

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Luísa Miranda Braga

**Manufatura aditiva: uma análise de aplicações
atuais**

**Additive Manufacturing: analysis of current
applications**

Projeto de Graduação

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

Orientador: Marcos Venicius S. Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meus avós pelo apoio incondicional. Principalmente ao meu pai por ter tido um papel tão forte e significativo em minha formação acadêmica e profissional, sem ele com certeza os últimos cinco anos não teriam sido tão prazerosos.

Agradeço ao meu orientador Marcos por ter aceitado a minha proposição de tema, cedido o seu tempo e por ter me guiado da melhor maneira para que este trabalho chegasse a melhor forma possível.

Agradeço aos professores Sérgio Braga e Ana Rosa Martins por terem me auxiliado prontamente e colaborado com sua vasta experiência no assunto. Ao Daniel Freitas da empresa Insfor agradeço o tempo cedido, as conversas e informações sobre seus trabalhos na área nos últimos anos.

Agradeço à todo o corpo docente da PUC Rio por seu tempo cedido e pelo suporte na minha formação como engenheira.

Por fim, gostaria de agradecer a PUC Rio como um todo pelos últimos cinco anos, pelos colegas que levarei para minha vida e por me proporcionar uma experiência acadêmica de excelência.

RESUMO

Manufatura aditiva: uma visão geral sobre aplicações atuais

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise sobre a manufatura aditiva e discutir suas aplicações atuais na indústria. O trabalho se inicia com um breve histórico do surgimento dessa técnica dentro da manufatura e sua evolução ao longo das três últimas décadas, assim como a sua importância atual no mercado.

O segundo capítulo é dedicado a uma visão geral da técnica, informando detalhes do processo, os principais materiais e sistemas adotados, as vantagens e limitações da técnica e uma comparação da mesma com os demais processos de manufatura.

O capítulo seguinte é dedicado a uma comparação das propriedades mecânicas de corpos de prova forjados e fabricados por impressão metálica no aço Inoxidável 17-4 PH. Será então apresentado o caso do robô de inspeção Tatuí da empresa Insfor, nascida nos laboratórios da PUC-Rio. Além de outras duas peças fabricadas em laboratórios da Universidade.

Por fim, serão analisadas diferentes aplicações em produtos de diversas indústrias que utilizam a técnica da manufatura aditiva. O primeiro caso está relacionado com a indústria aeroespacial, tendo como objeto de estudo sondas metrológicas utilizadas para medir (pressão) no motor das aeronaves. Já o segundo é a Plataforma Esterotóxica da empresa FHC, exemplificando uma das inúmeras aplicações da impressão 3D na indústria da saúde. Finalmente, para demonstrar aplicações em bens de consumo, será analisado um tênis da Adidas, fabricado com processo de adição de camadas em sua fábrica na Alemanha.

Palavras chaves: Adição de camadas. Impressão 3D. Materiais. Processos. Aplicações. Produção.

ABSTRACT

Additive Manufacturing: case studied about current applications

This paper's main goal is to present an analysis of additive manufacturing and discuss its current applications in the industry. It begins with a brief history of this technique's emergence in manufacturing, showing its evolution in the last three decades, as well as its current importance in the industrial market.

The second chapter is dedicated to an overview of the additive manufacturing technique, touching upon processes details, the main systems and adopted materials. Advantages and limitations of the method and a comparison with other manufacturing process are also included.

In the following chapters, mechanical properties of wrought and metallic printed 17-4 PH stainless steel tension test specimens are compared. Then the case of the Tatuí robot from Insfor, a company that started up at PUC-Rio's laboratories, is presented. Other parts and prototypes fabricated at the Universities facilities are also discussed.

Finally, three case analyses about products fabricated through additive manufacturing aiming at different applications and industries will be presented. The first group belongs to the aerospace industry; the object consists in metrological probes used to measure the total pressure at the aircrafts engines. The following product is the FHC company's Stereotactic Platforms, exemplifying the numerous 3D printing applications in the healthcare industry. In order to demonstrate the consumer goods applications, the last analyzed product will be the Adidas Futurecraft 4D footwear, fabricated using the additive layer manufacturing at the company's factory in Germany.

Keywords: Additive Layer. 3D Printing. Materials. Applications. Production.

SUMÁRIO

1 Introdução	8
1.1 Definição	8
1.2 Breve Histórico	8
1.3 Importância atual no mercado	10
2 Visão Geral da Manufatura Aditiva	14
2.1 Processo Genérico de Manufatura aditiva	14
2.2 Principais Processos e Materiais na Manufatura Aditiva	15
2.2.1 Materiais Poliméricos e Compósitos	15
2.2.2 Materiais Metálicos	9
2.3 Vantagens e Desvantagens	22
2.4 Comparação com Outros Processos de Manufatura	25
3 Estudo Comparativo das propriedades mecânicas do Aço Inoxidável 17-4 PH quando impresso e quando forjado	28
4 Análise do Caso do Robô Tatuí da Insfor	33
5 Manufatura Aditiva nos Laboratórios da PUC- Rio	39
5.1 Escapamento do motor da aeronave XXPTO do Aero PUC-Rio	39
5.2 Protótipos dos Pistões de um Motor Rotativo de Kopelrot	40
6 Análise de Aplicações Atuais	41
6.1 Sondas para medição de fluxo de ar - Vectoflow- Aviação	41
6.2 Plataformas Esterotáxicas para Neurocirurgias – FHC – Medicina	45
6.3 Tênis Futurecraft 4D – Adidas – Equipamentos Esportivos	48
7 Considerações Finais	51
Referências Bibliográficas	52

Lista de figuras

1.1: Patente de J.E. Blancher [3].	9
1.2: O primeiro modelo fabricado por uma impressora 3D [6].	9
1.3: Potencial impacto econômico estimado de diferentes aplicações de tecnologias até 2025 [9].	12
1.4: Estimativa do mercado de manufatura aditiva até 2035 [10].	12
2.1: Etapas do processo de manufatura aditiva [2].	14
2.2: Processo esquemático de Estereolitografia [7].	17
2.3: Processo esquemático de Sinterização a Laser [7].	17
2.4: Processo esquemático de Impressão 3D da empresa Z-Corp [7].	17
2.5: Processo esquemático de um equipamento de Direct Energy Depositon a Laser [13].	20
2.6: Processo esquemático de um equipamento de <i>Powder Bed Fusion</i> [13].	20
2.7: Suporte de cabo produzido por uma Impressora 3D em apenas uma parte [2].	24
4.1: Desenho em CAD do robô Tatuí, disponibilizado pela Insfor.	33
4.2: Engrenagens impressas na EOS M280 em 17 PH-4.	36
4.3: Engrenagens em PLA, Poliamida e Aço Inoxidável impressas para o Tatuí.	36
4.4: Vista em corte do suporte do cabeçote do Tatuí.	37
4.5: Desenho em CAD do suporte do cabeçote do Tatuí	37
4.6: Vistas do suporte do cabeçote do Tatuí.	38
5.1: Imagens do Escapamento do motor da XXPTO.	39
5.2: Imagens dos pistões do Motor Rotativo.	40
6.1: Sonda de Kiel produzida pela <i>Vectoflow</i> [17].	42
6.2: Tubos de Kiel produzidos pela <i>Vectoflow</i> [17].	43
6.3: Gráfico de tensão e deformação para o Ti6Al4V [18].	43
6.4: Plataforma Estereotóxica produzida pela FHC [19].	46
6.5: Vistas da Plataforma Estereotóxica produzida pela FHC [19].	47
6.6: Máquina FORMIGA P 100 da EOS [19].	47
6.7: Gráfico de Tensão e deformação do EPU [26].	49
6.8: Solado do Adidas <i>Futurecraft 4D</i> [26].	50
6.9: Adidas <i>Futurecraft 4D</i> [26].	50

Lista de tabelas

1.1: Manufatura aditiva já é uma realidade em muitas indústrias [8].	11
2.1: Materiais usados por tecnologias MA, polímeros e compósitos pela ASTM F2792 [7].	16
2.2: Polímeros de força elevada (reforçados e sem reforço) para aplicações de MA [7].	18
2.3: Parâmetros de pressão de barra e de deposição otimizados para processos de manufatura aditiva de extrusão de alguns termoplásticos típicos de engenharia [7].	18
2.4: Materiais Metálicos utilizados pela empresa EOS para técnica de Power Bed Fusion [14].	21
2.5 : Propriedades mínimas de tensão para o Ti6-Al-4V [15].	22
2.6 : Propriedades estáticas do Ti6-Al-4V produzido pela EOS (M280) e pela ARCAM [15].	22
2.7 : Propriedades de fadiga e resistência a fratura do Ti6-Al-4V produzido pela ARCAM [15].	22
2.8 : Propriedades estáticas do IN625 produzido por diferentes processos de MA [15].	23
2.9: Propriedades estáticas do IN718 produzido por diferentes processos de MA [15].	23
2.10: Limitações da indústria de Manufatura Aditiva [8].	25
3.1: Composição do aço inoxidável 17-4 PH [16,20,21].	28
3.2: Resultados das comparações das propriedades mecânicas de amostras do aço inoxidável 17-4 PH fundido e impresso através do processo SSL [16,23].	30
3.3: Resultados das comparações entre as propriedades mecânicas de amostras do aço inoxidável 17-4 PH impressas através do processo SSL [24].	31
4.1: Especificações técnicas da Makerbot Replicator 2.0 [28].	34
4.2: Propriedades Mecânicas do PA 2200 [21,29].	35
6.1: Especificações da sonda de Kiel produzida pela Vectoflow [17].	42
6.2: Propriedades Mecânicas do PA 2201 [20, 21]	46
6.3: Propriedades de Tensão, Mecânicas e Térmicas do EPU fabricado pela Carbon [25].	49

1 Introdução

1.1- Definição

Processo de manufatura é um procedimento do qual resultam mudanças físicas e/ ou químicas de uma matéria prima, objetivando aumentar o seu valor [1].

Um processo de Manufatura Aditiva (MA ou *Additive Manufacturing*- AM), também conhecido como Impressão 3D, consiste na criação da forma desejada através da adição de materiais camada por camada. Seu princípio é baseado no fato de que todo objeto pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com as mesmas, independente de sua complexidade geométrica [2].

Inicialmente as técnicas de manufatura aditiva eram utilizadas apenas para a criação de protótipos (*rapid prototype*- *RP*). Atualmente suas aplicações na indústria não mais se limitam a modelos reduzidos, mas também a produtos finais de grande complexidade.

1.2- Breve Histórico

Os conceitos de fotoescultura e aplicação do método de camadas para a construção de objetos tridimensionais são conhecidos desde o século dezenove. O primeiro, quando desenvolvido pelo artista francês François Willème em 1860, consistia em fotografar objetos através de vários ângulos equidistantes projetando o seu resultado em uma tela.

Os segundo foi empregado na fabricação de mapas de relevo topográficos 3D em um processo patenteado por J. E. Blancher em 1892. Beaman [3] lista um histórico de desenvolvimentos subsequentes até o fim dos anos 1970.

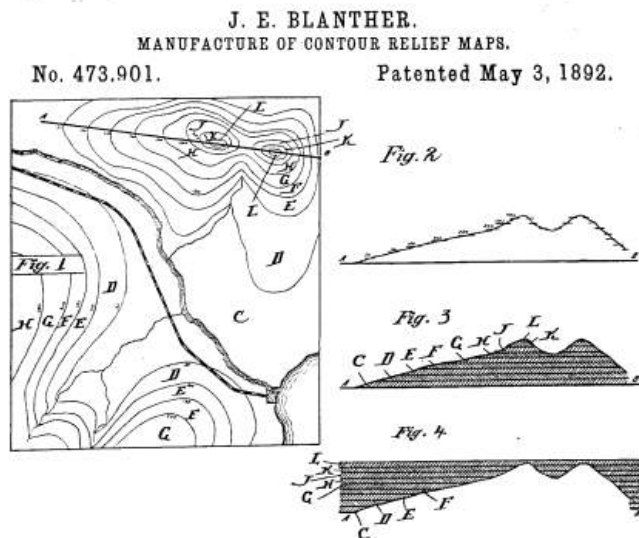


Figura 1.1: Patente de J.E. Blather [3].

A fotopolimerização é outro processo relevante para o início da manufatura aditiva. Proposta em 1972 por K. Matsubara da Mitsubishi Motors no Japão [3], consiste em iluminar uma camada de um fotopolímero por meio de luz ultravioleta (UV) objetivando endurecer esta mesma camada 2D já predefinida. O processo é então repetido e as finas camadas são sobrepostas formando um objeto 3D. Em 1980, ainda no Japão, Hideo Kodama aplicou esse processo para produzir o modelo de uma casa em 3D (Figura 1.2) e depositou uma patente protegendo-o. Posteriormente esta patente foi abandonada [4] e seu trabalho acabou por ser publicado em [5].

