fadiga pode ser explicada como um tipo de mecanismo de falha mecânica caracterizado por fratura de um componente mecânico devido à propagação e / ou progressiva de uma falha (rachaduras por exemplo) pela geração e / ou propagação progressiva de falhas, segundo (MEGGIOLARO e CASTRO, 2009). Esse tipo de falha é ocasionado pela aplicação de ciclos repetidos de deformação ou deformação; conseqüentemente, há movimentos cíclicos nos desentendimentos, gerando as fissuras. Ao falar sobre questões da manufatura aditiva, alguns autores já haviam estabelecido aplicações e resultados em amostras produzidas por impressoras 3D. (LEUDERS et al., 2013), (KONEČNÁ et al. 2016), (WAN et al., 2016), (BERETTA et al., 2017), (BENEDETTI et al., 2018), (MENEGETTI, RIGON e GENNARI, 2018); (SHERIDAN et al., 2018), investigaram o desempenho em fadiga de diversos materiais, incluindo Ti6Al4V, Inconel 718 e AlSi10Mg produzidos por impressoras 3D. Nos testes, as regiões de porosidade foram responsáveis pelo início precoce das fissuras e, assim, limitaram a vida de fadiga das peças. Vários perfis de corpos de prova como os cilíndrico, C(T), de placa, barras de fadiga, retangulares e os de fadiga por flexão, foram testados e analisados, e todos eles de acordo com normas específicas ASTM em cada ensaio.

Os resultados denotaram o importante papel exercido pelas tensões médias e residuais, bem como os defeitos no desempenho da fadiga. A resistência à fadiga relativamente baixa das peças fabricadas com impressoras 3D indica que desenvolvimentos adicionais nessa rota de fabricação ainda são necessários para tornar suas propriedades mecânicas competitivas com as de componentes tradicionalmente processados. Assim, (GEROV et al., 2016), (GREITEMEIER et al., 2017), (MASUO et al., 2018), (MENEGHETTI, RIGON e GENNARI, 2018), estudaram processos para reduzir a porosidade (principais responsáveis pelas fissuras das fadigas) e aumentar a densidade para melhorar as propriedades mecânicas. Alívio de Tensão e HIP (Hot Isostatic Pressing) são exemplos dos principais tratamentos térmicos mais utilizados pelos pesquisadores. Muitos defeitos que foram formados em subsuperfície podem ser eliminados pelo HIP e eventualmente o uma melhora drástica na resistência à fadiga até o nível do limite de fadiga ideal esperado.

Os corpos de prova com tratamentos térmicos de HIP geralmente mostram um aumento do alongamento nos estudos realizados pelos autores. De acordo com (QUINTANA et al., 2017), (TANG et al., 2017), o teor de oxigênio também é um fator que pode afetar o desempenho de tração e fadiga de peças fabricadas por impressoras seletivas de fusão a laser. Esses defeitos estão associados a óxidos relativamente grandes (de tamanho micrôn ou maiores); esses óxidos provavelmente se formam pela oxidação do metal vaporizado. Existem vários métodos de dimensionamento contra o início de trincas (SN), juntamente com métodos anti-propagação das fissuras (da / dN) na literatura. As propriedades básicas de fadiga dos materiais (limite de resistência, limite de fadiga e constantes da lei de Paris) são nomeadas como propriedades cíclicas dos materiais e muitas vezes são críticas para projetar corretamente os componentes estruturais.

4.5.2 Teste de Resistência à Tração

O teste de tração é comumente usado para determinar a carga máxima (resistência à tração) que um material pode suportar. O teste de tração pode ser baseado em um valor de carga ou valor de alongamento. Os testes podem resultar: carga máxima, tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento máximo, Módulo de Elasticidade e principalmente a curva tensão x deformação do material como já foi mencionada. O ensaio de tração envolve a montagem do corpo de prova em uma máquina adequada, que pode ser eletromecânica ou hidráulica, submetendo-a à tensão. (NING et al., 2015), (LE et al., 2016), (CAIAZZO et al., 2017), (HITZLER et al., 2017), (ASGARI et al., 2018), (YAMAWAKI e

KOUNO, 2018), estudaram as propriedades mecânicas através de testes de tração em vários materiais em impressoras 3D como Inconel 718, fibra de carbono, ABS-ESD e Nimonic 263, e perceberam que a resistência à tração do objeto de impressão 3D varia significativamente em relação ao ângulo de impressão em relação ao eixo X. Segundo eles, a resistência à tração diminui significativamente quando o ângulo de impressão aumenta, ou seja, visualizando na Figura 12 na posição V temos o maior ângulo e conseqüentemente menor resistência a tração, contrariamente em H temos o menor ângulo e maior resistência a tração. Isso se deve ao fato das camadas de material estarem seguindo a mesma linha de impressão, tornando-se mais uniformes e mais interligadas.

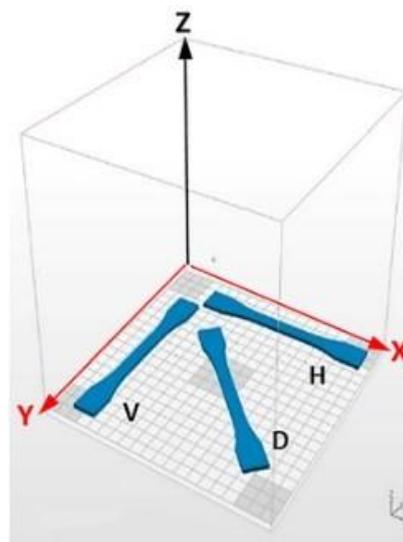


Figura 12: Representação das possíveis posições de impressão.

(Adaptado de UDDIN et al 2017).

Foram observadas tendências claras para a área de ocorrência de falha no ensaio de tração de amostras não pós-aquecidas, como também foi discutido na seção de testes de fadiga. O tratamento térmico padrão ainda mostra um importante papel entre as direções da construção, mas permite aumentar a força de escoamento e a resistência final.

Todos os ensaios continham testes de tração abrangentes com extensômetros, e investigações microestruturais. (SHERIDAN et al., 2018), menciona a estratégia de varredura e os parâmetros primários de processamento (como potência do laser nas impressoras metálicas ou quantidade de material utilizado nas impressoras plásticas) que são um dos fatores mais importantes que determinam o conteúdo de porosidade dentro dos componentes impressos em 3D. A porosidade é induzida pela variação da estratégia de varredura e pelos

parâmetros de processamento primário, e é ela que dita a resistência à tração, incluindo a vida de fadiga do componente impresso. Uma observação com testes não-destrutivos da porosidade do componente pode ser aproveitada para prever com precisão a vida de fadiga e resistência à tração.

4.5.3 Teste de Dureza

Como já explicada, a dureza apresenta métodos de medição que definirão quais penetradores serão utilizados, são os mais utilizados: a dureza Brinell (HB), Vickers (HV) e Rockwell (HR). (ZHANG et al., 2015), (GOULAS et al., 2018), testaram a dureza de vários materiais impressos em 3D por meio de ensaios de compressão e microdureza. O intuito foi verificar a influência da energia do laser nas propriedades mecânicas das amostras fabricadas. Medidas de dureza do material revelaram que a densidade de energia do laser teve efeito mínimo nos testes de desempenho. Outros estudos (CHEN et al., 2018) verificaram os resultados dos testes de dureza, que com o decréscimo velocidade de processamento do material, a microdureza das peças fabricadas diminuiu, mas a propriedade de tração aumentou. Isso se deve ao fato de que a impressão quando realizada de forma mais lenta, permite uma maior concentração de material.

(NAIR et al., 2004), observou que os efeitos de nanopartículas nas propriedades de um material impresso incluem um aumento na dureza na fabricação de aditivos nanoparticulados. De acordo com (RAMIREZ et al., 2011), os materiais com arquitetura de precipitados criam maior dureza em produtos fabricados em impressoras EBM. (SHIVA et al., 2015) contemplaram que o valor da microdureza média pode ser aumentado usando amostras ricas em Ti. Isso é devido à formação de fases duras causadas pelo aumento do teor de Ti. Como a microdureza é alta para essas amostras, a ductilidade é provavelmente menor. (YIN et al., 2018), observaram que materiais como Ti6Al4V exibiam microestrutura totalmente acicular martensítica, e assim apresentaram uma maior dureza pelo teste de dureza Vickers. (LUO et al., 2017), (FORTUNATO et al., 2018), (HUANG et al. 2018), verificaram que, como esperado, as diferenças na dureza para as direções de construção do SLM de 0° e 90° de amostras não tratadas não são significativas, em outras palavras, elas mostram independência direcional. Em suma, a dureza está totalmente ligada ao tipo de material e ao arranjo de sua microestrutura como era de se esperar.

4.5.4 Desempenho Estrutural

As aplicações físicas são o passo mais importante quando se fala em produzir um componente, porque é aí que o resultado final será colocado em prática. Para isso, é sempre necessário trabalhar com protótipos e com eles estudar o desempenho estrutural de cada componente, assim como seus resultados favoráveis ou não, e análise de formas para melhorá-los. Os esforços finais de projeto requerem ferramentas que forneçam uma avaliação precisa do projeto estrutural. O desempenho estrutural é um dos principais desafios pertinentes à MA. (PALANIVEL et al., 2015), (YANG et al., 2018).

