



COORDENADORIA DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VITOR ELIAS DOS SANTOS GABRIEL

AVALIAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO SETOR AEROSPAÇIAL

Sorocaba/SP

2021

VITOR ELIAS DOS SANTOS GABRIEL

AVALIAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO SETOR AEROESPACIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Facens como exigência parcial para obtenção do diploma de graduação em Engenharia da Mecatrônica.

Orientador: Prof. Luís Béllio

Sorocaba/SP

2021

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA “BIBLIOTECA FACENS”

RXXXi

Gabriel, Vitor Elias dos Santos.

Implantação de canteiro de obras em estrutura metálica / por Eliane da Rocha, Sandrine Garnier. – Sorocaba, SP: [s.n.], 2021.
75f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Universitário Facens – Curso de Engenharia Mecatrônica, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Luís Bélio

1. Manufatura Aditiva. 2. Aeroespacial. 3. Impressão 3D.
I. Gabriel, Vitor. II. Centro Universitário Facens.
III. Avaliação da Manufatura Aditiva no setor Aeroespacial.

CDD XXXX

VITOR ELIAS DOS SANTOS GABRIEL

AVALIAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NO SETOR AEROESPACIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Facens como exigência parcial para obtenção do diploma de graduação em Engenharia da Mecatrônica.
Orientador: Prof. Luís Bélió

Sorocaba, 23 de Novembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luís Bélió

Prof. Diego Rossi

Prof. Etiane Carvalho

AGRADECIMENTOS

Às cordas que compõe nosso universo, que nos permite aproveitar esta vida e aprender. Aos professores e parentes que me acompanharam até aqui. Aos amigos que suportaram este desatino e auxiliaram o possível para que ocorra.

“3D Printing is automation for Aerospace.”

- Tim Ellis

RESUMO

Nas últimas duas décadas houve um desenvolvimento aeroespacial em um ritmo exponencial e a manufatura aditiva é um dos grandes influenciadores. Da mesma forma, a manufatura aditiva experienciou um desenvolvimento extraordinariamente rápido a partir da década de 1990. Hoje é possível encontrar diversas tecnologias de manufatura aditiva trabalhando em uma crescente lista de materiais de polímeros, metais e cerâmicos. A manufatura aditiva é ideal para o setor aeroespacial permitindo geometrias complexas em curto espaço de tempo, gerando um progresso mais rápido nos ramos de desenvolvimento e aumentando a eficiência destes equipamentos. Detalhe já reconhecido por líderes industriais onde aplicam a manufatura aditiva diretamente no processo de desenvolvimento e produção, demonstrando um ritmo acelerado para substituição da manufatura tradicional nas peças de maior eficiência e complexidade. Este trabalho discute as dificuldades e as vantagens de se aplicar a tecnologia da impressão 3d, utilizando exemplos palpáveis, como o foguete TIGAS desenvolvido pela equipe Facens Rockets.

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Aeroespacial.

ABSTRACT

On the last decades the aerospace sector got a development in a exponential rhythm and the additive manufacturing is one of the biggest influence. In the same way, additive manufacturing got a fast development since the 1990s. Today it is possible to find many technologies such as additive manufacturing working with a growing list of materials of polymers, metals and ceramics. The additive manufacturing is ideal for the aerospace sector allowing complex geometries in a short time period, making a faster progress of development and increasing the efficiency of this equipment. A detail already recognized by the industrial leaders where the additive manufacturing is applied directly in the process of development and production, showing a fast rhythm of replacing the traditional manufacturing in parts of high efficiency and complexity. In this essay it's discussed the difficulties and advantages of applying the technology of 3d printing, using palpable examples, as the TIGAS rocket developed by the Facens Rockets team.

Key-words: Additive Manufacturing. 3D Printing. Aerospace.

論文撮要

在過去的二十年中，航空航天發展指數不斷地增長，以及附加製造業都是其主要影響的原因。同樣地，附加製造業從 1990 年代開始經歷了極其快速的發展，今日可以找到許多附加製造技術業，用於越來越多的聚合物、金屬和陶瓷材料。附加製造是航空航天領域的理想選擇，可以在短時間內製造出複雜的幾何形狀，在開發領域取得更快速的進展並提高該設備的效率。工業領導者們已認知到這一個環節之發展性，他們將附加製造直接應用於開發和生產過程，這表明將以更高的效率和複雜性，急速地取代傳統製造的零件。經由這項工作中的實例呈現出應用了 3D 打印科技的困難和優勢，例如 Facens Rockets 團隊開發的 TIGAS 火箭。