(マスクを用いた光造形)

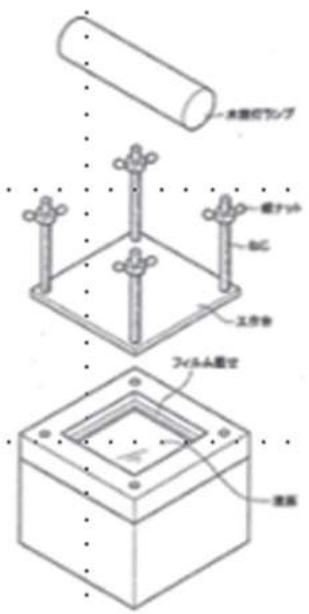
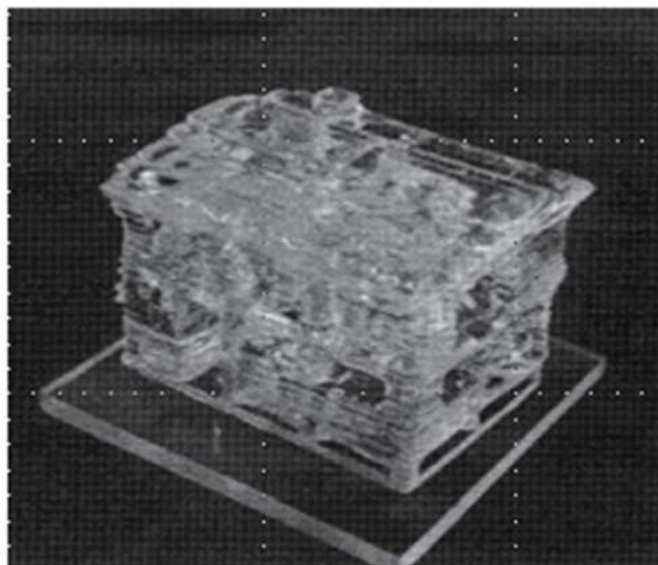


Figura 1.2 : O primeiro modelo fabricado por uma impressora 3D [6].

Em 1986, a primeira patente em uma tecnologia de RP (US 4,575,330) pertencendo a Charles (Chuck) Hull foi depositada para um equipamento de Estereolitografia (SLA). Hull foi o primeiro a inventar uma máquina SLA (1983) sendo também co-fundador da 3D System Corporation, que até hoje permanece como uma das maiores e mais lucrativas organizações no setor de impressoras 3D. Hull foi ainda o primeiro a encontrar uma maneira de comunicar um arquivo CAD (*Computer Aided Design*) com um sistema de RP para construir peças modeladas por computador. O primeiro sistema de fabricação por adição de camadas foi introduzido pela 3D Systems em 1987 e começou a ser vendido em 1988.

Enquanto a 3D Systems estava desenvolvendo e patenteando esta nova tecnologia, outros pesquisadores estavam desenvolvendo novos tipos de máquinas MA que utilizassem diferentes métodos e materiais. Em 1984, na Universidade do Texas, em Austin, um aluno de graduação, Carl Deckard e seu professor Joe Beaman foram responsáveis por desenvolver uma tecnologia chamada *Selective Laser Sintering* (SLS). Este método utilizava um sistema de laser empregando material em pó para criar um objeto [7].

Entre outras tecnologias de manufatura aditiva desenvolvidas na mesma época, pode ser destacada a modelagem por deposição fundida (FDM), desenvolvida por Scott e Lisa Crump em 1989. A FDM envolve o aquecimento de termoplásticos que são depositados em substratos, construindo a peça camada por camada.

Inicialmente, os processos de MA eram usados apenas para o desenvolvimento de protótipos, pois em sua grande parte eram feitos de materiais poliméricos; nenhuma das tecnologias desenvolvidas até então era capaz de processar metais ou materiais cerâmicos. Com o desenvolvimento de máquinas capazes de imprimir em qualquer material, desde titânio até a cartilagem humana, esse tipo de processo de manufatura começou a revolucionar a cadeia produtiva.

1.3- Importância atual no mercado

Atualmente, MA é uma tecnologia utilizada em uma variada gama de indústrias. Com o desenvolvimento de tecnologias que tornam o uso da manufatura aditiva possível de ser aplicada em diferentes setores, ela já se tornou uma realidade.

Conforme mostrado na Tabela 1.1, nas indústrias automotiva, aeronáutica e da saúde/odontologia, já é possível observar o impacto de sua aplicação na cadeia produtiva.

Aeroespacial	Máquinas e Equipamentos	Médica
<ul style="list-style-type: none"> • Bicos injetores de combustível para turbinas de aviação • 5x mais duráveis, 25% mais leves 	<ul style="list-style-type: none"> • Reparos de queimadores de turbinas a gás • Redução do tempo de reparo de 44 para 4 semanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aparelhos auditivos • Produção em massa de partes customizadas
<ul style="list-style-type: none"> • Câmara de combustão de motores de foguetes • Maior confiabilidade, robustez e eficiência 	<ul style="list-style-type: none"> • Impressão de filtros industriais com geometria otimizada • 15% de redução no consumo de energia para bombeio 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de órgãos para suporte a cirurgias para remoção de tumores • Redução no tempo de cirurgia e no risco de complicações
<ul style="list-style-type: none"> • Suportes metálicos projetados para manufatura aditiva • 50% mais leves e menor perda de material 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da performance de componentes por meio de desenhos especiais • Redução no tempo de produção de dias para horas 	<ul style="list-style-type: none"> • Próteses construídas em duas semanas para substituição da metade inferior da perna • Ajuste físico perfeito com componentes estéticos

Tabela 1.1: Manufatura aditiva já é uma realidade em muitas indústrias [8].

Em 2013, já havia sido classificada como uma das doze tecnologias mais inovadoras do mercado global até 2025 pelo *McKinsey Global Institute*, unidade de pesquisa econômica de uma das maiores consultorias estratégicas do mundo. Este estudo indicou ainda que MA possui um potencial econômico estimado entre U\$ 230 e U\$500 bilhões anuais até 2025 [9].

Uma galeria de tecnologias disruptivas

Impacto econômico potencial estimado em 2025. Trilhões de USD/ano.

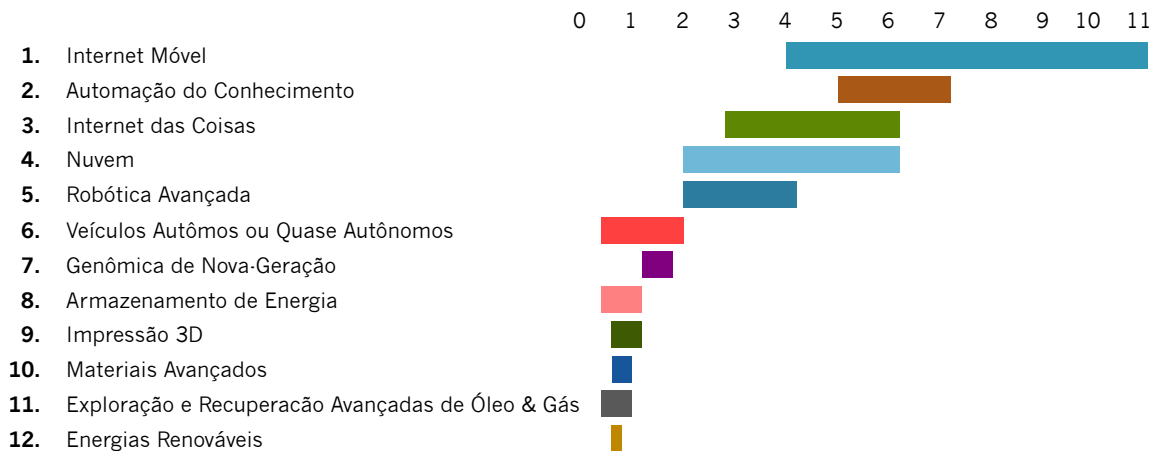


Figura 1.3 : Potencial impacto econômico estimado de diferentes aplicações de tecnologias inovadoras até 2025 [9].

Já em 2015 um estudo realizado pelo departamento de pesquisa do BCG (*Boston Consulting Group*) aponta que o mercado anual de MA já havia crescido para U\$5 bilhões. A mesma pesquisa estima uma taxa de crescimento anual composta de 30% até 2020 e que até 2035 o seu mercado atingirá um valor de aproximadamente U\$ 350 bilhões [10].

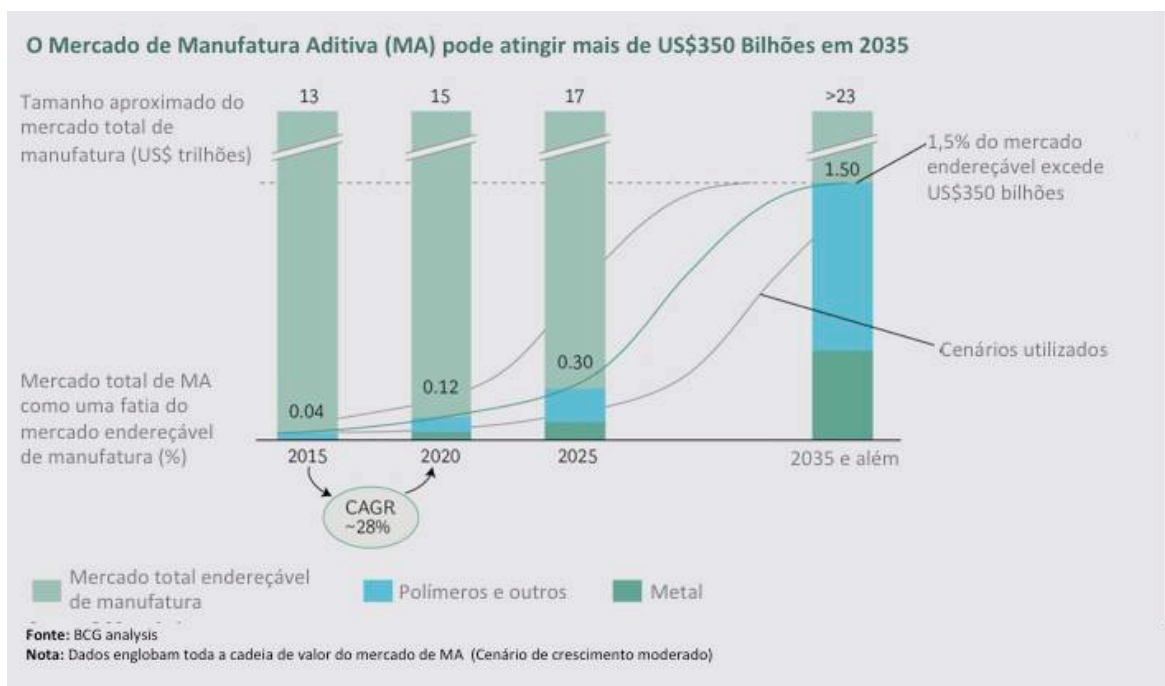


Figura 1.4 : Estimativa do mercado de manufatura aditiva até 2035 [10].

Todo esse potencial vem sendo amplamente explorado pelos gigantes da indústria. A *General Electric* (GE), uma das maiores empresas do mundo, acabou de investir aproximadamente U\$ 1.5 bilhões em impressoras 3D adquirindo duas das principais companhias de impressão 3D de materiais metálicos.

A Adidas também está investindo nessa tecnologia nas suas plantas automatizadas na Alemanha para a fabricação de solas de calçados esportivos em materiais poliméricos. Esses solados são leves, flexíveis com um design sofisticado e complexo. Dentre as principais vantagens no uso dessa tecnologia pela Adidas é a possibilidade de levar rapidamente novos modelos ao mercado, mantendo-se sempre atualizada com a moda [11].

Empresas como a BMW, GE, Nikon e Google estão entre os investidores de Start Ups no Vale do Silício para o desenvolvimento de uma nova tecnologia AM baseada em polímeros. Enquanto isso a HP (Hewlett-Packard) desenvolveu a sua própria impressora 3D para polímeros [10].

A GKN Aerospace, companhia inglesa, assinou recentemente um contrato de 5 anos com o *Oak Ridge National Laboratory* no Tennessee com o objetivo de desenvolver tecnologias para criação de partes de aviões em impressão de titânio. A intenção é reduzir o tempo de produção pela metade assim como o resíduo de matérias em 90%.

Todo esse movimento no mercado aponta que no futuro a manufatura aditiva deixará de ser uma tecnologia utilizada principalmente para a produção de protótipos e será parte integrante do meio produtivo, confeccionando produtos para venda final em grande escala.

2 Visão Geral da Manufatura Aditiva

2.1- Processo genérico de Manufatura Aditiva

Todos os processos de Manufatura Aditiva envolvem composição de um objeto 3D através de camadas com a mesma espessura. A produção utilizando este método envolve uma série de etapas, parte delas virtual e a outra parte física.

A primeira etapa consiste no desenvolvimento do formato e das dimensões da parte através de um *software* de CAD. Pode ser utilizado qualquer programa cujo resultado final seja um modelo 3D.

A próxima etapa traduz-se na conversão do arquivo em CAD para o formato específico de STL (*Standart Triangle Language file format*), ele serve para base do cálculo e definição do contorno das camadas a serem fabricadas.

A terceira etapa do processo envolve a geração do componente físico, que vem a ser a fabricação das camadas físicas utilizando as informações previamente geradas e a composição dessas camadas uma em cima da outra.

Por fim, após a conclusão da peça é necessário realizar uma limpeza adicional para que a parte esteja pronta para uso.