Para obter a estrutura de alto desempenho com, autores (STEUBEN et al, 2016), (KLIPPSTEIN et al, 2018), (LIU et al, 2017), (SEIFI et ai, 2018), investigaram as propriedades mecânicas obtidas abordando primeiramente a otimização topologia incluindo um processo iterativo de análise numérica de domínio de criação, por exemplo, a análise de elementos finitos (FEA) e casos numéricos, seguido por uma análise de sensibilidade e de um processo de atualização de variáveis de projeto para verificar o desempenho estrutural dos componentes antes de sua fabricação em impressoras 3D. A simulação FE validada tem sido utilizada para investigar os efeitos de densidade relativa, a concentração de tensão, distribuição de tensão, além das detecções de falhas, propagações de trincas e até redução do peso dos componentes nas indústrias automobilística aeroespacial, biomédica e nuclear pelos testes de performances com protótipos fabricados em impressoras 3D.

O fator mais importante a se considerar, principalmente para as indústrias aeroespacial e automotiva é o desempenho estrutural. Estas indústrias fornecem as próximas grandes oportunidades para MA. Embora as facilidade de trabalhar com geometrias complexas, é hora de olhar além e expandir os horizontes da manufatura aditiva atendendo aos rigorosos requisitos de desempenho estabelecidos pela engenharia. Autores como (PALANIVEL et al. 2015), (UHLMANN et al. 2015), (OLTMANN et al., 2016), (BUCHANAN et al., 2017), (WALKER et al., 2017), (WANG et al., 2017), demonstraram vários estudos em componentes específicos impressos em 3D atingindo desempenho estrutural máximo.

Outro conceito que tem sido amplamente explorado na área de performance estrutural utilizando impressoras 3D nestas indústrias — principalmente automobilística e aeroespacial — são os materiais -super leves (ZHU et al., 2018). Materiais -super leves envolvem o uso de materiais e métodos avançados de engenharia permitindo que elementos estruturais possam fornecer o mesmo (ou melhor) desempenho, utilizando menos material. O uso da tecnologia

da manufatura aditiva é capaz de produzir componentes em materiais compósitos ou de múltiplos materiais que então sejam mais leves e mais eficientes.

4.5.5 Rugosidade e metrologia dimensional

A metrologia dimensional é outro fator de extrema importância para a inspeção de tolerâncias dimensionais e qualidade de superfície de peças fabricadas na MA. Para preencher essas lacunas, é preciso desenvolver técnicas de medição precisas (LEACH 2016), (SAGBAS et al., 2018). CMM (Coordinate Metrology), x-CT (Industrial Computed Tomography) são técnicas primárias de medição de precisão normalmente usadas para controle de qualidade das peças da MA. Alguns autores (BACCHEWAR et al., 2007), (STAVROULAKIS et al., 2016); explicam que a rugosidade superficial dos protótipos feitos em 3D também depende dos vários parâmetros do processo já citados até aqui, como orientação de construção, potência do laser, espessura da camada, velocidade e espaçamento.

O aumento na potência do laser nas impressoras metálicas, melhora o acabamento superficial inicialmente, mas se ultrapassar um certo valor, pode acarretar em uma superfície deteriorada. Isso ocorre porque, com o aumento da potência do laser, o efeito de filetagem aumenta inicialmente, o que leva à melhoria do acabamento superficial. (BABLANI et al., 2018), descreveram modelos matemáticos para explicar o princípio da fabricação em camadas e o seu erro de fabricação. Por exemplo, para um objeto cúbico com dimensões diferentes em comprimento, largura e altura, a orientação com o mínimo erro de processo em camadas é aquela ao longo da maior dimensão do cubo.

5 Coleta de Dados

5.1 Classificação das Sucatas

Visando o processo de separação de sucatas em centros de reciclagem autorizados, o processo de classificação envolve agrupar os materiais em categorias da maneira mais eficiente para que possam ser utilizados na próxima etapa do ciclo. Neste estudo, um aço inoxidável martensítico foi escolhido como sucata para pesquisa, e várias buscas foram feitas para verificar em quais componentes podemos encontrar esse material. Como dados qualitativos, foram utilizadas pesquisas de campo em ferros-velhos, pesquisas em catálogos de componentes e sites especializados em materiais para validar o presente estudo. Conforme descrito na Tabela 4 abaixo, os aços martensíticos podem ser encontrados em:

Equipamentos	Aços Martensíticos											
	410	416	420	422	430	431	440	13-8 PH	15-5 PH	17-4 PH	17-7 PH	
Anéis de Fogão (Stove Trim Rings)					X							
Assentos de Válvula de Motores (Valve Seats)							X					
Assentos para bombas de poços de petróleo	X											
Barras de Seção Circular	X	X	X								X	
Bicos (Nozzles)	X											
Bombas ou Eixo de Bomba	X	X	X						X			
Cinzel							X					
Componentes de Alta Temperatura				X								
Componentes de Máquina de Lavar		X										X
Componentes de Turbinas				X								
Componentes Mecânicos em geral	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eixos	X							X	X	X	X	
Elementos de Suporte					X							
Engrenagens		X							X			
Equipamentos Nucleares										X		
Equipamentos Químicos						X						X
Esferas de Rolamento							X					
Ferramentas de Corte			X									
Fios de Amarração (Lashing Wire)					X							
Forros de Chaminé (Chimney Liners)					X							
Instrumentos Cirúrgicos e Odontológicos	X		X					X				
Instrumentos de Medição							X					
Lâminas de Facas de Alta Qualidade							X					
Lâminas de Cisalhamento (Shear Blades)			X									
Molas								X	X	X	X	
Motores Elétricos		X										
Painéis de Geladeira					X							
Parafusos, porcas e fixadores	X	X			X	X				X		
Partes de Aeronaves				X		X		X	X	X	X	
Partes -decorativas de carros (aerofólios, sideskirt)					X							
Revestimento para Lavadoras de Louça					X							
Rotores				X								
Utensílios de Cozinha	X		X				X					
Válvulas	X	X	X				X		X	X	X	X
Vigas		X										

Tabela 4: Lista de aços martensíticos encontrados em componentes de ferro velho atualmente.

Tais dados podem ser considerados parte de um processo de controle e separação de materiais. Os dados coletados também podem ser usados para simulação de produção na própria indústria. Dentro do centro de separação, cada categoria dessas sucatas pode ser usada como matéria-prima para suprimentos de máquinas de impressão 3D após os tratamentos necessários, explicados pela união das tecnologias da literatura. Existem inúmeras possibilidades de trabalhos que podem ser feitos na indústria a partir daí. Pode-se gerar uma lista de tomada de decisões, com critérios de inclusão / exclusão em um processo de fluxo de dados para operar quais componentes estão sendo tratados em tempo real, por exemplo. Outra aplicação são as atividades de separação e descarregamento que podem ser automatizadas no futuro, o que deve ocorrer em um verdadeiro contexto de Indústria 4.0.

5.2 Entrevistas com Grupo Focal

Para avaliar as barreiras em questão que norteiam esta pesquisa, foi realizada uma entrevista em grupo focal com engenheiros especialistas de uma das principais montadoras automotivas internacionais de veículos comerciais do Brasil, em Junho de 2018, a fim de conhecer um veículo de interesse para a atual indústria automobilística, mapear os componentes do veículo e obter informações técnicas e conhecimento adicional suficiente para implementar o modelo que será tratado neste projeto. Na reunião, realizou-se um seminário para as partes interessadas, com uma explicação das propostas deste estudo e das etapas do modelo. Informações gerais foram compartilhadas pelos engenheiros, juntamente com opiniões relevantes de sua experiência profissional. Como ponto de partida, foi necessário autorizar o registro de informações de busca, como dados, fotos e vídeos. Uma visão geral do guia de perguntas para discussão abordada é a seguinte:

1. Principais Perguntas:
 - a. Existem componentes sustentáveis em qualquer veículo produzido pela empresa?
 - b. Algum componente usado em veículos já foi produzido por impressão 3D? Se sim, quais componentes?
 - c. Quais componentes da indústria automotiva podem ser reciclados?
 - d. Quais são as principais ligas usadas nos componentes da indústria automobilística?
 - e. Como as escolhas de material são feitas para cada componente?
 - f. Como os componentes defeituosos (ou os com vida útil expirada) são descartados?

- g. Há alguma perda durante a montagem ou outras operações?
- h. É possível obter peças automotivas descartadas com a própria indústria para uso na pesquisa?
- i. Como as falhas dos componentes são detectadas? Em geral, essas falhas são devido à escolha do projeto?
- j. Quais testes mecânicos devem ser feitos para validar os componentes reproduzidos?

2. Perguntas Finais:

- a. Quais são as perspectivas futuras de veículos sustentáveis (principalmente nos novos modelos elétricos)?
- b. Como as tecnologias da MA podem beneficiar na sustentabilidade e ganhos na fábrica?

Os resultados da entrevista serão discutidos na seção 7 juntamente com a análise entre o modelo proposto e as respostas de especialistas após abordagem do modelo deste estudo.

6 Desenvolvimento do Modelo Conceitual

6.1 Visão Geral do Modelo Proposto — Transformação das Sucatas em Componentes

Diversos projetos aplicados nas indústrias estão propondo novos meios de aplicar conceitos sustentáveis devido aos impactos negativos sobre o ambiente nos dias de hoje. Diante disso, um modelo conceitual para transformação da sucata em pó para impressoras 3D foi desenvolvido. Nesta seção, cada etapa do processo é explicada com detalhes. A cadeia é agrupada em quatro grandes estágios com uma estrutura sequencial, e cada fase é associada ao processo que os materiais são submetidos, conforme descrito na Figura 13, que foram desenvolvidos com base nos estudos diretamente relacionados à revisão da literatura. A inovação apresentada neste estudo está relacionada ao modelo de transformação de materiais descartados em componentes reais, unindo assim práticas da economia circular (EC), manufatura aditiva (MA), sustentabilidade e Indústria 4.0 para uma produção que pode ser adotada pelas indústrias em geral.