關鍵詞: 加製造. 3D 打印. 航空航天.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Infográfico funcional da tecnologia FDM/FFF.....	24
Figura 2: Processo base de sinterização de polímero por resina líquida.....	27
Figura 3: Infográfico mostrando diferenças em resolução entre diferentes tecnologias de solidificação de resina fotossensível.....	28
Figura 4: Processo de impressão por jato de polímero direto.....	31
Figura 5: Infográfico mostrando o processo das tecnologias de sinterização à laser.....	38
Figura 6: Fluxo do processo de criação de peças em cerâmica.....	40
Figura 7: Análise de um modelo 3d de preparo da projeção volumétrica.....	43
Figura 8: Análise de um modelo 3d de preparo da projeção volumétrica.....	45
Figura 9: <i>Rapid Liquid Prototyping</i>	46
Figura 10: Foguete TIGAS da equipe Facens Rockets.....	48
Figura 11: Peças impressas em poliamida: suporte para aviônica, ferramenta para montagem do motor e tubos de carga de pólvora da recuperação.....	49
Figura 12: <i>Nosecone</i> impresso em poliamida.....	51

Figura 13: Ignitores em poliamida e PETG após impressos e após utilizados.....52

Figura 14: Conjunto de suporte de motor macho e fêmea.....53

Figura 15: Infográfico de tecnologias tradicionais materiais em relação à qualidade de impressão em Durabilidade, Acabamento, Detalhamento e Aplicação.....55

Figura 16: Base da recuperação e suporte fêmea em poliamida e parte inferior do *nosecone* em PETG.....65

Figura 17: Suporte do motor após impacto.....67

Figura 18: Aletas de PLA após vôo.....69

LISTA DE SIGLAS

EPC	Equipamento de Proteção Coletivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FDMS	<i>Fused Deposition Modelling Sintering</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PEEK	<i>PolyEther Ether Ketone</i>
PETG	PoliEtileno Tereftalato modificado com Glicol
SLA	Stereolitografia
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
LINCE	Laboratório de Inovações de Engenharia
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachussets
MSLA	<i>Masked Stereolithography</i>
MMU	Multi Material Unidade
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PLA	Ácido Polilático
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
TPU	Termoplástico PoliUretano
UV	Ultra Violeta

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 O ESTADO DA ARTE.....	17
2.1.1 Os Avanços no Antigo Milênio.....	18
2.2 ANÁLISE TECNOLÓGICA.....	22
2.2.1 Tecnologias de Manufatura Aditiva.....	22
2.2.2 Tecnologias de Manufatura com Polímeros.....	22
2.2.2.1 Deposição de Material Extrusado (FDM/FFF).....	23
2.2.2.2 Fusão de Pó (SLS).....	25
2.2.2.3 Polimerização VAT (SLA).....	26
2.2.2.4 Jatos de Material (PolyJET).....	29
2.2.2.5 Jatos de Aglutinante (Binder JET).....	31
2.2.3 Tecnologias de Manufatura com Metais.....	32
2.2.3.1 Deposição Metálica Indireta (DED e WAAM).....	32
2.2.3.2 Impressão por Aglutinante (Binder JET e FDMS).....	35
2.2.3.3 Sinterização Direta (SLM e EBM).....	37
2.2.4 Tecnologias de Manufatura com Cerâmicas.....	40
2.2.4.1 Tecnologias à base de Pasta.....	41
2.2.4.2 Deposição de Material Semi-Sólido.....	42
2.2.4.3 Manufatura por pó.....	43
2.2.5 Tecnologias Multimateriais.....	44
2.2.6 Compreensão dos avanços tecnológicos.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 PESQUISAS.....	47
3.2 FOGUETE TIGAS DA EQUIPE FACENS ROCKETS.....	47
3.2.1 Sistema de Recuperação.....	49
3.2.1.1 <i>Nosecone</i>	50

3.2.1.2 Ignitores.....	51
3.2.2 Sistemas Estruturais.....	52
3.2.1.2 Aletas.....	52
3.2.1.2 Suportes Internos.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 ANÁLISE DA MANUFATURA ADITIVA METÁLICA.....	55
4.2 ANÁLISE DA MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA.....	58
4.3 ANÁLISE DAS PEÇAS DO FOGUETE TIGAS.....	64
4.4 ANÁLISE DO SETOR EM GERAL.....	69
5 CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva teve um caminho de evolução muito rápida, principalmente se lembrarmos que a primeira impressora comercialmente disponível (SLA-1 da *3DSystems*) foi lançada em 1987. Em menos de 40 anos a tecnologia já permite a humanidade construir diretamente peças de alta performance para enviar satélites, humanos e sondas ao espaço.