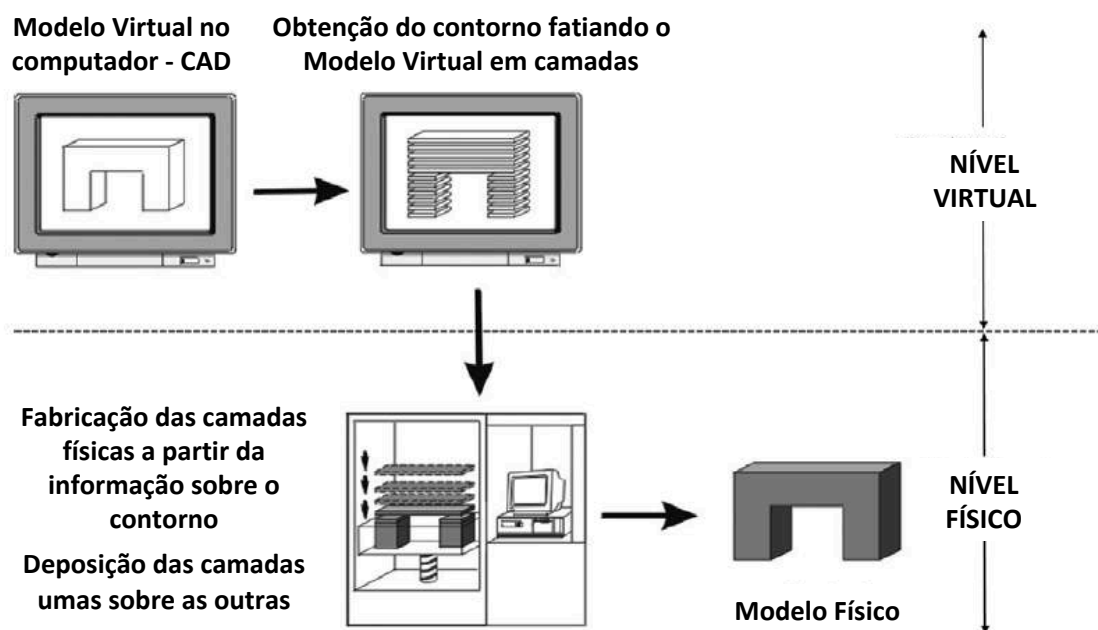


Figura 2.1 : Etapas do processo de manufatura aditiva [2].

2.2- Principais Processos e Materiais na Manufatura Aditiva

Nesta seção serão apresentados os principais processos utilizados na indústria da Manufatura Aditiva de acordo com a classe do material utilizada nos mesmos. A escolha dos dois grupos de materiais, polímeros e metálicos, foi feita devido às suas aplicações como materiais de engenharia.

2.2.1- Materiais Poliméricos e Compósitos

Esta classe de materiais é a mais utilizada nos processos de manufatura aditiva. Foi também a pioneira nesta indústria. Em 2014 a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) classificou diversos processos de MA em sete diferentes categorias. Dentre elas as seguintes representam categorias relacionadas especificamente a polímeros e compósitos [7]:

- *Binder Jetting* ,onde um agente líquido de ligação é selecionado para ser depositado juntando materiais em pó;
- *Material Extrusion* , onde um material é seletivamente distribuído através de um bocal ou orifício;
- *Material Jetting*, onde gotículas de material são seletivamente depositadas;
- *Powder Bed Fusion*, onde partículas de um polímero são unidas termicamente;
- *Vat Photopolymerization*, onde um polímero líquido é seletivamente curado por polimerização a ativação de luz.

A tabela 2.1 apresenta os principais tipos de polímeros e materiais compósitos, assim como seus fabricantes, usados em cada uma das categorias apresentadas acima. Levando em consideração a regra ASTM F2792 Classificação para polímeros e compósitos [7].

ASTM F2792 Classificação	Materiais usados por tecnologias MA de polímeros e compósitos	Fabricantes de equipamentos
<i>Binder Jetting</i>	Polímeros, pós, elastômeros	3D Systems, ExOne, Z-Corp (Z-Corporation 2014)
<i>Material Extrusion</i>	Polímeros, polímeros reforçados com fibras curtas, cerâmicas, polímeros reforçados com fibras contínuas	Stratasys, MakerBot, Fab at Home, MarkForged (MarkedForged 2014)ABB, Modified extrusion-based equipments
<i>Material Jetting</i>	Polímeros, ceras	3D Systems, Solidscape, Objet
<i>Powder Bed Fusion</i>	Polímeros	EOS, 3D Systems
<i>Vat Photopolymerization</i>	Foto polímeros	3D Systems, Envisiontec

Tabela 2.1: Materiais usados por tecnologias MA, polímeros e compósitos pela ASTM F2792 [7].

A primeira técnica utilizada para manipular polímeros na manufatura aditiva foi a Estereolitografia (*Stereolithography Apparatus* ou SLA) em que uma resina líquida fotossensível é transformada em sólido através da exposição a um laser ultravioleta [7]. Já no processo de Sinterização a Laser (SLS -*Selective Laser Sintering*) um laser de CO₂ escaneia o polímero em pó de um recipiente e incipientemente funde as suas partículas para formar um modelo após a sua solidificação, esse processo é repetido camada por camada [2]. Materiais poliméricos também são amplamente utilizados em máquinas de impressora 3D, onde a tecnologia de jatos de tinta de impressão é utilizada para depositar aglutinante líquido em finas camadas de pó. Um pistão combinado a plataforma que aumenta gradativamente para cada camada, enquanto um mecanismo de rolamento espalha o filamento em pó, formam esse mecanismo [7].

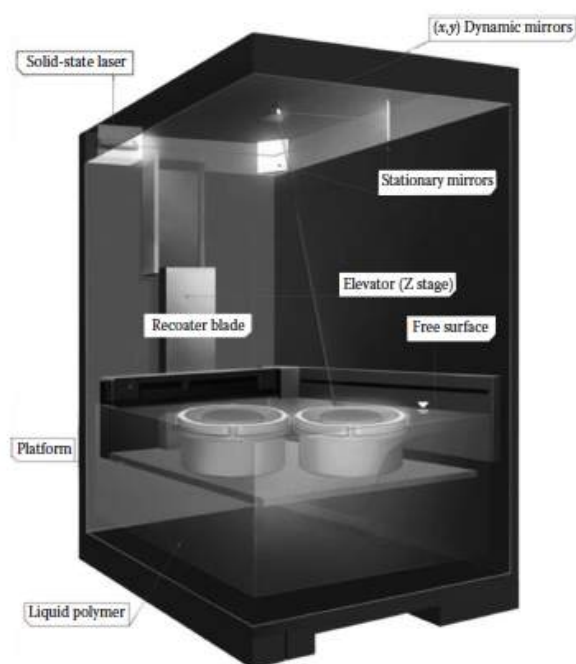


Figura 2.2 : Processo esquemático de Estereolitografia [7].



Figura 2.3 : Processo esquemático de Sinterização a Laser [7].

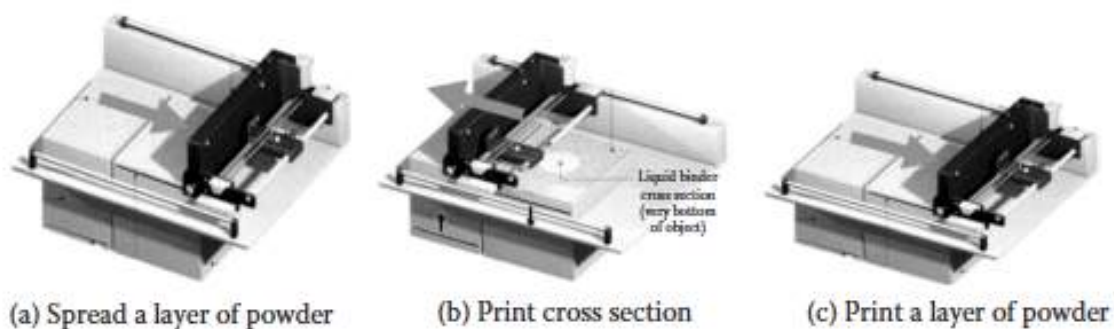


Figura 2.4 : Processo esquemático de Impressão 3D da empresa Z-Corp [7].

Polímeros Termoplásticos de alta resistência e termoplásticos reforçados por fibra, apesar de serem usados para produção, apresentam algumas complicações quando aplicados em processos de manufatura aditiva. Para uma modelagem de deposição fundida ou equipamentos similares o material utilizado tem a temperatura máxima de extrusão como 260 °C e uma pressão de coluna de 0,35-0,40 MPa [7]. Materiais para estruturas de suporte nem sempre combinam com a pasta de polímero ou com o polímero que sustenta as fibras juntas, ocasionando em dificuldades na manufatura de partes com cortes ou saliências. Para solucionar o problema, Stuffle et al. [7] desenvolveu uma cabeça de extrusão de alta pressão para ser acoplada aos equipamentos de MA. A Tabela 2.2 mostra alguns polímeros de engenharia que vem sendo utilizados com essa cabeça de extrusão. Já na Tabela 2.3 é possível analisar as condições de pressão desse materiais para a fabricação de barras de alimentação.

Nome Comercial	Fabricante	Polímero	Reforço
PEEK 150	Victrex USA Inc.	Polyaryletherketone	Nenhum
PEEK 450G	Victrex USA Inc.	Polyaryletherketone	Nenhum
PEEK 450C A30	Victrex USA Inc.	Polyaryletherketone	30% Fibra de Carbono
Pellethane 2363	Dow Chemical	Poliuretano	Nenhum
Torlon	Sabic Innovative Plastics	Amida-Imida	Nenhum
Lexan 141	Sabic Innovative Plastics	Policarbonato	Nenhum
Lexan 3413	Sabic Innovative Plastics	Policarbonato	20% Fibra de Vidro
Elvacite 2009	Lucite International Inc.	Poli(metil-metacrilato)	Nenhum

Tabela 2.2: Polímeros de força elevada (reforçados e sem reforço) para aplicações de MA [7].

Nome Comercial	Polímero	T_R (°C)	P_R (MPa)	T_E (°C)	T_P (°C)	V_E (mm s ⁻¹)
PEEK 450G	Polyaryletherketone	345	4,1	400	320	0,4
PEEK 450C A30	Polyaryletherketone	345	4,1	390	320	0,4
Pellethane 2363	Poliuretano	190	4,1	210	140	0,4
Lexan 141	Policarbonato	185	4,1	240	168	0,4
Lexan 3413	Policarbonato	185	4,1	260	185	0,4
Elvacite 2009	Poli(metil-metacrilato)	120	4,1	185	146	0,4

T_R , temperatura do cilindro do extrusor; P_R , pressão do cilindro do extrusor; T_E , temperatura de extrusão; T_P , temperatura da ponta de deposição; V_E , velocidade de extrusão.

Tabela 2.3: Parâmetros de pressão de barra e de deposição otimizados para processos de manufatura aditiva de extrusão de alguns termoplásticos típicos de engenharia [7].

2.2.2- Materiais Metálicos

Atualmente técnicas de adição de camadas representam uma pequena parte da indústria de metais, porém é esperado que o cenário mude nas próximas décadas, fazendo com que se torne mais expressiva a sua representatividade. O uso dessa tecnologia para manipular componentes metálicos é a principal via para permitir sua implantação em larga escala na cadeia produtiva. Resultando em que a mesma deixe de ser vista como um método exclusivo para prototipagem.

Alguns métodos de MA já estão sendo aplicados para materiais metálicos. A técnica baseada na deposição de pó metálico é a mais popular delas. Utiliza laser como fonte de energia, nesse processo o pó metálico através de um bocal é depositado na superfície de construção da peça. Esse processo faz a fusão do material [7] e pode também ser chamado de *Direct Energy Deposition* [13].

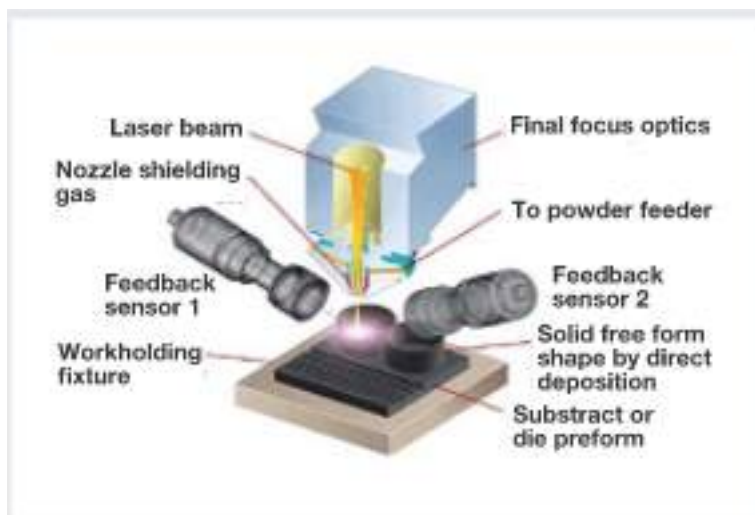


Figura 2.5 : Processo esquemático de equipamento de *Direct Energy Deposition* a Laser [13].

Outra técnica amplamente utilizada é denominada *Powder Bed Fusion* consiste em um sistema de energia térmica utilizando um laser. O laser sintetiza o pó em uma cama camada por camada [13]. A mesma abrange técnicas de impressão metálica como Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* -SLS), Sinterização a Laser de Metal Direta (*Direct Metal Laser Sintering* –DMLS) Fusão por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Melting* - EBM) e Sinterização Seletiva a Fusão (*Selective Laser Melting* – SLM).

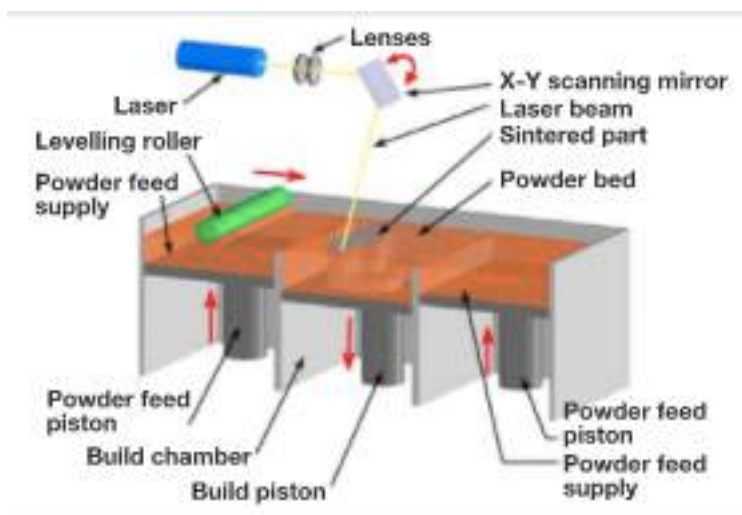


Figura 2.6 : Processo esquemático de um equipamento de *Powder Bed Fusion* [13].