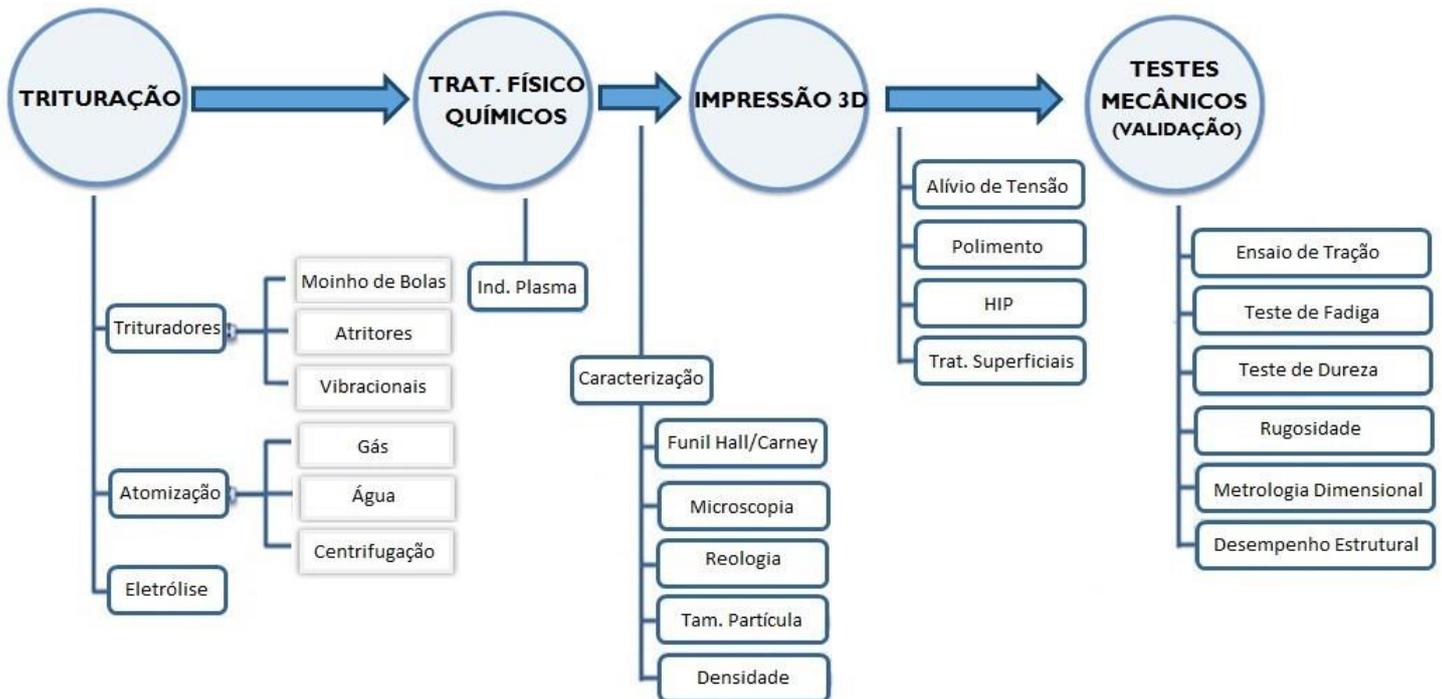


Figura 13: Framework do modelo conceitual que reúne os processos para aplicação.

O modelo reúne todos os processos e tecnologias estudados até aqui em uma aplicação sequencial prática para reinserir peças descartadas na cadeia produtiva. A primeira etapa, "Trituração", trata do material descartado e os seus possíveis processos para trituração, obtidos como insumos para impressoras 3D. Nesta parte o material é triturado para alcançar os tamanhos de partículas de pó desejados. Quando há essa quebra do material sólido em partículas, ocorrem fraturas em sua estrutura e, conseqüentemente, a perda de suas propriedades mecânicas, indispensáveis para a qualidade desejada do produto final. As propriedades elétricas e térmicas se mantêm, pois são propriedades associadas aos átomos do material.

O segundo estágio compõe tratamentos físico-químicos que são aplicados para recuperar as propriedades mecânicas, bem como para melhorar outras propriedades como sua morfologia, microestrutura e propriedades intrínsecas. A partir disso, a caracterização do pó através de vários testes e técnicas citadas em seções anteriores pode ser feita, permitindo saber se as características pretendidas foram atingidas. Caso não atinjam as expectativas, elas podem retornar sem nenhum problema para o início deste processo.

A terceira etapa as impressoras 3D para fabricação dos componentes usando ferramentas 3D CAD / CAE e os conceitos digitais concebidos, sendo possível imprimir produtos de diversas formas e tamanhos, principalmente para componentes mecânicos geometricamente complexos usados em aplicações industriais. Alguns componentes estão

prontos para cumprir sua finalidade imediatamente após sua produção, mas outros, após o processo de impressão devem ser submetidos a tratamentos térmicos (como o HIP) ou mecânicos (como polimento) para aperfeiçoar a qualidade do componente final. Aqui parâmetros como o tipo de impressora 3D (SLS, SLM, LOM, BJ, EBM, FDM e outros), a entrada de energia do laser (se aplicada), velocidade de varredura, temperatura e também se é necessário ou não ter um gás inerte (como argônio) para proteger a câmara de impressão da combustão dependendo do tipo do material a ser trabalhado.

Outras técnicas estão atualmente em uso para a produção de insumos de plástico para impressoras 3D. Por exemplo, (NASCIMENTO et al., 2018), referido a máquina ProtoCycler, que é um equipamento para a produção em pequena escala capaz de trituração de resíduos de plástico e transformar o material em ABS ou filamentos de PLA. É importante notar que para a impressão de componentes mecânicos, a impressão em 3D pode não proporcionar as características de superfície especificada no componente concebido se nele não for aplicado um tratamento necessário.

Finalmente o último passo aplica os diversos testes, principalmente ensaios mecânicos como resistência à tração, fadiga, dureza, realizados para a caracterização mecânica do material, bem como o desempenho do componente sustentável impresso na impressora 3D. Em outras palavras, esta fase refere-se à montagem do produto final construído a partir de componentes que foram impressos com os materiais tratados. Provavelmente, o primeiro uso do componente será orientado para protótipos, principalmente na indústria automotiva e aeroespacial, e realizado por testes. No entanto, o produto reciclado final pode ser vendido aos clientes.

7 Resultados e Implicações do Modelo Conceitual

7.1 Resultados do Grupo Focal

A análise dos dados, com base nas entrevistas, foi verificada e assimilada aos conceitos de revisão da literatura. Respostas relevantes para a busca foram alcançadas. De acordo com os especialistas atuais as perguntas foram respondidas na ordem em que foram estabelecidas. Segundo os engenheiros, em termos de componentes sustentáveis no setor: *-Existem componentes sustentáveis simples na indústria automotiva como pneus e tecidos com fibras naturais*, mostrando que é possível uma ação para ampliar o conceito de sustentabilidade. Especialistas afirmam o já uso de componentes de impressoras 3D, *-não com materiais metálicos, mas apenas em polímeros e resinas, maçanetas de portas, alguns*

tubos, suportes de admissão e partes decorativas. Além disso, os componentes que podem ser reciclados são segundo eles, são todos os componentes que atendam sua função no projeto mesmo após o processo de reinsertão. Todas as ligas metálicas são utilizadas na indústria, principalmente ligas de alumínio e componentes de aço inoxidável, que é o material escolhido para a separação de aparas neste estudo. Especialistas asseguram que *–os critérios para escolha de materiais para a produção de componentes são de longe o seu desempenho estrutural desejável*, mostrando a importância da validação dos testes como mencionado no presente estudo.

Em termos de processo de descarte, afirmam que *–Atualmente na indústria automotiva não há processo para descartar os componentes com vida útil expirada, nem mesmo os descartes da fase de produção. Por outro lado, precisamos pagar taxas por esses descartes ou contratar empresas terceirizadas para esse trabalho*, cenário que pode aumentar seus custos internos; isso poderia ser evitado se fosse adotado o modelo proposto para reinsertir as sucatas na cadeia de suprimentos.

Foi apontado que há perdas durante as operações de manufatura, que poderiam ser evitadas com uma efetiva intervenção no estudo. A empresa permitiu o uso de materiais descartados pelo autor desta pesquisa para futura aplicação do modelo. Visando um escopo não apenas da produção, mas do uso de produtos de terceiros, por exemplo, na detecção de falhas de componentes mecânicos, *–normalmente usamos o VP30, um líquido penetrante para tornar as rachaduras visíveis nos componentes. Seria ótimo se tivéssemos nosso próprio descarte desses produtos*, o que mostra que ainda há outros tipos possíveis de processos de reciclagem para pesquisas futuras, por exemplo. Para a validação dos componentes, *–dependerão de sua função, se o componente sofrer vibração ou tração, compressão, fadiga, é necessário avaliar as propriedades mecânicas como a dureza e a resistência à tração*, o que mostra a importância de um estágio de teste a ser listado, como a quarta etapa do modelo conceitual.