Identificar o inventor da manufatura aditiva é impossível, pois pode-se dizer que a humanidade trabalhou em conjunto para desenvolver esta tecnologia. Analisando historicamente, os desenvolvimentos em tecnologias que tornaram a manufatura aditiva possível começaram em 1860 com o sistema de foto escultura de François Willème, e sucessivamente com o surgimento de novas ideias e integrações das mesmas geraram o que conhecemos hoje como manufatura aditiva (Beaman, 2001).

A manufatura aditiva, inicialmente chamada apenas de prototipagem rápida, era utilizada apenas para se fazer protótipos a fim de se validar geometrias em produtos finais que seriam produzidos por processos de alta precisão ou produção em massa.

Contudo o avanço em tecnologia de materiais e novos métodos de manufatura aditiva foram desenvolvidos, e a manufatura aditiva começou a ser vista como uma das melhores alternativas no setor aeroespacial.

Hoje muitas empresas e organizações reconhecem os avanços que este setor de manufatura traz ao desenvolvimento de novas peças para se obter uma melhor eficiência e novos recordes. A tecnologia também é dita como perfeita para ser aplicada ao setor aeroespacial devido suas características inerentes.

Com isso pode-se notar o rápido desenvolvimento nos últimos anos no setor, e com o investimento e interesse crescente houve um grande aumento em pesquisas, regulamentações e implementações da tecnologia.

Saber como analisar o presente e o passado é a chave para entender o fluxo do futuro, como no setor de manufatura onde novas tecnologias vão surgindo e moldando o futuro. As tecnologias não são desenvolvidas de forma instantânea, são trabalhos contínuos da humanidade como um todo onde conceitos são assimilados para desenvolver um futuro.

Neste trabalho é explorado as tecnologias de manufatura aditiva para materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos e seu impacto no setor aeroespacial. É discorrido também sobre uma aplicação real observada no campus da Facens, utilizando peças de manufatura FDM/FFF de alta performance em poliamida de baixo custo no projeto da equipe Facens Rockets.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é discorrido brevemente sobre a história do setor de manufatura aditiva. Também é discorrido a fundo as tecnologias envolvidas na atualidade as separando em categorias

2.1 O ESTADO DA ARTE

A tecnologia sempre está em constante transformação e aprimoramento. Isso ocorre devido a constante adição de camadas de experiência e conhecimentos, sendo agregados de diversos lados, obtendo assim um produto bem maturado. Ao contrário que a maior parte da humanidade pensa sobre inventores, deles terem surgido com uma ideia revolucionária sem ter conhecimento prévio, inventores estão mais próximos dos engenheiros que dos próprios magos, onde por necessidade e conhecimento alteram o mundo à nossa volta, uma dessas ideias é a de inserir pulseiras à um relógio de bolso (WOHLERS, 2014).

Desde a década de 1980, quando iniciaram as pesquisas na chamada prototipagem rápida onde Hideo Kodama publicou sobre a tecnologia. O maior foco da indústria de manufatura aditiva estava extremamente focado com tecnologias envolvendo materiais poliméricos como SLA e FDM, logo competidores viram a possibilidade de tecnologias similares disruptoras no mercado. Então, desde a década de 1990 até hoje vemos diversas novas tecnologias surgirem e se aprimorarem cada vez mais, até mesmo de uma forma exponencial (WOHLERS, 2014).

Este setor está modificando a indústria, a Manufatura Aditiva possui diversas tecnologias para sinterizarmos uma peça, além do surgimento constante de tecnologias em impressões metálicas, cerâmicas e poliméricas, que estão se tornando mais acessíveis gradativamente. Contudo, com a constante melhoria das tecnologias e surgimento de novas, é sempre necessário analisar cada uma para definir o mais adequado para as aplicações desejadas. Nesta revisão teórica iremos abordar um pouco sobre a história da Manufatura Aditiva e comparar tecnologias e suas iterações (WOHLERS, 2014).