A maior e mais expressiva empresa fabricante desse tipo de equipamento é a EOS, seguida pela ARCAM e pela GE. A primeira disponibiliza uma variada

gama de materiais, possibilitando a aplicação de MA em diferentes indústrias. Os mesmos estão apresentados na Tabela 2.4, onde são descritas suas classes, tipo do material e aplicações típicas.

Classe	Nome Comercial	Tipo de Material	Aplicações Típicas
Aço Maraging	EOS Maraging Steel MS1	18 Mar 300/1.2079	Componentes mecânicos; ferramentas para moldagem por injeção;
Aço Inoxidável	EOS StainlessSteel GP1	Aço Inoxidável 17-4/1.4542	Protótipos funcionais e partes para produção em série; prutos biomédicos e componentes mecânicos;
	EOS StainlessSteel PH 1	Aço inoxidável endurecível 15-5/1.4540	Protótipos funcionais e partes para produção em série; prutos biomédicos e componentes mecânicos;
	EOS StainlessSteel 316L	1.4404/UNS S31673	Indústria Criativa: jóias e bijuterias; elementos funcionais em iates; armações de óculos, etc. Indústria aeroespacial: conexões, suportes e outros componentes aeronáuticos. Indústria Médica: protótipos funvionais e partes para produção em série para, e.g., endoscopia e ortopedia
	EOS StainlessSteel CX	Aço ferramenta	Fabricação de partes para injeção por moldagem para produtos médicos ou produtos de plásticos corrosivos.
	EOS StainlessSteel 17-4PH	Aço Inoxidável 17-4PH/1.4542 X5CrNiCuNb 17-4 ASTM F899-12b	Instrumentos médicos (ferramentas cirúrgicas, instrumentação ortopédica) Partes resistentes a corrosão e ambientes ácidos
Liga de Níquel	EOS NickelAlloy IN718	Inconel™ 718, UNS N07718, AMS 5662, mat # 2.4668	Protótipos funcionais e partes para produção em série; componentes resistentes a altas temperaturas
	EOS NickelAlloy IN625	Inconel™ 625, UNS N07718, AMS 5666F, mat # 2.4856	Protótipos funcionais e partes para produção em série; componentes resistentes a altas temperaturas
	EOS NickelAlloy HX	UNS N06002	Componentes para altas temperaturas e com risco de oxidação, e.g., câmaras de combustão, componentes de queimadores, palhetas, componentes para fornos industriais
Liga de Cobalto-Cromo	EOS CobaltChrome MP1	CoCrMo superalloy, UNS R31538, ASTM F75	Protótipos funcionais e partes para produção em série; prutos biomédicos e odontológicos; e componentes mecânicos
	EOS CobaltChrome SP2	CoCrMo superalloy	Restaurações odontológicas (produção em série)
	EOS CobaltChrome RPD	CoCrMo superalloy	Próteses dentais removíveis
Titânio	EOS Titanium Ti64	Ti6Al4V light metal	Protótipos funcionais e partes para produção em série; aeroespacias; esportes motor; etc.
	EOS Titanium Ti64ELI	Ti6Al4V ELI	Protótipos funcionais e partes para produção em série para o setor biomédico
	EOS Titanium TiCP	TiCP Grade 2, 3.7035, ASTM F67 (UNS R50400), ISO5832-2)	Implantes médicos (placas de trauma, implantes crânio-maxilo-faciais, gaiolas cervicais, implantes dentais)
Alumínio	EOS Aluminium AlSi10Mg	AlSi10Mg light metal	Protótipos funcionais e partes para produção em série; partes mecânicas; esportes; etc.

Tabela 2.4: Materiais Metálicos utilizados pela empresa EOS para técnica de Power Bed Fusion [14].

O material mais pesquisado é a liga de titânio Ti6-Al-4V, isso se deve ao fato de titânio ser um material complexo e excelente para aplicações do pouco volume de produção. Porém ligas de níquel como a IN625 e IN718 também figuram materiais amplamente empregados em métodos de MA.

Suas propriedades mecânicas quando processados por máquinas de adição de camadas estão apresentadas nas Tabelas 2.5-2.9:

LR, Mpa X- direção	LR, Mpa Y- & Z-direção	LE, Mpa X- direção	LE, Mpa Y- & Z- direção	% Deformação
896	841	800	745	4

LR- Limite de Resistência

LE- Limite de Escoamento

Tabela 2.5 : Propriedades mínimas de tensão para o Ti6-Al-4V [15].

Dureza típica		M280, HIP + Solução com tratamento de calor		ARCAM, HIP	
Orientação	n/a	X-Y	Z	X-Y	Z
LE, Mpa	828	887	946	848	841
LR, Mpa	897	997	1010	946	946
Deformação	15%	11,4	13,9	13,2	13,9

Tabela 2.6 : Propriedades estáticas do Ti6-Al-4V produzido pela EOS (M280) e pela ARCAM [15].

Processo	Orientação	Porosidade, %	K _{IC} , MPa \sqrt{m}	STD, MPa \sqrt{m}	Fadiga a 10 ⁷ ciclos, MPa
Como fabricado	Z	0,19	78,1	2,3	407
Como fabricado	X-Y	0,11	96,9	0,99	441
HIP	Z	0,00	83,1	0,09	538
HIP	X-Y	0,00	99,0	1.1	607

Tabela 2.7 : Propriedades de fadiga e resistência a fratura do Ti6-Al-4V produzido pela ARCAM [15].

Processo	Limite de Escoamento, MPa	Limite de tração, MPa	Deformação %
forjado	450	890	44
Como fabricado EBM	410	750	44
EBM + HIP	330	770	69

Forjado (trabalhado a frio)	1100	...	18
-----------------------------	------	-----	----

Tabela 2.8: Propriedades estáticas do IN625 produzido por diferentes processos de MA [15].

Processado por MA	Limite de Resistência, MPa	Limite de Escoamento, MPa	Deformação %
SMD fundido	828+- 8	473+-6	28+-2
Laser	904	552	16
EB	910	580	22

Tabela 2.9: Propriedades estáticas do IN718 produzido por diferentes processos de MA [15].

2.3- Vantagens e Desvantagens

Diante da gama de aplicações da Manufatura Aditiva na cadeia produtiva se torna essencial o debate sobre suas vantagens e limitações. O progresso do *design* é diretamente atrelado a capacidade de produção. Por esse motivo, essa será a primeira característica discutida nesta seção.

Produtos fabricados através da manufatura aditiva não são afetados pela complexidade da forma, permitindo um *design* mais sofisticado em comparação com aqueles produzidos por outros métodos. Suas formas com cortes e seções transversais intrincadas criam peças mais leves e funcionais em comparação com aqueles criadas a partir de usinagem. A engenharia de MA possibilita que os produtos sejam rapidamente comercializados, chegando ao mercado em tempo recorde para que os consumidores disfrutem de maior variedade e o fornecedor diminua o seu estoque.

Outro aspecto importante é a flexibilidade na produção de manufatura aditiva criando produtos diferenciados. Enquanto na indústria de produção em série é difícil customizar produtos, nesta é possível criar peças diferenciadas com características próprias. Tal utilidade é amplamente explorada pela indústria de

saúde, pois cada paciente precisa de uma prótese customizada para o seu organismo.

A segunda análise a ser realizada nesta seção é na manufatura; processos de MA são mais rápidos e flexíveis. Eles não apresentam tempo de preparação para as máquinas, têm menos tempo e etapas de produção, gerando, portanto, maior produtividade, com menos desperdício de material e uma maior variedade de materiais que possam ser utilizados [8].

Em termos de serviço os processos aditivos apresentam uma cadeia de suprimentos simplificada com produção localizada, eliminação de partes obsoletas e menor dependência de fornecedores. Em adição, a customização cria um processo de vendas mais eficiente.

Por último, a manufatura aditiva promove a inovação no desenvolvimento de novos materiais para a indústria, alguns desenvolvidos especificamente para este fim, e outros já existente mas não antes imaginados para a fabricação.



Figura 2.7 : Suporte de cabo produzido por uma Impressora 3D em apenas uma parte [2].

É necessário compreender os desafios que a manufatura aditiva ainda precisa enfrentar. Continuam a existir barreiras tecnológicas que precisam ser superadas para a maior adoção deste tipo de processo na indústria global.

Uma das limitações é a falta de conhecimento sobre *design*; para utilizar todo o potencial de tecnologias de adição de camada é preciso muitas vezes mudar a maneira de pensar sobre o *design* do produto. Devido a facilidade de criar formas complexas, o desenho do produto deve ser feito de forma a reduzir o uso de material desnecessário. Além da possível inclusão de estruturas orgânicas ou

interiores, que configuram limitações dos processos tradicionais como o de fresagem ou de processos de moldagem por injeção. Profissionais dessa área devem ser treinados para o melhor aproveitamento das particularidades das máquinas de manufatura aditiva. Também no âmbito do *design*, deve ser citada a facilidade em piratear desenhos entre companhias rivais.

Provavelmente a maior barreira enfrentada para a propagação do uso da manufatura aditiva são os altos custos de produção. A primeira vista não são necessários investimentos iniciais em ferramentas, benefício ao ser comparada com outros processos tradicionais como modelagem por injeção. Tratando-se de grandes volumes de produção, essa vantagem desaparece, devido aos altos custos dos materiais e as lentas taxas de produção. Para polímeros essa diferença já foi consideravelmente reduzida. Entretanto para materiais metálicos ainda há grandes avanços a serem feitos.

Os equipamentos atuais de manufatura aditiva foram desenvolvidos para protótipos e não produção em série por isso ainda não solucionam problemas de produção em série. A próxima geração de equipamentos deve ser fabricada com intuito de atender essa necessidade.

Na questão de segurança digital e proteção de IP, a geração atual de máquinas aditivas está vulnerável a crimes cibernéticos. Além da falta de regulamentação e especificações dessa indústria para testar procedimentos.

Design e engenharia	Manufatura	Serviços
Falta de conhecimento sobre design	Altos custos de produção	Falta de especificações na indústria em testar procedimentos
Alto risco de pirataria dos desenhos de produtos entre usuários	Limitações de tamanho	Falta de uma estrutura de regulação
	Limitações na qualidade do produto	Risco de ruptura da cadeia de fornecedores
	Dependência de uma pequena quantidade de fornecedores de máquinas	

Tabela 2.10: Limitações da indústria de Manufatura Aditiva [8].

Entretanto as empresas fabricantes de maquinaria de adição de camada estão enfrentando estas limitações com resultados significativos e ao que tudo indica não serão impedimentos no futuro do desenvolvimento desta indústria [8].

2.5- Comparação com outros processos de manufatura

Após a exposição de vantagens e limitações da implantação de máquinas com princípios da manufatura aditiva, é pertinente comparar este processo com alguns já consolidados na cadeia produtiva.

A grande maioria dos processos de produção usuais na engenharia contam com mais de uma etapa de manufatura até o produto final. Peças fabricadas através da adição de camadas passam por apenas uma etapa para serem finalizadas, acarretando em uma diminuição no tempo total do ciclo de manufatura.

Além do aspecto citado acima, deve-se considerar que todos os outros processos são subtrativos, resultando em uma maior quantidade de material desperdiçado na cadeia produtiva, ao contrário dos processos aditivos onde o mesmo não ocorre.

Uma comparação mais detalhada será realizada com a tecnologia de CNC (*Computer Numerical Control*). A mesma foi escolhida devido ao fato de ser aquela cuja metodologia é mais facilmente comparável com máquinas de impressão 3D, Sinterização a laser, entre outras usadas para adicionar materiais. CNC é uma tecnologia também baseada no uso de computadores, porém a primeira diferença ao comparar com manufatura aditiva é que esta é subtrativa. Qualquer peça criada a partir de CNC é derivada de um bloco inicial de material [2].

Em termos de material, máquinas de CNC geralmente processam melhor materiais duros como aços ou alumínio metálicos. Podem ser utilizadas para materiais macios como fibras plásticas de densidade média (MDF- *Medium Density Fiberboard*), espumas, ceras e alguns polímeros. Porém apenas como uma etapa da produção, antes da fundição, e não para a criação de produtos finais. Enquanto que máquinas de adição de camadas atualmente podem manufaturar produtos a partir de uma variada gama de materiais como polímeros, ceras, metais e tecidos orgânicos. Em contraste, peças produzidas por essa podem apresentar anisotropias

e vazios, enquanto que CNC produz peças homogêneas e com acabamento de alta qualidade.

A velocidade de máquinas CNC para remover material é maior do que a de máquinas de adição de materiais. Porém essas últimas podem ser utilizadas para produzir partes em uma única etapa, enquanto que CNC necessita de um tempo considerável de preparação para a máquina e na maioria das vezes é um processo de múltiplas etapas.

A complexidade geométrica da forma a ser produzida representa uma das maiores vantagens de processos MA. Para usar CNC como uma etapa única de produção existem limitações geométricas, enquanto que as mesmas não apresentam dificuldades para adição de materiais. A precisão para ambas as tecnologias em discussão é definida de acordo com as propriedades do material utilizado.