As perguntas finais estão diretamente ligadas a opiniões pessoais de cada especialista; em relação ao futuro da sustentabilidade nessas empresas, *–temos expectativas e perspectivas totais de adotar componentes sustentáveis, o que pode ajudar a indústria e o meio ambiente como um todo*. Em relação aos benefícios para a implementação do modelo *–Os benefícios são superar muitos desafios financeiros e ambientais*. Uma análise crítica das implicações do modelo proposto para teoria e prática detalhou o poder de mudança de escolha em um projeto de engenharia real, mostrando que a integração dos conceitos de MA e EC pode ser

implementado. As entrevistas e reuniões dos grupos focais geraram uma compreensão de que as etapas do modelo podem ser aplicadas em um setor real.

7.2 Aplicações do Estudo

Para realizar o processo metalúrgico e validar o processo de tratamento físico-químico que transforma as sucatas em pó para insumos de impressoras 3D em conjunto com os conceitos da manufatura aditiva e economia circular, uma sequência de passos foi apresentada como modelo: (1) Trituração; (2) Tratamento Físico-Químico; (3) Impressão 3D e (4) Testes Mecânicos para Validação. Essas etapas foram discutidas antes, com uma explicação ampliada de cada etapa e sub-etapa possível. O principal desafio da Fase 2 é realizar a engenharia metalúrgica com tratamentos físico-químicos que abrangem o tamanho, a velocidade e a complexidade de um nível de produção de fábrica.

Apesar disso, a literatura revelou que componentes fabricados por impressoras 3D estão em uma linha de desenvolvimento promissora, mesmo se tratando de pós diretamente manufaturados de indústrias especializadas ou pós reutilizados. Testes mecânicos mostram o desempenho do produto entre tradicionalmente fabricados e reciclados com impressão 3D. Entretanto, existem outras soluções para reciclagem na literatura (NASCIMENTO et al., 2018), mesmo que alguns materiais não possam participar desse processo por causa de barreiras físicas e químicas (por exemplo ferro fundido), o processo de microfusão pode ser realizado, onde a sucata de ferro fundido é aquecida para o estado líquido e é então despejada em um molde de PMMA, evaporando-a e deixando qualquer resíduo. Todas as questões discutidas até aqui revelam que esses processos podem aumentar a produtividade e a fabricação sob demanda nas indústrias, juntamente com uma agregação de valor qualitativo e benefícios com o mesmo custo.

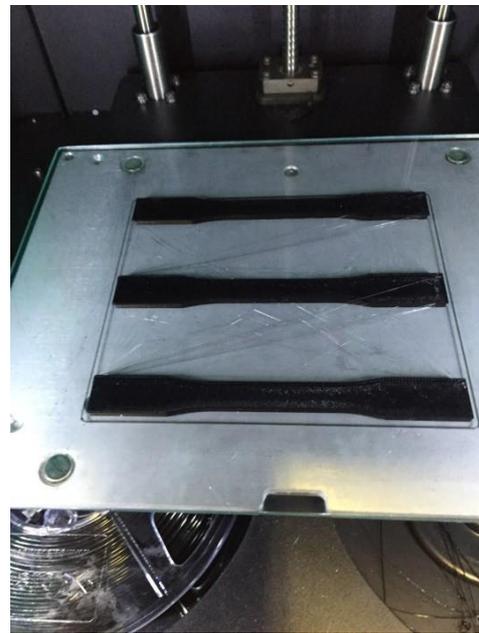
8 Estudo de Caso Aplicado — Ensaio Mecânico em Corpos de Prova impresso em PLA

8.1 Impressão dos Corpos de Prova

Como já mencionado anteriormente, por questões de financiamento, de investimento e falta de equipamentos para as primeiras etapas do processo (trituração da sucata e tratamentos em pó), foram utilizados corpos de prova impressos em PLA para exemplificar os testes mecânicos que necessitariam ser feitos no componente reciclado. Todos os corpos de prova foram impressos em uma impressora 3D de polímero modelo Cliever CL2 Pro. A impressora conta com uma plataforma de vidro fixada por ímãs de alta potência, que facilita a remoção de suas impressões quando prontas (vide Figura 14). Os corpos de prova foram projetados em CAD e possuem perfis de seção retangular seguindo a norma ASTM D638 que será discutida na seção de testes a seguir. A impressão só foi possível com o apoio dos funcionários da área de Fabricação Digital do Instituto Tecgraf de Pesquisa e Desenvolvimento.



(a)



(b)

Figura 14: (a) Foto do modelo da impressora 3D Cliever CL2 Pro. (b) Corpos de prova na plataforma de vidro após impressão.

O tempo para fabricação dos corpos de prova foi de aproximadamente 6h de impressão e com processo de preenchimento de injeção em torno de 90%. O polímero PLA (Ácido polilático) foi escolhido por questões de viabilidade econômica da pesquisa e também pelo fato de ser um termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, raízes de mandioca e de cana, por isso seria uma opção sustentável biodegradável, que faz jus ao conceito do presente estudo. Pelo seu valor acessível, facilidade e velocidade de impressão, também é o que oferece o menor custo por cm³/grama/hora da peça.

8.2 Ensaio de Tração Aplicado

O ensaio de tração foi escolhido para representar um dos testes mecânicos que validam o material, representando a última etapa do modelo desenvolvido neste estudo. Vale ressaltar que a impressão se deu na direção da orientação de varredura da impressora, e que segundo a revisão da literatura fornecerão os melhores resultados para resistência à tração. Como mencionado, os corpos de prova (CP's) seguiram a norma ASTM D638 (Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Plásticos), esta atribui certos padrões para o tipo do corpo de prova utilizado e parâmetros para os testes. Os CP's de seção retangular foram dimensionados (em mm) segundo o Tipo I da norma, e suas medidas podem ser verificadas na Figura 15 abaixo:

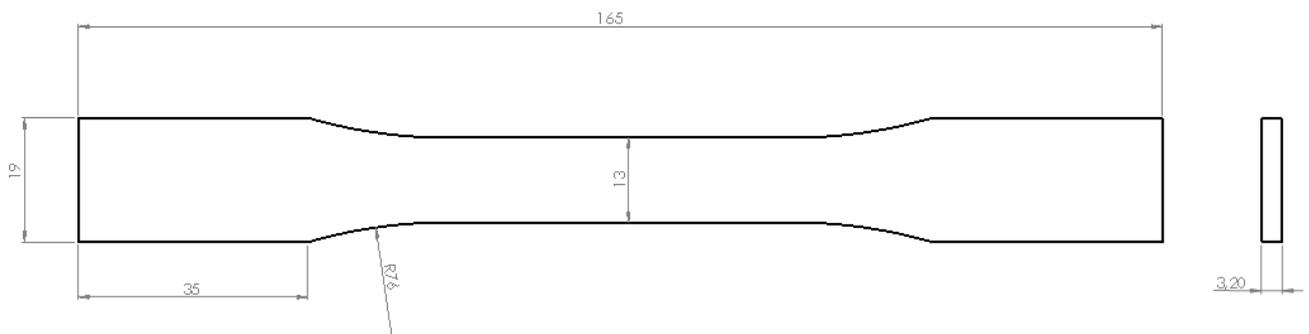


Figura 15: Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração norma ASTM D638.

Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC na PUC-Rio. O equipamento utilizado para o ensaio foi uma máquina Instron. Antes da realização dos testes, os CP's foram medidos em relação a sua espessura e largura da parte útil, e os resultados apresentam uma boa precisão por parte das impressoras 3D.

Dimensões medidas dos corpos de prova em PLA		
	Largura	Espessura
CP(I)	13,25 mm	3,55 mm
CP(II)	13,20 mm	3,55 mm
CP(III)	13,20 mm	3,55 mm

Tabela 4: Dimensões dos CP's medidas em laboratório antecedendo os testes.

No procedimento, os CP's de PLA foram fixados pelas suas extremidades nas garras de fixação da máquina de tração, onde a distância estabelecida pela norma foi de 115mm. Os corpos de prova foram então submetidos a uma velocidade de testes na tração segundo a norma de 5mm/min. Essa tração de maneira contínua, é aplicada até a ruptura do corpo de prova. Objetivando medir também a deformação dos corpos de prova, foi utilizado um Strain Gage. A bancada experimental pode ser visualizada na Figura 16 abaixo. Os dados obtidos no experimento foram recebidos pelo software no computador e convertidos em tabelas no Excel.



(a)



(b)

Figura 16: (a) Máquina Instron para ensaio de tração. (b) Bancada experimental pronta para realização do teste.

Para a obtenção do gráfico de Tensão x Deformação na realização do ensaio será necessário utilizar os dados fornecidos do software e traçá-lo no Excel, onde assim será possível analisar o comportamento do material. Este registro é feito através de medições simultâneas da força aplicada e da variação do comprimento sofrido pelo corpo de prova pela máquina no ensaio.

8.3 Resultados dos Testes

Com base nos dados fornecidos do experimento, foram traçados os gráficos de Tensão x Deformação para os CP's de PLA. As características do PLA formado por moldagem por injeção são bem conhecidas. O objetivo deste estudo é entender melhor seu comportamento após ter sido impresso em 3D por impressoras que utilizam o processo FDM. Para dar um ponto de comparação, aqui estão as características do data sheet do material de PLA segundo a fornecedora SD3D:

Data Sheet PLA - Propriedades	
Propriedades	Métrica
Módulo de Elasticidade	2,3 GPa
Limite de Ruptura	26,4 MPa
Tensão Máxima de Tração	35,9 MPa
Faixa de Deformação	2 — 4 %

Tabela 5: Propriedades mecânicas do material PLA.