2.1.1 Os Avanços no Antigo Milênio

O começo da jornada dessa tecnologia fantástica é um tanto complicado e um pouco mais antigo que as pessoas pensam, porém devemos reconhecer tecnologias precedentes à impressão 3D. Tudo pode ser traçado até 1860, onde temos um conceito de foto escultura de François Willème. O estúdio de Willème contava com 24 câmeras (disposta a cada 15°), fotografando então uma silhueta de uma forma simultânea e utilizando para criar um perfil em 3D. Assim projetando a silhueta em papel e cortando as formas, após juntando todas as silhuetas em uma forma tridimensional. Sendo usada e melhorada até mesmo nos anos 1930 com a utilização de um filme contínuo (GALL, 1997).

Alguns anos depois, em 1892 Blather desenvolveu a ideia de criar mapas topológicos em 3D. Cortando chapas cera e depositando por camadas, depois alisando para criar as peças, tanto positivos como negativos. Estas foram as primeiras visões de criar objetos em 3 dimensões (Blather, 1982).

Baese (1902) no começo do século 20, aplicou uma patente com o intuito de reduzir o trabalho manual da foto escultura de Willème, Baese desenvolveu uma técnica para expor uma gelatina fotossensível que expandia em proporção com sua exposição. Já na década de 1930, Morioka Isao no Japão criou um processo híbrido entre a foto escultura e a topografia, na qual utilizava bandas de luz estruturada para criar contornos de luz do objeto, que poderiam então ser transferidas para placas para serem cortadas e empilhadas formando a imagem desejada (ISAIO, 1933).

John Otto Munz, aplicou uma patente chamada Gravação Foto-grifo, um sistema extremamente similar com os equipamentos de estereolitografia atuais. Seu sistema consistia em expor seletivamente uma foto transparente em uma emulsão de químicos para revelar seções do objeto selecionado, somando suas camadas, após o processo finalizado o objeto final deve ser esculpido manualmente para obter um objeto tridimensional (MUNZ, 1951).

Wyn Kelly Swainson, propôs um sistema para fabricar padrões em plásticos, uma polimerização tridimensional de polímeros fotossensíveis a partir da intersecção entre dois lasers (SWAISON, 1971).

Na década de 1970 tem-se diversos avanços. Pierre Ciraud, em 1971, propôs um processo que poderia criar objetos em diversos materiais pó

que sejam possíveis de derreter. Em 1972, Matsubara da empresa Mitsubishi propôs que materiais curados por luz poderiam ser utilizados em criar peças por processos topográficos, empilhando as camadas produzidas para criar-se um molde. Sua técnica foi então reconhecida por DiMatteo em 1974, que o mesmo processo poderia ser utilizado para produzir peças com características extremamente difíceis de fabricar. Em 1979 o professor Nakagawa da universidade de Tóquio começou a utilizar esta técnica para produzir ferramentas estampadas. No mesmo ano foi apresentada a primeira descrição de fabricação de sinterização em pó à laser em uma patente pelo Housholder (BEAMAN, 2001).

Na década de 1980 têm-se a história que a maior parte das pessoas conhecem, com Hideo Kodama do Instituto de Pesquisa Industrial da Cidade de Nagoya, no Japão, que publicou o primeiro papel em outubro de 1980 chamado de Display de Dados tri-dimensionais por preparação automática de modelo tri-dimensional. Em suma é um sistema de prototipagem rápida por fotopolímeros funcional, com uma lâmpada de mercúrio como fonte de luz UV e filme fotográfico preto e branco como máscara, tornando assim o primeiro equipamento de tecnologia MSLA. Em 1982, na empresa 3M, Hebert (de forma independente e paralela) descreve um sistema utilizando uma ploter XY carregando um espelho que reflete um laser UV, contudo a empresa decidiu não continuar com as pesquisas. Este sistema descrito é muito similar com os utilizados hoje em dia (WOHLERS, 2014).

No desenvolvimento do setor comercial das tecnologias temos algumas tentativas de falhas e sucessos. As photoesculturas de Willème foi um sucesso nos anos entre 1861 e 1868, provavelmente devido ao trabalho manual envolvido foi fechado. Em 1977 houve uma tentativa por Swainson, porém o projeto foi descartado antes mesmo de chegar a um estado comercial. Outra tentativa bem sucedida feita por DiMatteo em 1977 operando até 1989 com um processo similar ao de Willème porém mais digitalizado (BEAMAN, 2001).