Em termos de programação e preparação para produção, máquinas CNC envolvem diversas variáveis tais como ângulo, velocidade da máquina, seleção de ferramentas e posição de aproximação. Já máquinas MA ainda que apresentem algumas opções de pré-configurações têm um menor tempo de preparo [2].

3 Estudo Comparativo das propriedades mecânicas do Aço Inoxidável 17-4 PH quando impresso e quando forjado

O 17-4 PH é um aço inoxidável martensítico, endurecível por precipitação, que apresenta excelente resistência mecânica, alta tenacidade tanto no metal base quanto em soldas, e uma boa resistência a corrosão em temperaturas até 316° C [16]. A sua dureza e tenacidade podem ser manipuladas por meio da faixa de temperatura dos diversos tratamentos térmicos aos quais a liga pode ser submetida [16]. Por estes motivos, o aço inoxidável 17-4 PH (AISI 630) encontra inúmeras aplicações nas indústrias aeroespacial, biomédica, petroquímica e de processamento de alimentos entre outras.

O 17-4 PH também é disponível em pó metálico [17-19], sendo portanto muito utilizado nos processos de fabricação por sinterização, moldagem por injeção e, mais recentemente, na manufatura aditiva por meio da sinterização seletiva a laser (SSL).

A Tabela 3.1 mostra a composição para o aço 17-4 PH de acordo com a norma ASTM A693 para lâminas, placas e fitas [16], bem como dois exemplos de pós utilizados para a manufatura aditiva por SSL [19,20].

Elemento	ASTM A693	Pó (EOS)	Pó (Mitsubish)
C (%)	0,07 (max.)	0,05	0,07
Mn (%)	1,00 (max.)	0,60	0,28
P (%)	0,040 (max.)	0,02	0,01
S (%)	0,030 (max.)	0,01	0,01
Si (%)	1,00 (max.)	0,70	0,71
Cr (%)	15,00 - 17,50	15,4	15,99
Ni (%)	3,00 - 5,00	4,3	4,15
Cu (%)	3,00 - 5,00	4,0	3,88
Nb (%)	0,15 - 0,45	0,27	0,35
O (%)	0,70 (max.)	—	0,59
Fe (%)	Balanço	Balanço	Balanço

Tabela 3.1: Composição do aço inoxidável 17-4 PH [16,19,20].

Diversos autores investigaram as diferenças entre as propriedades mecânicas e microestruturas do aço inoxidável 17-4 PH produzido por meio do processo convencional de forjamento e aquelas resultantes da SSL [20-24]. É sabido que as

ligas metálicas produzidas a partir da metalurgia do pó podem apresentar defeitos microestruturais nos vários estágios de sua fabricação, desde a produção do pó (composição química não uniforme), passando pela compactação (porosidade) e chegando até a sinterização (porosidades e oxidação superficial) [25]. Apesar da constante evolução das máquinas de SSL, estes mesmos tipos de defeitos ainda podem ser encontrados nos processos atuais de manufatura aditiva, de forma que é importante conhecer seus efeitos sobre as propriedades mecânicas dos componentes assim produzidos. Outro aspecto importante para os componentes metálicos produzidos por SSL é a anisotropia nas suas propriedades mecânicas [24].

No Laboratório de Fabricação Digital do ITUC/PUC-Rio, Marzano [23] realizou em 2015 um estudo comparativo entre corpos de prova do aço 17-4 PH usinados a partir de amostras do material fundido e outros manufaturados através do processo SSL. Para os dois tipos de amostras foram utilizados corpos de prova de tração de tamanho reduzido com as dimensões estabelecidas pela norma ASTM E-8.

Para obter os corpos de prova pelo processo SSL a autora utilizou a máquina EOS M Eosint 280 do Laboratório de Fabricação Digital da PUC-Rio. Os parâmetros utilizados para a impressão 3D foram [8]:

- Espessura de camada: 20 μm
- Potência máxima: 200 W
- Software: Materialise Magics 3D Print Suite [26]

No trabalho de Marzano [23] não há referências quanto aos tratamentos térmicos a que as amostras foram submetidas antes dos ensaios de tração.

Micro tomografias computadorizadas realizadas nos corpos de prova manufaturados pelo processo SSL identificaram a presença de pequenos defeitos localizados na sua estrutura porém com ausência de porosidade. Por outro lado, através da microscopia óptica foi possível observar a presença de inclusões nos corpos de prova do material fundido e posteriormente usinado.

A Tabela 3.2 apresenta a comparação entre os resultados dos ensaios de tração realizados por Marzano em dois corpos de prova de cada tipo de amostra [23]. Resultados de medidas da dureza Vickers são também apresentados na tabela. Para comparação, a Tabela 3.2 mostra também as propriedades mecânicas do aço 17-4 PH forjado apresentadas na Referência [16].

Amostra	Tensão Limite de Escoamento a 0,2% (MPa)	Tensão Limite de Ruptura (MPa)	Dureza Vickers (HVS)
Impressa SSL 1	972	1400	373 ± 4,2
Impressa SSL 2	943	1380	
Fundida/Usinada 1	794	1150	165 ± 4,6
Fundida/Usinada 2	774	1130	
Referência [1] – (Condição A: homogeneizado por 2 h a 1038°C e resfriado ao ar)	1103 (max.)	1276 (max.)	375 (max.)
Referência [1] – (Condição H900: A partir da Condição A, envelhecido por 1 h a 482°C e resfriado ao ar)	1172 (max.)	1310 (max.)	395 - 485

Tabela 3.2: Resultados das comparações das propriedades mecânicas de amostras do aço inoxidável 17-4 PH fundido e impresso através do processo SSL [16,23].

Marzano associou a resistência mecânica mais alta das amostras impressas com presença de inclusões nas amostras do material fundido [23], evidenciando a dependência das propriedades mecânicas com a microestrutura do material. Ainda assim, estes resultados mostram que pode-se alcançar propriedades semelhantes a do material fundido ou forjado para componentes fabricados a partir de processos de manufatura aditiva.

Em um trabalho mais recente, publicado em 2017 por um grupo da Texas A&M e da Universidade do Mississippi [24], Mahmoudi et al. investigaram o efeito da anisotropia, parâmetros de fabricação e tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas e microestrutura de amostras do aço inoxidável 17-4 PH produzido pelo processo SSL. No trabalho foi utilizada a impressora ProX DMP 100 da 3D Systems [27]. Para analisar a anisotropia resultante do processo de SSL, foram testados corpos de prova impressos com camadas depositadas tanto na direção vertical (axial) quanto horizontal dos corpos de prova. Os primeiros (verticais) foram impressos com formato cilíndrico e usinados de acordo com a norma ASTM E-8. Os demais (horizontais) foram impressos com formato prismático e posteriormente

também usinados para atender à norma ASTM E-8. Para a manufatura dos corpos de prova foram utilizadas duas velocidades de deposição (velocidades de varredura do laser), chamadas pelos autores de padrão (350 mm/s) e otimizada (300 mm/s). Variou-se também o intervalo de deposição entre camadas sucessivas, utilizando os intervalos de 10 s e 5 s. Os corpos de prova foram tratados para atingir a Condição A (ver Tabela 3.2). Posteriormente, alguns corpos de prova foram submetidos a outro tratamento térmico para atingir a Condição H900 [16], que consiste no envelhecimento por 1 hora à temperatura de 482°C seguido de resfriamento no ar (ver Tabela 3.2).

A Tabela 3.3 apresenta as médias dos resultados obtidos por Mahmoudi et al. [25] para cada tipo de corpo de amostra testada (5 corpos de prova para cada tipo de amostra).

Orientação	Velocidade de Deposição (mm/s)	Intervalo entre Camadas (seg.)	Condição (Tratamento Térmico)	Tensão Limite de Escoamento a 0,2% (MPa)	Tensão Limite de Ruptura (MPa)	Dureza Vickers (HVS)	Alongamento até a Ruptura (%)
Vertical	350	50	A	660	940	350	4,0
Vertical	350	10	A	630	1050	290	4,2
Vertical	350	50	H900	730	960	400	3,5
Vertical	300	50	A	600	1000	290	5,5
Vertical	300	50	H900	940	1130	460	2,5
Horizontal	350	50	A	650	1050	310	9,7
Horizontal	350	50	H900	930	1240	430	7,7

Tabela 3.3: Resultados das comparações entre as propriedades mecânicas de amostras do aço inoxidável 17-4 PH impressas através do processo SSL [25].

Os resultados apresentados na Tabela 3.3, mostram que as propriedades mecânicas do aço 17-4 PH manufaturados através da SSL podem variar significativamente com os parâmetros de processo. No entanto, em todos os casos apresentados por Marzano [8] e Mahmoudi et al. [25], a sua resistência mecânica, tanto o limite de escoamento quanto o de ruptura, são compatíveis com o material obtido a partir dos processos convencionais de manufatura.

Entretanto, tendo em vista as particularidades da manufatura aditiva por SSL e a consequente presença de porosidades e microdefeitos associados aos processos de metalurgia do pó [26], ainda é necessário conhecer os efeitos da MA sobre a

resistência a fadiga. A resistência à fadiga do aço inoxidável 17-4 PH manufaturado pelo processo de SSL foi investigada por Yadollahi et al. em 2015 [22]. Resultados deste estudo indicaram que a vida em fadiga do 17-4 PH manufaturado por SSL é muito mais curta do que a do mesmo aço obtido a partir do processo de forjamento convencional. Esta diferença foi atribuída pelos autores à presença de defeitos introduzidos pela SSL que servem como pontos de iniciação de trincas de fadiga. Neste sentido, os processos de manufatura aditiva para metais ainda precisam evoluir para que a sua utilização para componentes mecânicos sujeitos a carregamentos cíclicos alcance os níveis requeridos pela indústria.

4 Análise do Caso do Robô Tatuí da Insfor

A empresa Insfor nasceu nos laboratórios da PUC-Rio e atualmente é um braço do grupo Ouro Negro S.A., atuando como a sua unidade de negócios dedicada a soluções robóticas inovadoras de alta tecnologia. Atuando em todas as etapas de produção, desde os desenhos em CAD, passando pela prototipagem, pela implementação de equipamentos e por fim prestando consultoria e serviços na área de robótica.

Um dos produtos oferecidos pela Insfor é o Tatuí. Ele consiste em um robô de autopropulsão que é utilizado na inspeção visual e na medição de espessura interna de dutos e risers de perfuração. O Tatuí foi projetado para atuar em tubulações não pigáveis tendo em vista a demanda de risers de perfuração. Ele opera sem necessidade de pressão ou fluxo na tubulação, fazendo curvas do tipo *back to back*. Seu sistema de locomoção, por ser auto ajustável, possibilita a inspeção de tubulações multidiâmetro em qualquer direção, gerando dados de vídeo e imagens em tempo real.

Dentre suas características estão: a gravação e visualização de imagens em tempo real, unidade bidirecional com controle de velocidade e posição, sistema de locomoção multidiâmetro de ajuste automático, avaliação de espessura de parede através de medidas ultrassônicas e a autopropulsão por meio de motores elétricos [28].

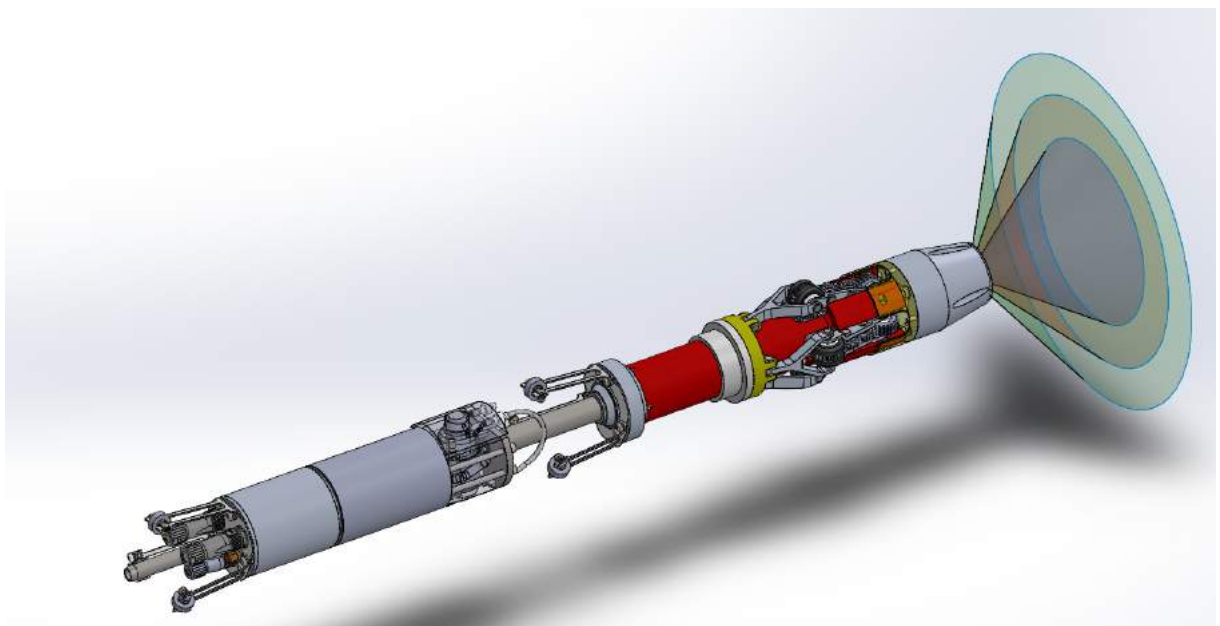


Figura 4.1: Desenho em CAD do robô Tatuí, disponibilizado pela Insfor.