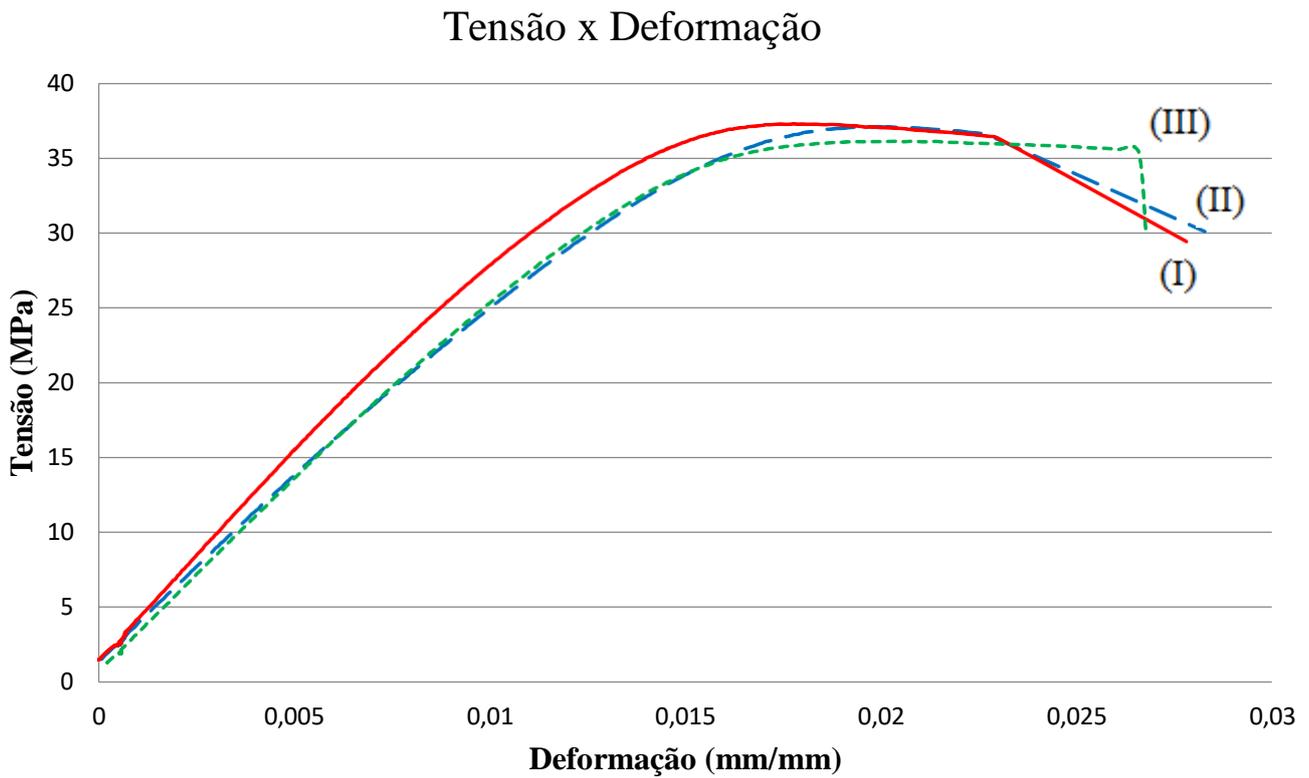


Figura 17: Curva de Tensão x Deformação dos CP's testados.

A Tabela 7 a seguir fornece os resultados analisados após os testes mecânicos com os corpos de prova do estudo. Aqui se observa a semelhança entre os resultados dos espécimes testados.

Resultados Ensaio de Tração			
Propriedades / CP	(I)	(II)	(III)
Módulo de Elasticidade	2,78 GPa	2,43 GPa	2,53 GPa
Limite de Ruptura	29,4 MPa	30,06 MPa	30,13 MPa
Tensão Máxima de Tração	37,25 MPa	37,07 MPa	36,09 MPa
Deformação	2,78%	2,83%	2,67 %

Tabela 6: Propriedades mecânicas resultados dos testes de tração.

Comparando os resultados dos testes com o datasheet do material, verificamos que todos tiveram seus valores como eram de se esperar. Entretanto as propriedades ainda apresentaram valores maiores nos CP's testados. Isso se deve ao fato de que em impressoras 3D os parâmetros de impressão são os maiores influenciadores nas características do produto

final. Quanto melhores os parâmetros (como orientação de impressão, infill, velocidade de varredura, e todos os parâmetros mencionados na revisão da literatura) melhores serão os resultados. Os CP's foram fabricados com 90% de infill, ou seja, é a porcentagem do seu volume (interno) que é preenchido com material; e, além disso, os resultados mostram a importância da orientação de impressão dos corpos de prova, que como foi discutido na seção 4.5.2 (testes de tração), que quanto menor for o ângulo em relação ao eixo X da impressora, maior será a resistência à tração. Pois as camadas do filete de PLA na impressão possuem as mesmas características, por exemplo, das fibras de um compósito em que tracionadas na sua direção longitudinal apresentam grande resistência à tração. A comparação entre os valores do data sheet e dos componentes impressos em 3D exprime a grande liberdade de resultados possíveis de serem obtidos a partir das impressoras, e que ainda podem apresentar resultados superiores aos feitos nos processos tradicionais de fabricação. Para fins de observação, a Figura 18 apresenta um dos corpos de prova testados após a fratura, e é possível verificar como o PLA é um termoplástico bastante rígido e resistente.

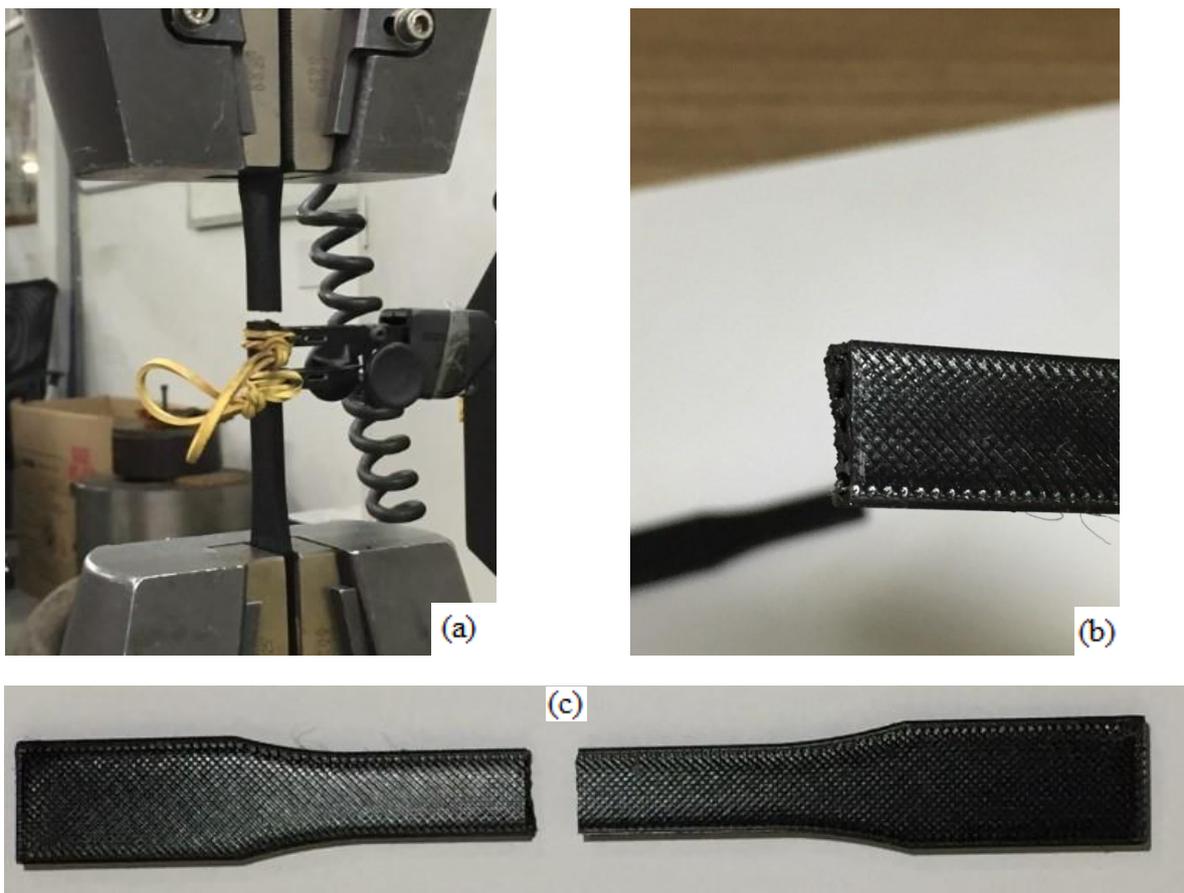


Figura 18: (a) CP logo após fratura na máquina de tração. (b) Área transversal fraturada do CP. (c) Vista superior do CP.

A partir da Figura 18 podem-se observar dois fatores: para preenchimento em torno de 90%, como em todos os processos os filamentos se tocam e formam um material 3D contínuo, porém podem apresentar porosidade porque há muitos pequenos vazios de ar (~ 10% máximo da amostra). Os vazios podem ser vistos na Figura 18 (b). Nesse caso, a tensão pode se concentrar em torno dos vazios, de modo que a tensão é localizada em torno das áreas vazias. Os vazios se comportam como falhas que se expandem para eventualmente se juntarem e se quebrarem, mas levam a um menor alongamento na ruptura. Isto pode ser confirmado analisando resultados de autores como (MY3DMATTER 2015), (LETCHER 2014), que obtiveram resultados das propriedades mecânicas melhores utilizando impressoras de melhor resolução e preenchimento de material dos componentes.