A criação de protótipos de robôs como esse é essencial para a realização de testes precisos e também para assegurar o seu funcionamento, dado os altos custos associados fabricação do produto final. As peças componentes do mesmo apresentam alta complexidade e por isso são fabricadas a partir de técnicas da manufatura aditiva para serem utilizadas nos testes de funcionamento que assemelham-se a condições reais de operação. Para o protótipo do Tatuí, foram fabricadas engrenagens impressas no Laboratório de Fabricação Digital da PUC-Rio. Na primeira amostra, a fim de consolidar seu *design*, essas foram fabricadas em Ácido Poliático (PLA - *polylactide*), material termoplástico barato e biodegradável de fontes como amido de milho, e muito aplicado em impressões 3D. Para um termoplástico, esse é um material bastante rígido e resistente, porém não é indicado para peças que sofram esforços mecânicos, por isso muito utilizado na prototipagem. A máquina utilizada neste processo foi a *Makerbot Replicator 2.0* cujas especificações estão expostas na Tabela 4.1.

Impressão	Tamanho e Peso	Software
Filamento do pacote carretel 900g grande	Dimensões do Produto Without Spool: 49 L X 32 W X 53.1 H cm [19.1 X 12.8 X 20.9 in] With Spool: 49 L X 42 W X 53.1 H cm [19.1 X 16.5 X 20.9 in]	Pacote de software MMakerBot Desktop Software
Tecnologia de impressão Fused Deposition Modeling	Caixa de transporte 60.5 L X 58.4 W X 41.7 H cm [23 X 23.8 X 16.4 in] [24.3 X 20.7 X 22.9 IN]	Tipos de arquivo suportados STl, Obj, Thing, Makerbot
Volume de construção 24.6 L X 15.2 W X 15.5 H cm [9.7 X 6.0 X 6.1 in] 5796 cubic cm [354 cubic in]	Peso do Produto 12.6 kg [27.8 lb]	Sistemas operacionais Windows (7+), Mac Os X (10.7+), Linux (Ubuntu 12.04+)
Resolução de camadas 100 microns [0.0039 in]	Peso 17.8 kg [39.25 lb]	Elétrica
Diâmetro de Filamento 1.75 mm [0.069 in]	Mecânica	Requerimentos poderosos 100–240 VAC; ~4A; 50–60 Hz; 100W
Compatibilidade de Filamento MakerBot ABS Filament Spool 1 kg [2.2 lb]	Construção PVC Panels with Powder-Coated Steel Aluminum Casting and Extrusions for Motion Components	Conectividade USB, SD CARD (Both a USB cable and SD Card Included)
Diâmetro do bocal 0.4 mm [0.015 in]	Construir superfície Heated, Black Anodized 356F Aluminum	
Tipo de arquivo de impressão .MAKERBOT	Rolamentos XYZ Wear-resistant, Oil-Infused Bronze	
Temperatura	Motores a passo 1.8° Step Angle with 1/16 Micro-Stepping	
Temperatura de Funcionamento Ambiental 15 to 32°C [60 to 90°F]		
Temperatura de armazenamento 0 to 32°C [32 to 90°F]		

Tabela 4.1: Especificações técnicas da Makerbot Replicator 2.0 [29].

Após a impressão em PLA, as engrenagens a serem utilizadas no Tatuí foram impressas em poliamida na impressora FORMIGA P110 da EOS, através da Sinterização Seletiva a Laser (SSL). Processo no qual um laser de CO₂ é usado como fonte de energia para escanear o material em pó e fundir suas partículas formando um modelo ao solidificar-se [2]. A Poliamida utilizada foi a PA 2200 sem fibra, esse material também é fornecido pelo EOS e suas propriedades estão expostas na Tabela 4.2. É um material de alta rigidez e boa resistência mecânica.

Propriedade	Moldagem & Extrusão	Produzido por SLS (EOS)
Módulo de Elasticidade		
Direção X (MPa)	248-1242	1650
Direção Y (MPa)	248-1242	1650
Límite de resistência a Tração		
Direção X (MPa)	21-69	48
Direção Y (MPa)	21-69	48
Alongamento		
Direção X (%)	250-390	18
Módulo de Flexão		
Direção X (MPa)	186-1311	1500
Resistência à Flexão		
Direção X (MPa)	10-56	58

Tabela 4.2: Propriedades Mecânicas do PA 2200 [30,31].

Por fim, as engrenagens também foram impressas em aço inoxidável 17-4 PH cujas propriedades mecânicas são discutidas no capítulo anterior. O processo utilizado em sua fabricação contou com a impressora M280 da EOS.

O objetivo inicial era de utilizar estas últimas no protótipo do Tatuí. Porém, após sua impressão foi verificado que a versão da máquina EOS utilizada pela Insfor na fabricação de seus protótipos de engrenagem metálica imprime os suportes da peça com o mesmo metal base utilizado no processo de MA. No caso da engrenagem, como mostra a Figura 4.2, este suporte possui uma geometria complexa, e consequentemente precisa ser retirado através de um pós processamento que envolve uma operação de usinagem. Para a produção em grandes quantidades, este processo não se mostrou viável de forma que em sua versão comercial as engrenagens o robô Tatuí passaram a ser fabricadas através do processo de usinagem mecânica em máquinas CNC, apesar deste apresentar custos mais altos e menor velocidade de produção. Já para o uso nos protótipos do robô, a equipe

decidiu pela segunda engrenagem mostrada neste trabalho, impressa no PA2200, por esse motivo e pelo fato da mesma resistir aos esforços mecânicos requeridos.

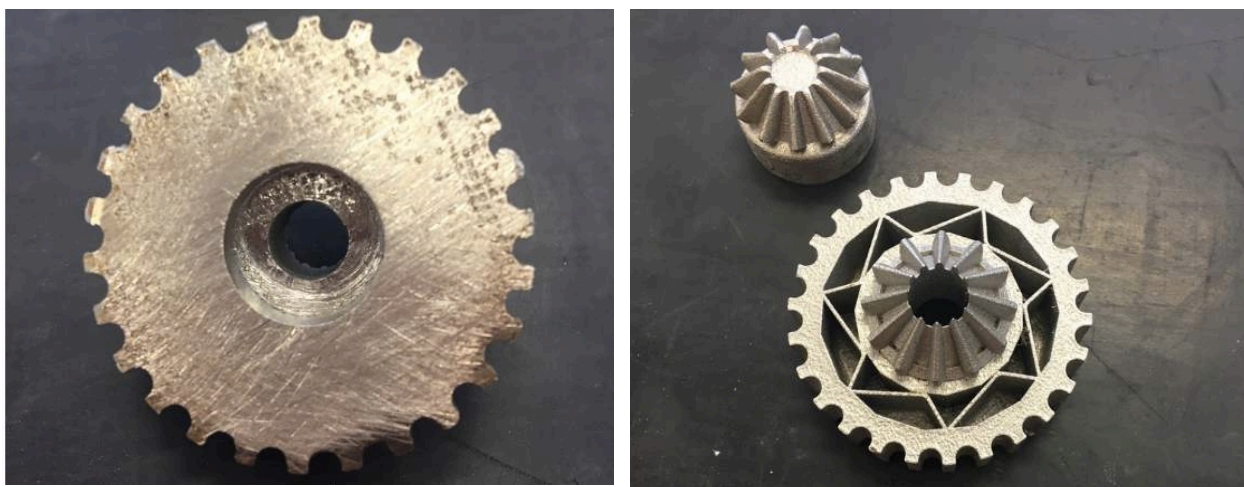


Figura 4.2: Engrenagens impressas na EOS M280 em 17 PH-4



Figura 4.3: Engrenagens em PLA, Poliamida e Aço Inoxidável impressas para o Tatuí.

Na versão comercial do robô Tatuí, uma de suas peças principais, o suporte para o cabeçote de medição de espessura por ultrassom, é impresso na FORMIGA P110, utilizando o mesmo material PA 2200 que foi empregado nas engrenagens para o seu protótipo. Devido aos canais internos da peça para o transporte do fluido, demonstrados nas Figuras 4.4 a 4.6, ela é impossível de ser usinada, podendo apenas ser fundida através de uma matriz ou então ser impressa pelo método de Sinterização a Laser. Onde não existe a formação de um suporte em sua estrutura interna.

Esse suporte para o cabeçote possui duas funcionalidades, a primeira é a de realizar o transporte do fluido acoplante do interior do robô para a superfície do cabeçote. Esse fluido é necessário para a realização das medidas da espessura do tubo inspecionado por ultrassom. E a segunda é a de exercer a função de sistema hidráulico para a elevação do cabeçote do centro do robô até o contato com a superfície do tubo a ser inspecionado.

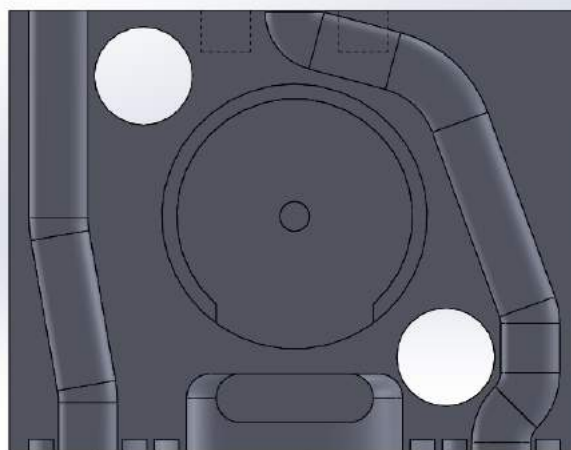
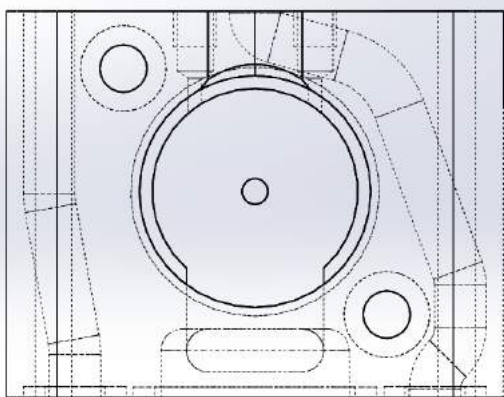


Figura 4.4: Vista em corte do suporte do cabeçote do Tatuí

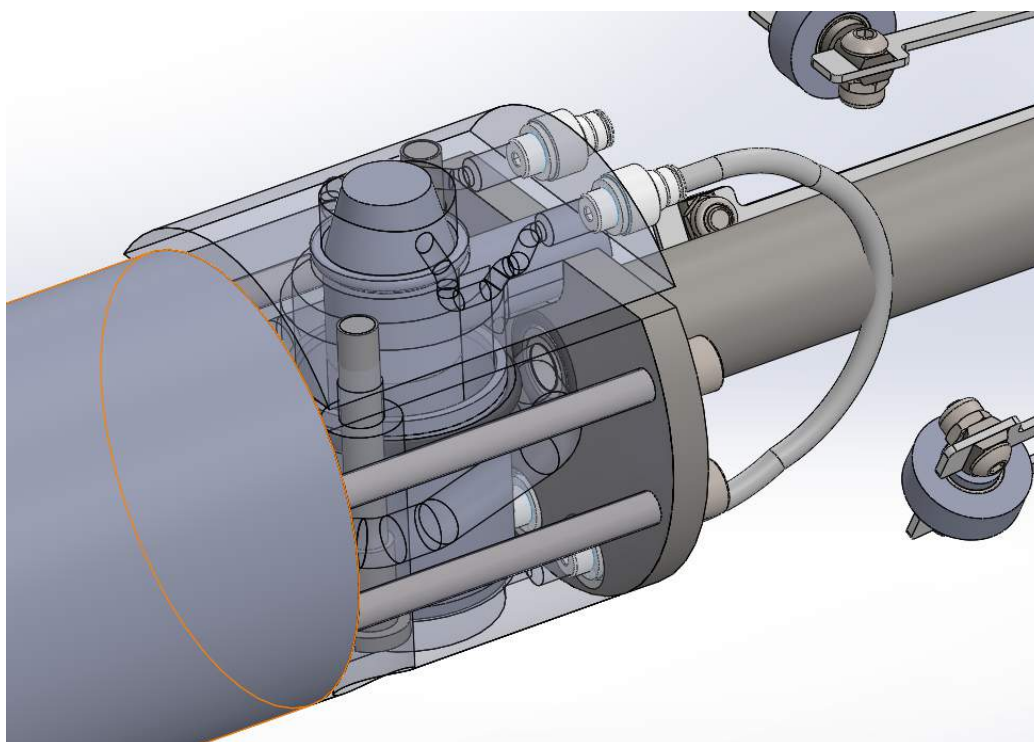


Figura 4.5: Desenho em CAD do suporte do cabeçote do Tatuí

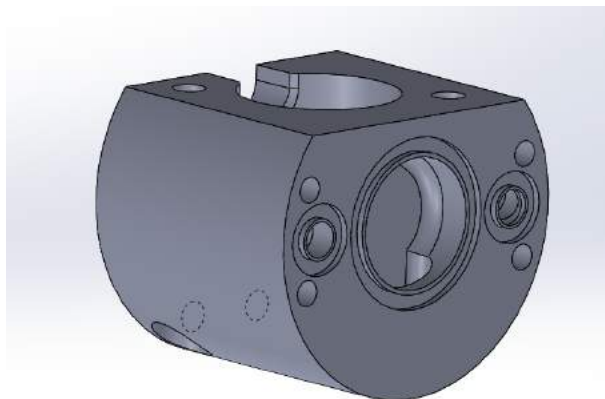
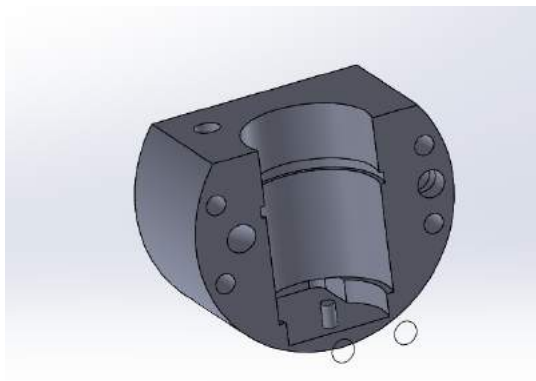


Figura 4.6: Vistas do suporte do cabeçote do Tatuí

5 Manufatura Aditiva nos Laboratórios da PUC-Rio

Este capítulo é dedicado a apresentação de alguns produtos e protótipos fabricados em diferentes laboratórios da PUC-Rio. A universidade conta com o laboratórios como o Laboratório de Fabricação Digital da PUC-Rio, o NEXT, o Giga e o Instituto de Tecnologia da PUC-Rio (ITUC). Todos os eles possuem equipamentos de impressão 3D tanto metálica quanto em materiais poliméricos, colaborando com o desenvolvimento de novas tecnologias e principalmente de protótipos empregados em pesquisas da universidade.

5.1- Escapamento do motor da aeronave XXPTO do Aero PUC-Rio

Descrição: Foi realizado um redesenho do escapamento do motor da aeronave XXPTO do Aero, equipe de aeromodelismo da PUC-Rio. Essa necessidade surgiu da dificuldade de usinagem no formato desta peça que deve aguentar a vibração do motor da aeronave e a pressão dos gases que irão passar pela mesma. Com a fabricação através de MA, essa peça pode ser feita com parede de espessura variável e ainda apresentou perda significativa de peso em relação a original.

Laboratório: Laboratório de Fabricação Digital da PUC-Rio

Máquina: Impressora de metal EOS M280

Tecnologia: SLS (Sinterização Seletiva a Laser)

Material: Aço Inoxidável (17 PH-4)

Área de aplicação: Indústria Aeronáutica



Figura 5.1: Imagens do Escapamento do motor da XXPTO

5.2- Protótipos dos Pistões de um Motor Rotativo de Kopelrot

Descrição: O projeto do motor rotativo de Kopelrot tinha como objetivo fabricar um motor rotativo de combustão interna que permitisse o uso de diferentes combustíveis na faixa ideal de funcionamento. O mesmo necessitava que seus pistões fossem arrefecidos internamente, o que seria feito com a inclusão de dutos de óleo internos a cada pistão, tal geometria não pode ser fabricada através da usinagem, optando assim pela impressão metálica.

Laboratório: Laboratório de Fabricação Digital da PUC-Rio

Máquina: Impressora de metal EOS M280

Tecnologia: SLS (Sinterização Seletiva a Laser)

Material: Aço Inoxidável (17 PH-4)

Área de aplicação: Indústria Automobilística



Figura 5.2: Imagens dos pistões do Motor Rotativo

6 Análise das Aplicações Atuais

Esta seção será dedicada a análise de três diferentes produtos fabricados a partir da técnica de manufatura aditiva. Os produtos em questão pertencem a indústrias diferentes, portanto exemplificam aplicações diversas desta tecnologia.

6.1- Sondas para medição de fluxo de ar – *Vectoflow* – Aviação

O primeiro grupo de produtos a ser estudado é o de sondas medidoras de fluxo de ar, cuja medição da vazão é realizada através do ângulo de ataque e da velocidade. As mesmas são fabricadas pela empresa alemã *Vectoflow* que atua no ramo de metrologia fluidodinâmica de alta precisão. Suas principais aplicações são em aeronaves e nos designs de turbo máquinas [32].

A empresa *Vectoflow* utiliza a tecnologia de *Powder Bed Fusion* da líder de mercado EOS, já apresentada no presente trabalho. A mesma também é chamada de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) e usa laser como energia para fundir o material metálico.

Dentre essas sondas se pode destacar as do tipo Kiel que medem a pressão total do fluxo e elas são extremamente rígidas e duráveis. Atualmente, são fabricadas em uma só peça utilizando a técnica de impressão 3D de metais. Os possíveis materiais utilizados para sua fabricação são titânio, aço inoxidável, aço inoxidável de alta temperatura e inconel (liga níquel-cromo) [33]. As especificações dessa peça estão expostas na Tabela 3.1.



Figura 6.1: Sonda de Kiel produzida pela Vectoflow [33].



Figura 6.2: Tubos de Kiel produzidos pela Vectoflow [33].

Comprimentos	280 mm ou outros comprimentos possíveis
Diâmetro	Depende do design
Material	Titânio, Aço Inoxidável, Aço inoxidável de alta temperatura e Inconel
Instalação	Customizável pelo cliente
Conexões	Customizável pelo cliente
Alcance do ângulo/ alcance da temperatura com menos de 1° de desvio da medida total da temperatura vs temperatura real	$\pm 60^\circ$
Alcance da velocidade	Até 2 Mach
Alcance da temperatura	Até 1000°

Tabela 6.1: Especificações da sonda de Kiel produzida pela Vectoflow [33].

Os materiais utilizados para essa peça são resistentes a altas temperaturas e velocidades, requisitos necessários para que suas funcionalidades sejam cumpridas. É preciso que essa apesar de pequena seja extremamente resistente a pressão. Na figura 3.3 é apresentado o gráfico de tensão e deformação para a liga de titânio Ti6Al4V, uma das matérias primas da sonda de Kiel. No mesmo é possível perceber que o titânio Ti6Al4V forjado apresenta comportamento dútil, endurecimento por deformação moderado e alongamento de 10%. Já os espécime fabricados a partir da Sinterização a Laser de Metal Direta, DMLS Ti6Al4, apresentaram limites de escoamento mais elevados porém alongamentos menores do que a do material forjado. Quando tracionados transversalmente às camadas depositadas (espécimes verticais), a resposta do DMLS Ti6Al4 é frágil, suportando tensões mais elevadas poré falhando em níveis de deformação bem menores [32].

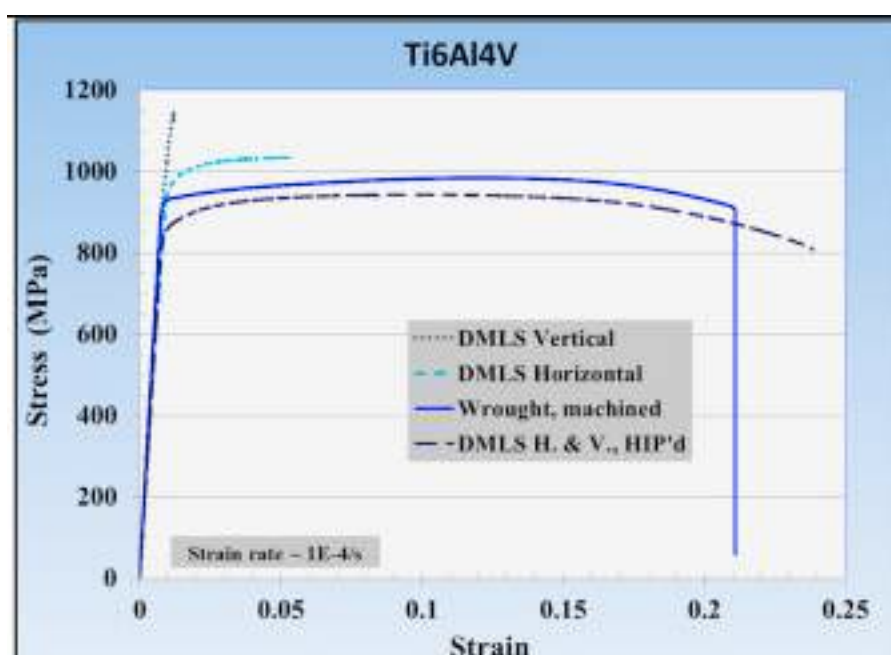


Figura 6.3 : Gráfico de tensão e deformação para o Ti6Al4V [34].

Um dos fatores mais determinantes para partes de aeronaves é que estas suportem velocidades muito altas, pois é uma vantagem competitiva em relação a outros meios de transporte. Porém, é também um fator crítico, levando em consideração que quando a velocidade é muito baixa pode ocasionar em colapso. Entretanto altas velocidades criam situações de altas pressões para os seus componentes. Logo as sondas metrológicas são importantes para medir velocidades

relevantes. A velocidade é determinada baseada na pressão do fluxo de ar que passa por elas [32].

A funcionalidade das sondas de Kiel é levada ao extremo em manobras ou no pouso onde o fluxo de ar está localizado a um ângulo. Como esses medidores estão localizados no motor, nesse momento eles sofrem maiores cargas térmicas do que o normal, criando desafios para os engenheiros, que foram forçados a produzir um grupo de sondas preparadas para enfrentar essas condições. Essas apresentam um design aerodinâmico especial, com forma reduzida e otimizada para não prejudicar o fluxo de ar, suportando uma temperatura de até 1000 °C [32].

Antes da *Vectoflow* entrar no mercado com a tecnologia de manufatura aditiva, as sondas metrológicas eram produzidas em mais de uma parte tornando-as instáveis. Logo, atualmente elas são produzidas através de DMSL da EOS em uma só parte e de tamanho reduzido com uma arquitetura que só é possível com o uso desta tecnologia. Outro fator levado em consideração na concepção destas peças foi o desenvolvimento de mecanismo que pudesse evitar um barulho secundário indesejado, a solução encontrada foi com o uso da adição de camadas.

Dentre as vantagens adquiridas com o uso da manufatura aditiva para as sondas da *Vectoflow* estão que estas são 150 por cento mais rígidas dos que as convencionais. Ainda apresentam espessura extremamente fina, melhor *design* aerodinâmico e acabamento, obtendo medições precisas. Por outro lado, o componente anterior apresentava vários casos de fratura. O novo produto apresenta maiores intervalos de manutenção, o que dependendo do local onde a parte é instalada pode reduzir dias de pausa para manutenção, aumentando sua vida útil. Esse fator tem um efeito nos custos refletindo também na robustez e na maior segurança [32].

Em conclusão, a manufatura aditiva permitiu uma maior flexibilidade no *design* material e tamanho, maior agilidade na produção e menor tempo para a entrega do produto final. Resultando em um produto maior vida útil, de alta segurança e resistente a pressões [32].

6.2- Plataformas Esterotáticas para Neurocirurgias – FHC - Medicina

No setor de saúde a manufatura aditiva não representa apenas uma opção a processos já utilizados mas sim a solução para um alto número de casos que antes não poderiam ter sido curados. Suas aplicações vão desde implantes e aparelhos cirúrgicos até a impressão de tecido humano. O segundo produto a ser estudado nesta seção é a *microTargetingtm Platform*, plataforma Estereotática para neurocirurgias fabricados pela empresa FHC , empresa líder em inovação de neurociência nos últimos 40 anos. Utilizada em cirurgias de Estimulação Cerebral Profunda (DBS - Deep Brain Stimulation) para tratar pacientes com doença de Parkinson, distonia e tremor essencial. A geometria do cérebro de cada pessoa é única e por isso cada produto deve ser personalizado, característica que se torna possível utilizando a tecnologia de adição de camadas [35].

O modelo desenvolvido pela FHC em parceria com um renomado neurocirurgião, utiliza a impressão 3D baseando-se nas coordenadas anatômicas de cada paciente. A primeira aplicação desta tecnologia denominada STarFix é a plataforma Estereotática, ela oferece ao paciente conforto, alta precisão e redução significativa de tempo na sala de cirurgia [35].

O processo utilizado para sua produção é o de Sinterização a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*) já citado neste trabalho. Seu princípio de funcionamento baseia-se em um laser de CO₂ usado para escanear o polímero e fundir duas partículas formando um modelo a partir de sua solidificação [2]. A máquina utilizada é a FORMIGA P 100 da empresa EOS.

A matéria prima utilizada para a produção das plataformas Estereotáticas da FHC (Figuras 3.4 e 3.5) é o polímero *PA 2201 polyamide powder* cujas propriedades estão expostas na Tabela 3.2 . Este material apresenta alta rigidez e resistência mecânica, além de comportamento constante excelente a longo prazo, alta resolução de detalhes e variedade de acabamentos [30].

Propriedade	Moldagem & Extrusão	Produzido por SLS (EOS)
Módulo de Elasticidade		
Direção X (MPa)	248-1242	1700
Direção Y (MPa)	248-1242	1700
Limite de resistência a Tração		
Direção X (MPa)	21-69	48
Direção Y (MPa)	21-69	48
Alongamento		
Direção X (%)	250-390	15
Módulo de Flexão		
Direção X (MPa)	186-1311	1500
Resistência à Flexão		
Direção X (MPa)	10-56	58
Impacto Charpy (kJ/m2 @ 23°C)	N/A	53
Impacto Charpy com Entalhe (kJ/m2 @ 23°C)	N/A	4.8

Tabela 6.2: Propriedades Mecânicas do PA 2201 [30, 31].



Figura 6.4: Plataforma Estereotática produzida pela FHC [35].

A cada ano aproximadamente 8000 cirurgias de DBS são realizadas. As plataformas usadas tradicionalmente nessas cirurgias apresentavam algumas limitações aos pacientes. Por exemplo, para prevenir o movimento durante a cirurgia, elas imobilizavam suas cabeças para obter imagens, identificar o lugar correto da cirurgia e ainda para implantação de eletrodos nos tecidos do cérebro. As novas plataformas permitem que o enfermo tenha um maior conforto na cirurgia, cuja duração foi reduzida de 12 horas para 2 horas no total.