Outro fator importante, na Figura 18 é possível verificar os padrões dos filetes plásticos na superfície dos corpos de prova. Percebe-se que esses filetes formam uma -redell diagonal, ou seja, linhas entrelaçadas a 45°. Este também é um fator influenciador nos resultados, que de acordo com (3DMatter, 2015) comparados com padrões lineares e hexagonais, geralmente os diagonais são 10% mais resistentes. Em relação à deformação máxima, os 3 padrões possuem valores próximos, não sendo tão significantes as suas disparidades. Outros ensaios mecânicos serão propostos para pesquisa futura.

9 Conclusões da Pesquisa

O objetivo deste estudo foi propor um novo modelo sustentável de impressão 3D circular para a reciclagem de sucatas metálicas, explorando a integração das tecnologias da Indústria 4.0 e práticas da EC. Em primeiro lugar, com base na explicação da literatura através de tecnologias da manufatura aditiva e economia circular em uma fabricação real da indústria, mostra que é possível uma integração entre eles, ou seja, reinserindo o material descartado através de uma impressora 3D para fabricá-lo novamente. O modelo ainda promoveu a unificação de vários processos de fabricação existentes em uma cadeia de produção única.

Foram definidos detalhadamente todos os processos possíveis para reinserir as sucatas no ciclo de fabricação e foram definidas técnicas e conceitos para melhorar as características e propriedades do material que pode ser utilizado. Este modelo abre a possibilidade de proposta de um modelo de negócios circular, reciclagem de resíduos e sucatas, fabricação de novos produtos reduzindo significativamente o consumo de recursos e integrando a MA como uma

plataforma tecnológica para apoiar o modelo. Além disso, com pesquisa de campo, uma lista para filtrar os resíduos e sucatas por materiais contemplou um entendimento dos metais que podem ser impressos e analisados como elementos de peças em termos de desempenho e propriedades mecânicas. Foram entendidos os materiais que podem ser impressos e analisados assim como análise de peças em termos de desempenho e propriedades mecânicas.

Adotando essa nova e potencialmente inovadora classe de tecnologia, o modelo trará benefícios ao produzir produtos de alto valor e gerar novas oportunidades de negócios, com diversas implicações ambientais, sociais e econômicas para a sociedade. O impacto desse modelo inovador permite que muitas empresas possam se especializar em coleta, processamento, desenvolvimento, teste, fabricação e, finalmente, venda dos produtos com base no modelo proposto.

Com base nos resultados dos grupos focais, os benefícios da adoção deste modelo são de superar as barreiras financeiras, econômicas, tecnológicas e ambientais. Devido a necessidade de pagamento por descartes por diversas indústrias, o modelo proposto pode trazer economia. Apesar do investimento inicial elevado do modelo e de alguns preços baixos de material virgem (dependendo da fábrica), a impressora 3D é um processo de prototipagem rápida, o que pode acelerar a produção de um componente que talvez levaria dias ou meses para chegar caso fosse necessário refazê-lo ou aperfeiçoá-lo. Analisando uma indústria multinacional de grande peso, segundos perdidos são lucros perdidos. Outro benefício é a integração tecnológica entre as tecnologias disponíveis e o desenvolvimento e expansão das vastas áreas de indústrias para o desenvolvimento de novas tecnologias. O trabalho ainda promoveu a unificação de vários processos de fabricação existentes em uma cadeia de produção única. Pode-se também constatar que o impacto da reutilização de materiais para fabricação de novos produtos minimiza o consumo de recursos e impactos ambientais negativos, ou seja, empresas majoritárias que cuidam do meio ambiente, por processos com menor impacto ou investimento direto, terão produtos com maior valor.

A impressão dos corpos de prova tornou possível uma aplicação prática de uma parte do modelo proposto, exprimindo bem os resultados esperados. Foi possível observar a influência real dos parâmetros de impressão no componente final e adquirir conhecimento para pesquisas futuras.

9.1 Limitações da pesquisa

As principais limitações do presente trabalho foram a falta de equipamentos necessários para certas etapas do processo como a trituração e tratamentos físico-químicos do material na indução a plasma a partir da sucata. Além disso, a falta de investimentos e subsídios para realizar os processos, pelo fato de contratar empresas terceiras fora do estado para aplicação real, dificultou o progresso do trabalho. No entanto, as pesquisas, a coleta de dados e os ensaios mecânicos aplicados em um componente simples de PLA forneceram informações gratificantes para a sua aplicação.

9.2 Futuro da pesquisa

Para trabalhos futuros na pesquisa, será aplicado o modelo conceitual desde o início do processo para então ter resultados de apoio para comprovação do modelo. Serão realizadas todas as etapas, desde a separação da sucata, sua moagem e passando pelos tratamentos necessários para recuperar suas propriedades mecânicas, seguido de todos os testes de caracterização das suas propriedades químicas, morfológicas, microestruturais e reológicas, a impressão 3D do componente ou espécime com o pó produzido neste estudo. Finalmente, os testes finais serão realizados neste componente impresso reciclado seguindo todas as normas necessárias para validação e com os resultados sendo reproduzidos em uma futura tese de mestrado. A ideia é trazer redução de custos, mantendo os benefícios dos produtos ou até mesmo alcançar melhores propriedades.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMANGOUR, B., GRZESIAK, D., YANG, J.-M.; Selective laser melting of TiB₂/316L stainless steel composites: The roles of powder preparation and hot isostatic pressing post-treatment; Powder Technology, 309, pp. 37-48. (2017).

ARCELORMITTAL; O Aço e a Economia Circular (2016).

ASGARI, H., MOHAMMADI, M.; Microstructure and mechanical properties of stainless steel CX manufactured by Direct Metal Laser Sintering; Materials Science and Engineering A, 709, pp. 82-89 (2018).

BACCHEWAR, P.B., SINGHAL, S.K., PANDEY, P.M.; Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221 (1),pp. 35-52 (2007).

BARBIS, D. P., GASIOR, R. M., WALKER, G. P., CAPONE, J. A., & SCHAEFFER, T. S.; Titanium powders from the hydride–dehydride process. Titanium Powder Metallurgy (2015).

BENEDETTI, M., FONTANARI, V., BANDINI, M., ZANINI, F., CARMIGNATO, S.; Low- and high-cycle fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI additively manufactured via selective laser melting: Mean stress and defect sensitivity; International Journal of Fatigue, 107, pp. 96-109 (2018).

BERETTA, S., ROMANO, S.; A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes; International Journal of Fatigue, 94, pp. 178-19 (2017).

BHAVAR, VALMIK & KATTIRE, PRAKASH & PATIL, VINAYKUMAR & KHOT, SHREYANS & GUJAR, KIRAN & SINGH, RAJKUMAR; A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing (2014).

BOULOS M. Induction Plasma processing of materials for powders, coatings, and near-net-shape parts. Advanced Materials & Processes, [s. l.], n. 8, p. 12, (2011).

BUCHANAN C., MATILAINEN, V.-P., SALMINEN, A., GARDNER, L.; Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections; Journal of Constructional Steel Research, 136, pp. 35-48, (2017).

BUFFONI, SALETE SOUZA DE OLIVEIRA; Propriedades mecânicas dos materiais. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro – RJ (2013).

CAIAZZO F., ALFIERI, V., CORRADO, G., ARGENIO, P.; Mechanical properties of Inconel 718 in additive manufacturing via selective laser melting: An investigation on

possible anisotropy of tensile strength; RTSI - IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, Conference Proceedings (2017).

CARASU, CONSTANTIN & MAZURCHEVICI A. & CIOFU, C & MAZURCHEVICI, S.; The 3D printing modelling of biodegradable material. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2018).

CHARKHI, A., KAZEMIAN, H., KAZEMEINI, M.; Optimized experimental design for natural clinoptilolite zeolite ball milling to produce nano powders; Powder Technology, 203 (2), pp. 389-396. (2010).

CHEN, B., YAO, Y., SONG, X., TAN, C., CAO, L., FENG, J.; Microstructure and mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg alloy using direct metal deposition Ferroelectrics, 523 (1), pp. 153-166. (2018).

CHEN, C.Y., MAO, Z.H., LI, J.Q.; Direct electrolytic reduction of solid Cr₂O₃ to Cr using SOM process; Advanced Materials Research, 690 693, pp. 78-81, (2013).

CHEN, G., ZHAO, S.Y., TAN, P., WANG, J., XIANG, C.S., TANG, H.P. ; A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization; Powder Technology, 333, pp. 38-46, (2018).

CHEN, G.Z.; Forming metal powders by electrolysis; Advances in Powder Metallurgy: Properties, Processing and Applications, pp. 19-41, (2013).

CHENG X., TANG D., TANG D., ZHU H., WANG D.; Cobalt Powder Production by Electro-Reduction of Co₃O₄ Granules in Molten Carbonates Using an Inert Anode. J. Electrochem. Soc., 162, E68 (2015).

DAWES, J., BOWERMAN R., TREPLETON R.; Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technology Review (2015).

DESPEISSE M., BAUMERS M., BROWN P., CHARNLEY F., FORD S., GARMULEWICZ A., KNOWLES S., MINSHALL T., MORTARA L., REED-TSOCHAS F., ROWLEY J.;
Unlocking value for a circular economy through 3D printing: a research agenda (2016).

FOLIO, F., LACOUR, A.; Centrifugal atomization of metallic alloys in inductive plasma onto cooled disc; *Powder Metallurgy*, 43 (3), pp. 245-252, (2000).

FORTUNATO, A., LULAJ, A., MELKOTE, S., LIVERANI, E., ASCARI, A., UMBRELLO, D.; Milling of maraging steel components produced by selective laser melting; *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (5-8), pp. 1895-1902, (2018).

FREEMAN R., Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders — A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell, (2007).

FREITAS L. (2013); *Metalurgia do Pó – UFTFPR* 2013.

GAUSTAD G., KRYSSTOFIK M., BUSTAMANTE M., BADAMI K.; Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 135, Pages 24-33 (2018).

GEROV, M.V., VLADISLAVSKAYA, E.Y., TERENCEV, V.F. et al.; Fatigue strength of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting; *Russ. Metall*, (2016).

GOLDSBERRY C., Rapid change in additive manufacturing landscape. <http://www.plasticstoday.com/articles/rapid-change-additive-manufacturing-landscape> (2009).

GOULAS, A., BINNER, J.G.P., ENGSTRØM, D.S., HARRIS, R.A., FRIEL, R.J.; Mechanical behavior of additively manufactured lunar regolith simulant components; *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* (2018).

GREITEMEIER, D., PALM, F., SYASSEN, F., MELZ, T.; Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting; *International Journal of Fatigue*, 94, pp. 211-217, (2017).

HITZLER L., JANOUSCH C., SCHANZ J., MERKEL M., HEINE B., MACK F., HALL W., ÖCHSNER A.; Direction and location dependency of selective laser melted AlSi10Mg specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 243, Pages 48-61, (2017).

HOEGES, S., ZWIREN, A., SCHADE, C.; Additive manufacturing using water atomized steel powders; *Metal Powder Report*, 72 (2), pp. 111-117, (2017).

HOROBIN W.; *How It Works – Science and Technology*, 3rd edition, Marshall Cavendish, New York, p. 105, (2003).

HRYHA E., DUDROVA E., BENGTSSON S.; Influence of powder properties on compressibility of prealloyed atomised powders, *Powder Metallurgy*, 51:4, 340-342, (2008).

HUANG, B., ZHAI, Y., LIU, S., MAO, X.; Microstructure anisotropy and its effect on mechanical properties of reduced activation ferritic/martensitic steel fabricated by selective laser melting; *Journal of Nuclear Materials*, 500, pp. 33-41, (2018).

JACKSON, M.; LEDERWASCH, A.; GIURCO, D. Transitions in Theory and Practice: Managing Metals in the Circular Economy. *Resources*, 3, 516-543 (2014).

JIAO, Z., LI, D., ASGARIAN, A., CHATTERJEE, S., GIRARD, B., PASERIN, V., LAVALLEE, F., CHATTOPADHYAY, K.; Influence of apex angle and nozzle design on energy and momentum transfer during the water atomization process; *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials 2017 - Proceedings of the 2017 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, pp. 127-137. (2017).

KHAMMAN, O., LAOSIRITAWORN, Y., YIMNIRUN, R., ANANTA, S.; Effect of vibro-milling time and calcination condition on phase formation and particle size of nickel niobate nanopowders *Ceramics International*, 35 (1), pp. 177-180 (2009).

KLIPPSTEIN H., HASSANIN H., DIAZ A., ZWEIRI Y., SENEVIRATNE L.; Additive Manufacturing of Porous Structures for Unmanned Aerial Vehicles Applications. *Advanced Engineering Materials*, (2018).

KONEČNÁ, R., KUNZ, L., NICOLETTO, G., BAČA, A.; Long fatigue crack growth in Inconel 718 produced by selective laser melting; *International Journal of Fatigue*, 92, pp. 499-506, (2016).

KOTLYAROV, V.I., BESHKAREV, V.T., KARTSEV, V.E., IVANOV, V.V., GASANOV, A.A., YUZHAKOVA, E.A., SAMOKHIN, A.V., FADEEV, A.A., ALEKSEEV, N.V., SINAYSKIY, M.A., TRETYAKOV, E.V. ; Production of spherical powders on the basis of group IV metals for additive manufacturing; *Inorganic Materials: Applied Research*, 8 (3), pp. 452-458, (2017).

KURLOV A., GUSEV A.; Preparation and microstructure of VC0.875 nanopowder. *Inorganic Materials*. 49, (2013).

LE, X., AKOURI, R., LATASSA, A., PASSEMATO, B., WALES, R.; Mechanical property testing and analysis of 3D printing objects; *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2, (2016).

LEACH R.; *Metrology for Additive Manufacturing. Measurement and Control*, (2016).

LEE J. D., SEPPELT B.; Human Factors in Automation Design. In: Nof, S. (Hg.), *Handbook of Automation*, Berlin, S. 417-436, (2009).

LETCHER T., WAYTASHEK M.; Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)* (2014).

LEUDERS, S., THÖNE, M., RIEMER, A., NIENDORF, T., TRÖSTER, T., RICHARD, H.A., MAIER, H.J.; On the mechanical behavior of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance; *International Journal of Fatigue*, 48, pp. 300-307, (2013).

LI G. M., WANG D. H., JIN X. B., CHEN G. Z., *Electrochem. Commun.* 9, 1951, (2007).

LIU, J., YU, H.; Concurrent deposition path planning and structural topology optimization for additive manufacturing; *Rapid Prototyping Journal*, 23 (5), pp. 930-942, (2017).

LIU, L., WANG, L., SHI, L., JIANG, W.; Microstructure evolution of Ti₃SiC₂ powder during high-energy ball milling; *Ceramics International*, 36 (7), pp. 2227-2230, (2010).

LUO, L., GONG, X. ; Microstructures and mechanical properties in powder-based additive manufacturing of a nickel-based alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 58 (3), pp. 269-275, (2017).

MACARTHUR, D. E., ZUMWINKEL, K., STUCHTEY, M. R.; Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe. Report of Ellen MacArthur Foundation, (2015).

MASUO, H., TANAKA, Y., MOROKOSHI, S., YAGURA, H., UCHIDA, T., YAMAMOTO, Y., MURAKAMI, Y.; Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing; *International Journal of Fatigue*, 117, pp. 163-179, (2018).

MCCORMICK, P.G., TSUZUKI, T., ROBINSON, J.S., DING, J.; Nanopowders synthesized by mechanochemical processing; *Advanced Materials*, 13 (12-13), pp. 1008-1010, (2001).

MCDOWALL, W., GENG, Y., HUANG, B., BARTEKOVÁ, E., BLEISCHWITZ, R., TÜRKELI, S., & DOMÉNECH, T.; Circular economy policies in China and Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 651–661, (2017).

MEGGIOLARO, M; CASTRO, J. "Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I – Iniciação de Trincas."; (2009).

MEGGIOLARO, M; CASTRO, J. "Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II – Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos E Estocásticos"; (2009).

MENEGHETTI, G., RIGON, D., GENNARI, C.; An analysis of defects influence on axial fatigue strength of maraging steel specimens produced by additive manufacturing; *International Journal of Fatigue*, 118, pp. 54-64, (2018).

MICHELINI G., MORAES R. N., CUNHA R. N., COSTA J. M. H., OMETTO A. R., From linear to circular economy: PSS conducting the transition, (2017).

MOJTAHEDI, M., GOODARZI, M., SHARIFI, B., VAHDATI KHAKI, J.; Effect of electrolysis condition of zinc powder production on zinc-silver oxide battery operation. *Energy Conversion and Management*, 52 (4), pp. 1876-1880, (2011).

MONTES J.M., CUEVAS F.G., CINTAS J., TERNERO F., CABALLERO E.S.; On the compressibility of metal powders, *Powder Metallurgy*, 61:3, 219-230, (2018).

MURR L. E., MARTINEZ E., AMATO K. N., GAYTAN S. M., HERNANDEZ J., RAMIREZ D. A., SHINDO P. W., MEDINA F., WICKER R. B.; Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 1, Issue 1, Pages 42-54, (2012).

MY3DMATTER; What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints? (2015).

NAIR, R., JIANG, W., MOLIAN, P.; Nanoparticle additive manufacturing of Ni-H13 steel injection molds; *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126 (3), pp. 637-639, (2004).

NANNAN G., LEU C.; Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *M.C. Front. Mech. Eng.* (2013).

NASCIMENTO D., ALENCASTRO V., GONCALVES O., CAIADO R., GARZA J., ROCHA L. TORTORELLA G.; Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *Journal of Manufacturing Technology Management*, (2018).