As novas plataformas produzidas com as máquinas da EOS permitem um menor prazo de entrega de produtos flexíveis e customizados para cada doente e menores custos de produção. A nova máquina é ainda mais precisa e apresenta mais funcionalidades. Um exemplo de funcionalidade que foi incorporada a

plataforma Estereotóxica é o anel metálico de indexação, antes ele é anexado pelo cirurgião a plataforma durante cirurgia. Hoje ele é incorporado ao aparelho, poupando tempo na sala de cirurgia.

A FORMIGA P 100 (Figura 3.6) também é vantajosa para a FHC pelo fato de todo o material fornecido a ela para a fabricação da peça ser utilizado, gerando um economia e a vantagem ambiental de não desperdiçar matéria prima.



Figura 6.5: Vistas da Plataforma Estereotóxica produzida pela FHC [38].



Figura 6.3: Máquina FORMIGA P 100 da EOS [38].

6.3- Tênis *Futurecraft 4D* – Adidas – Equipamentos Esportivos

O último caso a ser estudado neste trabalho corresponde ao tênis esportivo *Futurecraft 4D* da Adidas. Ele representa o pioneirismo da marca, pois é o primeiro processo de produção em massa que produz solados de geometria complexa, impossíveis de serem antes fabricados. Sua produção é feita em parceria com a empresa do Vale do Silício, *Carbon* cujo princípio é criar produtos com produção em escala através da manufatura aditiva.

A tecnologia desenvolvida é chamada CLIP, DLS - *Digital Light Sinthesis*, que utiliza projeção de luz digital, ótica permeável por oxigênio e resina líquida programável com o intuito de produzir componentes finais com boas propriedades mecânicas e excelente acabamento. Dentre os seus benefícios estão que as propriedades mecânicas das partes produzidas por esta tecnologia são as mesmas independente da direção em que são impressas, diferentemente de acordo com a direção em que o material é impresso. O CLIP é um processo fotoquímico que usa luz e oxigênio para produzir partes através da adição de camadas [38].

O material utilizado é desenvolvido pela *Carbon* e chamado de EPU, é uma resina de poliuretano, um elastômero. Esse é altamente elástico, resistente ao rompimento e resiliente. Ele tem o comportamento semelhante à elastômeros de poliuretano modificados por moldagem por injeção com comportamento elástico em uma faixa de temperatura extensa [39]. Suas propriedades mecânicas e de tensão estão exibidas na tabela a seguir.

Propriedades de Tração (Método ASTM D412, Die-C, 500mm/min)	
Limite de Resistência a Tração	10.2 ± 1.6 MPa
Alongamento na fratura	310 ±25%
Alongamento Final (100% Elongation)	2,1%
Tensão a 50% de deformação	1,9 MPa
Tensão a 100% deformação	3,0 MPa
Tensão a 200% deformação	5,5 MPa
Outras Propriedades Mecânicas	
Resistência ao Rasgo, ASTM D624-C	23± 3 kN/m
Compression Set, 23°C, 72 h, ASTM D395-B	23%
Resiliência Bayshore, ASTM D2632	29%

Propriedades Térmicas	
Coeficiente de expansão térmica ASTM D696	190 ppm/ °C
T _g (Temperatura de Transição Vítrea DMA, E)	-50 °C
T _g (DMA, tan(d))	-6 °C

Tabela 6.3: Propriedades Mecânicas e Térmicas do EPU fabricado pela Carbon [39].



Figura 6.7: Gráfico de tensão versus deformação do EPU [40].

O novo calçado da Adidas agrega a inovação da manufatura aditiva a alta performance, criando uma entressola do calçado que varia as suas propriedades em ao longo do mesmo. Isto não é possível em fabricações por moldagem de injeção ou de compressão em uma só peça, para atingir alta performance é necessário trabalho intenso para construção em múltiplas partes.

A tecnologia de impressão 3D da Carbon se tornou uma alternativa inteligente pois permitiu a impressão de 50 diferentes entressolas em uma só parte até chegar ao produto atual. Além disso a sua rapidez permite que a manufatura aditiva deixe de ser usada apenas para protótipos e seja adotada em produções de larga escala [40].

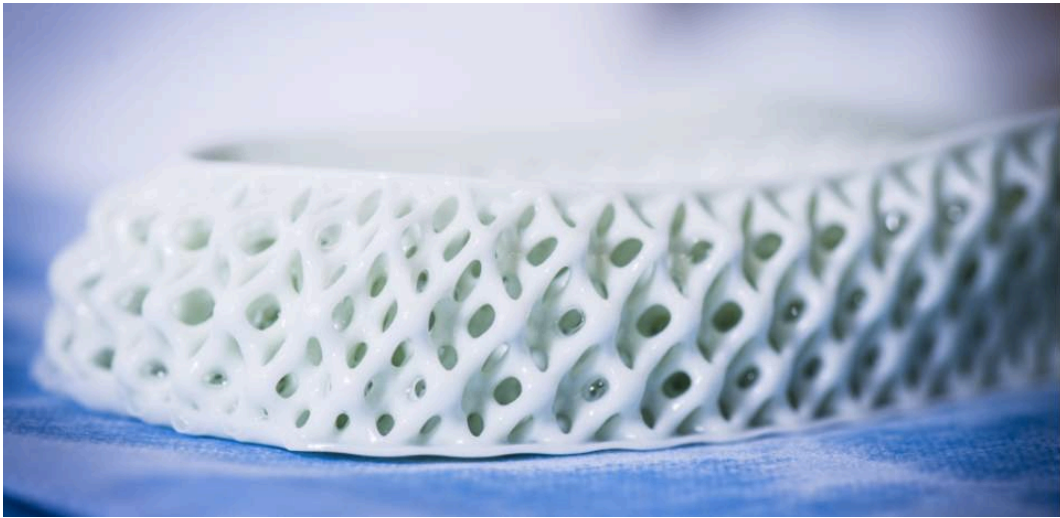


Figura 6.8: Solado do Adidas *Futurecraft 4D* [40].



Figura 6.9: Adidas *Futurecraft 4D* [40].

7 Considerações finais

A manufatura aditiva é um método de produção cujo princípio é a adição de material camada por camada. Surgiu na década de 80 com o intuito de fabricar protótipos, mas até há alguns anos não era possível imaginar que poderia ser implantada como um processo de produção em escala. Suas aplicações atuais transcendem indústrias e criam oportunidades para novos produtos de *design* complexo e arrojado.

Estudos apontam que o mercado da manufatura aditiva em 2035 poderá chegar a até U\$ 350 bilhões [10]. Demonstrando que essa tecnologia representa uma nova era no mercado da manufatura.

Atualmente as limitações deste processo se concentram nos altos custos de produção, pois os materiais utilizados nas impressoras 3D devem passar por tratamento para manter suas propriedades mecânicas. Para polímeros a diferença entre os custos e tempo de produção em comparação a processos clássicos de manufatura já foi consideravelmente reduzida, entretanto para materiais metálicos ainda há grandes avanços a serem feitos.

O momento atual dessa tecnologia para materiais poliméricos se encontra num estágio mais avançado e demonstra todo o potencial da aplicação desta técnica como agente da inovação.

O uso de materiais metálicos na manufatura aditiva certamente é um marco, pois amplia o seu escopo de aplicações e viabiliza seu uso em grandes indústrias como a aeroespacial e automobilística.

Os casos discutidos neste trabalho demonstram que não só é possível como já é uma realidade aplicar a impressão 3D em diferentes materiais e criar produtos em uma só parte, prontos para o consumidor final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GROOVER M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processes and Systems. 4th edition, Wiley, 2010.
2. GEBHARDT A.; HÖTTER J.S.; **Additive Manufacturing: 3D printing for Prototyping and Manufacturing**, Hanser Publish Munich 2016.
3. BEAMAN, J. J., **Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective**, In: 2001 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX 2001; <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2001/2001-66-Beaman.pdf>
4. http://ajw.asahi.com/article/behind_news/social_affairs/AJ201409150037, Acesso em: 30/08/2017.
5. KODAMA, H., **A Scheme for Three-Dimensional Display by Automatic Fabrication of Tree-Dimensional Model**, *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.J64-C No.4, pp.237-241, 1981.
6. https://www.ieice.org/eng/about_ieice/new_honorary_members_award_winners/2014/gyouseki_06e.html, Acesso em 30/08/2017.
7. BANDYOPADHYAY, A.; BOSE S. **Additive Manufacturing**. Taylor & Francis Group, LLC., 2016
8. BROMBERGER J.; KELLY R. **Additive Manufacturing: A long-term game change for manufacturers**, Mckinsey Global Institute, 2017. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operation/our-insights/additive-manufacturing-a-long-term-game-changer-for-manufacturers>
9. MANYIKA J.; CHUI M.; BUGHIN J.; DOBBS R.; BISSON P.; MARRS A. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**, Mckinsey global Institute, 2013. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>
10. KUPPER D.; HEISING W.; CORMAN G.; **Get ready for industrialized additive manufacturing**, BCG publications, April 2017. Disponível em: <https://www.bcg.com/en-br/publications/2017/lean-manufacturing-industry-4.0-get-ready-for-industrialized-additive-manufacturing.aspx>

11. **The factories of the future**; The Economist, pp. 17-19, July 1st, 2017.
12. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
13. CHALABYAN A.; JANSCH E.; NIEMANN T.; **How 3D printing will transform the metals industry**, Mckinsey global institute, 2017.
14. EOS Company, **EOS Materials Brochure Table**, Disponível em: https://cdn1.scrvt.com/eos/caf948a1836f247e/de3dd9532a55/EOS_Materials_Broschure_Table_en.pdf
15. FRAZIER W; **Metal additive manufacturing: A review**, April 8th, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11665-014-0958-z.pdf>
16. http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/17-4_PH_Stainless_Steel_PDB_201404.pdf, acesso em 18/12/2017.
17. https://www.oerlikon.com/am/dist/media/project/DSMA-0004.0_HighStrengthSS_AM.pdf, acesso em 18/12/2017.
18. https://www.eos.info/eos_binaries0/eos/5d5320af77f01059/04ec9803958f/EOS-Stainless-Steel-17-4PH_IndustryLine_EN.pdf, acesso em 18/12/2017.
19. Sung, H.-J., Ha, T. K., Ahn, S., and Chang, Y. W., "Powder injection molding of a 17-4 PH stainless steel and the effect of sintering temperature on its microstructure and mechanical properties," Journal of Materials Processing Technology 130–131, pp. 321–327, 2002.
20. Cheruvathur, S., Lass, E. A., and Campbell, C. E., "Additive Manufacturing of 17-4 PH Stainless Steel: Post-processing Heat Treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure," JOM, Vol. 68, No. 3, 2016.
21. Murr, L. E., Martinez, E., Hernandez, J., Collins, S., Amato, K. N., Gaytan, S. M., and Shindo, P. W., "Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting," J. mater. Res. Technol., 1(3), pp. 167-177, 2012.

22. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., Bian, L., and Mahmoudi, M., "Fatigue Behavior of Selective Laser Melted 17-4 PH Stainless Steel," in: 2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, TX, 2015.
23. Marzano, M. G., Análise Comparativa de Peças de Aço Obtidas por Fundição ou Impressão 3D: Análise Tridimensional por MicroCT e Caracterização das Propriedades Mecânicas, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2015.
24. Mahmoudi, M., Elwany, A., Yadollahi, A., Thompson, S. M., Bian, L., and Shamsaei, N., "Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel," Rapid Prototyping Journal, 23/2, pp. 280–294, 2017.
25. Prashanth, K. G., Scudino, S., Chatterjee, R. P., Salman, O. O., and Eckert, J., "Additive Manufacturing: Reproducibility of Metallic Parts," Technologies 2017, 5, 8; doi:10.3390/technologies5010008, 2017.
26. <http://www.materialise.com/en/software/magics-3d-print-suite>, acesso em 20/12/2017.
27. <https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-dmp-100>, acesso em 21/12/2017.
28. <http://ouronegro.com.br/tatui/>; Acesso em 21/12/2017.
29. https://www.makerbotstore.com.br/makerbot-replicator-2x?gclid=CjwKCAiA1O3RBRBHEiwAq5fD_KnUml1H7K0mmbJV-TD6Uk-q2UEgIYrs-Edld4T0KTgEYjn-L2rFfBoC3N4QAvD_BwE; Acesso em 21/12/2017
30. <https://www.eos.materialdatacenter.com/eo/standard/main/ds/0>; Acesso em 30/11/2017.
31. http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PA&MinorID=81 ; Acesso em 30/11/2017
32. https://cdn2.scrvt.com/eos/adfeb4d9abf44d80/556e2b1ec2f9/CS_M_Aerospace_Vectoflow_en_WEB.pdf; Acesso em 30/11/2017.
33. <https://www.vectoflow.de/en/products/kiel-probes/>; Acesso em 30/11/2017.

34. MOWER T.; LONG M.; **Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials**, Materials Science & Engineering A, Volume 651, pp. 198-213, 2016.
35. https://www.eos.info/press/customer_case_studies/fhc; Acesso em 30/11/2017.
36. <https://www.fh-co.com/products/microtargeting-bilateral-platform-featuring-starfix-technology>; Acesso em 30/11/2017.
37. https://www.eos.info/systems_solutions/plastic/systems_equipment/formiga_p_110; Acesso em 30/11/2017.
38. <https://www.carbon3d.com/process/>; Acesso em 30/11/2017.
39. <https://www.carbon3d.com/materials/epu-elastomeric-polyurethane/>; Acesso em 30/11/2017.
40. <https://www.carbon3d.com/stories/adidas/>; Acesso em 30/11/2017.