- NGUYEN, Q., HUANG, C., SCHOENITZ, M., SULLIVAN, K.T., DREIZIN, E.L.; Nanocomposite thermite powders with improved flowability prepared by mechanical milling; *Powder Technology*, 327, pp. 368-380, (2018).
- NING, F., CONG, W., QIU, J., WEI, J., WANG, S.; Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling; *Composites Part B: Engineering*, 80, pp. 369-378, (2015).
- OGIHARA, T., KUBO, T., ARITA, S., AOYAGI, N., UEYAMA, R., HARADA, M., HARADA, A.; Production and characterization of silver powder created using high-pressure water atomization; *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 125 (1), pp. 19-22, (2017).
- OLTMANN, J., SEEMANN, R., SPALLEK, J., KRAUSE, D.; Additively manufactured components for structural applications in aircraft interior - Two case studies; *DFX 2016: Proceedings of the 27th Symposium Design for X*, pp. 147-156, (2016).
- PALANIVEL, S., NELATURU, P., GLASS, B., MISHRA, R.S.; Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy ; *Materials and Design*, 65, pp. 934-952, (2015).
- PAVLOVIĆ, M.G., PAVLOVIĆ, L.J., NIKOLIĆ, N.D., POPOV, K.I.; The Effect of some Parameters of Electrolysis on Apparent Density of Electrolytic Copper Powder in Galvanostatic Deposition. *Materials Science Forum*, 352, pp. 65-72, (2000).
- PRESCOTT J. K., BARNUM R. A.; -On Powder Flowability|| (2000).
- QUINTANA, O. A., TONG, W.; Effects of Oxygen Content on Tensile and Fatigue Performance of Ti-6Al-4 V Manufactured by Selective Laser Melting. *JOM*, 69 (12), pp. 2693-2697, (2017).
- RAHAEI, M.B., YAZDANI RAD, R., KAZEMZADEH, A., EBADZADEH, T.; Mechanochemical synthesis of nano TiC powder by mechanical milling of titanium and graphite powders; *Powder Technology*, 217, pp. 369-376 (2012).

RAMIREZ, D.A., MURR, L.E., MARTINEZ, E., HERNANDEZ, D.H., MARTINEZ, J.L., MACHADO, B.I., MEDINA, F., FRIGOLA, P., WICKER, R.B.; Novel precipitate-microstructural architecture developed in the fabrication of solid copper components by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*, 59 (10), pp. 4088-4099, (2011).

RANTA, V., AARIKKA-STENROOS, L., RITALA, P., MÄKINEN, S. J.; Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: a cross-regional comparison of China, the US, and Europe. In: *Resources, Conservation and Recycling* (2017).

REUTER, M.A.; VAN SCHAIK, A.; HEISKANEN, K.; MESKERS, C.; HAGELÜKEN, C. *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*; UNEP: New York, NY, USA, (2013).

RODRIGUES D.; Escola Politécnica Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia metalúrgica e de Materiais Processamento de Pós Metálicos e Cerâmicos (2004).

SAGBAS B., HAKAN T., DURAKBASA N.; *Precision Metrology for Additive Manufacturing* (2018).

SALAZAR A. O., CIPRIANO G. G., AMADO J. A., BERNARDINO J. A., OLIVEIRA, Jean Paul DUBUT, LOCK A. S., QUINTAES F. O.; "Estudo e simulação de uma tocha de plasma térmico com acoplamento indutivo. *ABCM CONEM* (2012).

SANTOMASO, P. LAZZARO, P. CANU. -Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing. *Chemical Engineering Science* 58, (2003).

SEIFI, H., REZAEI JAVAN, A., XU, S., ZHAO, Y., XIE, Y.M.; Design optimization and additive manufacturing of nodes in gridshell structures. *Engineering Structures*, 160, pp. 161-170, (2018).

SHAHBAZI S. WIKTORSSON M., KURDVE M., JÖNSSON C., BJELKEMYR M. Material efficiency in manufacturing: swedish evidence on potential, barriers and strategies. *J. Clean. Prod.* 127, 438–450 (2016).

SHERIDAN, L., SCOTT-EMUAKPOR, O.E., GEORGE, T., GOCKEL, J.E.; Relating porosity to fatigue failure in additively manufactured alloy 718. *Materials Science and Engineering A*, 727, pp. 170-176, (2018).

SHIVA, S., PALANI, I.A., MISHRA, S.K., PAUL, C.P., KUKREJA, L.M.; Investigations on the influence of composition in the development of Ni-Ti shape memory alloy using laser based additive manufacturing; *Optics and Laser Technology*, 69 (1), pp. 44-51, (2015).

SLOTWINSKI J.A., GARBOCZI E.J.; Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders. *JOM* (2015).

STAVROULAKIS, P.I., LEACH, R.K.; Invited Review Article: Review of post-process optical form metrology for industrial-grade metal additive manufactured parts. *Review of Scientific Instruments*, (2016).

STEUBEN, J.C., ILIOPOULOS, A.P., MICHPOULOS, J.G. ; Implicit slicing for functionally tailored additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 77, pp. 107-119, (2016).

SUNGAIL, C., ABID, A.; Spherical tantalum feed powder for metal additive manufacturing. *Metal Powder Report*. (2018).

SUNGKHAPHAITOON, P., WISUTMETHANGOON, S., PLOOKPHOL, T.; Influence of process parameters on zinc powder produced by centrifugal atomization. *Materials Research*, 20 (3), pp. 718-724, (2017).

TANG, M., PISTORIUS, P.C.; Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 94, pp. 192-201, (2017).

TIAN, L., ANDERSON, I., RIEDEMANN, T., RUSSELL, A.; Production of fine calcium powders by centrifugal atomization with rotating quench bath; *Powder Technology*, 308, pp. 84-93, (2017).

TORSTENSSON A.; Internal barriers for moving towards circularity – An industrial perspective. Master thesis, MMK 2016:151 MCE 336, KTH, Stockholm, Sweden. (2016).

TOYOSHIMA, H., SHIMURA, T., WATANABE, A., OTSU, H. ; Sintered compact properties of pre-alloyed 2%Ni-Fe water atomized powder. *Funtai Oyobi Fummatsu Yakin/Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 52 (6), pp. 437-441, (2005).

UDDIN M., FAKHRUL M., AMEERUL M., GHOMASHCHI, A.; Evaluating Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Fused Deposition Modelling ABS Parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (2017).

UHLMANN, E., KERSTING, R., KLEIN, T.B., CRUZ, M.F., BORILLE, A.V.; Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components, *Procedia CIRP*, 35, pp. 55-60, (2015).

WANG T., GAO H. P., JIN X. B., CHEN H. L., PENG J. J., CHEN G. Z.; Advances in powder metallurgy: 2. Forming metal powders by electrolysis. *Electrochem Commun*, 13, 1492, (2011).

WORLD HEALTH ORGANIZATION; Bulk density and tapped density of powders. *The International Pharmacopoeia*, (2012).

WALKER, D., LIU, D., JENNINGS, A.; Wing design utilizing topology optimization and additive manufacturing. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*, pp. 823-840, (2017).

WALTON D. E., *The morphology of spray-dried particles a qualitative view* (2013).

WAN, H., WANG, Q., JIA, C., ZHANG, Z.; Multi-scale damage mechanics method for fatigue life prediction of additive manufacture structures of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 669, pp. 269-278, (2016).

WANG, L., JIANG, X., GUO, M., ZHU, X., YAN, B.; Characterization of structural properties for AlSi10Mg alloys fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 33 (18), pp. 2274-2282, (2017).

WANG, M.-R., HUANG, Y.-S., TSENG, W.-C., LAI, K.-L. ; Comparison of gas atomization on A6060 Al alloy powders produced by internal and external mixing type nozzles. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2016-May, art. no. 7475104, pp. 2157-2162, (2016).

WITHERS, J.C., LOUTFY, R.O.; Electrolytic TI powder production from ore sources. *IMPC 28th International Mineral Processing Congress*, (2016).

YAMAWAKI, M., KOUNO, Y.; Fabrication and mechanical characterization of continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic using a preform by three-dimensional printing and via hot-press molding. *Advanced Composite Materials*, 27 (2), pp. 209-219, (2018).

YANG, C.-C., HANG CHAU, J.L., WENG, C.-J., CHEN, C.-S., CHOU, Y.-H.; Preparation of high-entropy AlCoCrCuFeNiSi alloy powders by gas atomization process. *Materials Chemistry and Physics*, 202, pp. 151-158, (2017).

YANG, K.K., ZHU, J.H., WANG, C., JIA, D.S., SONG, L.L., ZHANG, W.H.; Experimental validation of 3D printed material behaviors and their influence on the structural topology design. *Computational Mechanics*, 61 (5), pp. 581-598, (2018).

YENWISET, S & YENWISET, T., Design and construction of water atomizer for making metal powders. *J. Met. Mater. Miner.* 21. 75-81, (2011).

YIN, S., YAN, X., CHEN, C., JENKINS, R., LIU, M., LUPOI, R.; Hybrid additive manufacturing of Al-Ti6Al4V functionally graded materials with selective laser melting and cold spraying. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, pp. 650-655, (2018).

YU Q., LI M., JI S., QIAN K., ZHOU Y.; Study on Two Plasma Physical Vapor Deposition Methods for Preparing Ultrafine Al Powders. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 556-562, pp. 81-85, (2014).

ZANON, M., BORTOLOTTI, F., RAMPIN, I., BREDA, A.; The sintering behaviour of electrolytic and water-Atomized copper powders. Proceedings Euro PM 2015: International Power Metallurgy Congress and Exhibition, (2015).

ZHANG, Y., SAHASRABUDHE, H., BANDYOPADHYAY, A.; Additive manufacturing of Ti-Si-N ceramic coatings on titanium. Applied Surface Science, 346, pp. 428-437, (2015).

ZHAO, S., & ZHU, Q.; Remanufacturing supply chain coordination under the stochastic remanufacture ability rate and the random demand. Annals of Operations Research, 257(1–2), 661–695, (2015).

ZHU L., LI N., CHILDS P.R.N.; Light-weighting in aerospace component and system design, Propulsion and Power Research, Volume 7, Issue 2, Pages 103-119, (2018).