Na saga das tecnologias baseadas em fotopolímeros, o sistema funcional mais avançado criado por Kodama foi aplicado para uma patente no Japão em 1980. Contudo o Dr. Kodama não avançou para o estágio de avaliação da patente, segundo Kodama, ele teve dificuldades em conseguir investimento para pesquisas e desenvolvimentos adicionais. Em 1984 é aplicada duas patentes, sendo uma por três engenheiros franceses Alain Le Méhauté, Olivier de Witte,

e Jean Claude André e uma outra por Yoji Marutani. Os três engenheiros preencheram a patente para o processo de esterolitografia, a tecnologia pioneira da manufatura aditiva. Porém pouco depois os engenheiros desistiram da patente afirmando “falta de perspectiva de mercado”. Em paralelo, Marutani desenvolveu e demonstrou seu processo, aplicando a patente em 23 de maio de 1984 chamada de Método de Moldagem Ótica, descrevendo sua invenção com detalhes, tendo como referências o trabalho de Kodama e Hebert. Marutani em 1987 publicou outro papel explicando que desenvolveu (3DSOURCED, 2020; WOHLERS, 2014).

Charles “Chuck” Hull preencheu a patente de esterolitografia junto com o formato de arquivo conhecido como STL e o processo de fatiamento digital. O processo, também chamado de SLA (Aparato de Estereolitografia), consistia em utilizar um laser ultravioleta para curar fotopolímeros. Entre o período de preencher e obter a patente em 1986, Chuck Hull formou a empresa 3DSystems e, em 1987, vemos a primeira impressora comercialmente vendida, chamada de SLA-1 (WOHLERS, 2014).

Logo após o lançamento, em 1988, a 3DSystems formou uma parceria com a Ciba-Geigy em desenvolvimento de resinas à base de acrilato. E a DuPont e Loctite também entram no mercado de resinas para impressoras. Em pouco tempo outras empresas e tecnologias surgiram para desafiar a SLA. Ainda no mesmo ano, Carl Deckard na Universidade do Texas preencheu uma patente para a tecnologia SLS (Sinterização Seletiva por Laser). Este processo utiliza-se de lasers para selecionar onde derreter e conseqüentemente solidificar por camadas polímeros em pó. A tecnologia foi então licenciada para o Grupo DTM (WOHLERS, 2014).

Scott Crump entrou na disputa, sendo um dos sócios fundadores da Stratasys e preencheu a patente para a tecnologia FDM, uma das tecnologias mais conhecidas hoje em dia, sendo até mesmo a tecnologia que as pessoas pensam quando ouvem sobre impressão 3d ou manufatura aditiva (WOHLERS, 2014).

A competição foi ainda mais acirrada quando o Dr. Hans Langer fundou a EOS em 1989. Dominando o mercado de impressoras de tecnologia SLS, EOS ainda foi a pioneira trazendo a tecnologia DMLS (Sinterização a Laser Direto em Metal), lançando a primeira máquina comercial DMLS em 1995. No começo da

década de 90 as empresas competiam para obter contratos de prototipagem industriais, sendo as 3 principais tecnologias baseadas em polímeros. E com novas empresas surgindo e trazendo novas aprimorações (WOHLERS, 2014).

Em 1993 o MIT desenvolveu uma nova técnica de impressão 3D baseada em impressoras de jato de tinta, adaptando essa tecnologia de 2D para 3D. E a ZCorp, nesta época, era considerada uma das gigantes, lançou sua primeira impressora, a Z402, utilizando de uma tecnologia conhecida como “Binder Jetting” (Jato de Aglutinantes), e antigamente criativamente chamado de “Zprinting” (Impressão Z), contava com “tintas” à base de água que aglutina um pó (na época eram derivados de amido e gesso). No mesmo ano vê-se ainda mais uma tecnologia emergente, Royden Sander fundou a Solidscape, e trazendo impressoras 3D de ceras. que ao contrário da maioria das tecnologias de impressoras da época que fabricavam protótipos, a Solidscape construía moldes de cera, permitindo que seja feita fundição com outros materiais, normalmente metais, tornando real a fabricação de joalheria impressa, com novas possibilidades geométricas (WOHLERS, 2014).

Em 1997 tem-se uma nova empresa trazendo impressão 3d, porém especializada em metais. A Arcam traz as máquinas EBM (Derretimento por Raios Eletrônicos), que muito similar a DMLS, contudo ao invés de utilizar fótons, usando elétrons que possuem maior inércia devido ao tamanho das moléculas, facilitando o derretimento dos metais (WOHLERS, 2014).

Enquanto em 1998, mais uma impressora baseada nas de jatos de tinta, a PolyJet, criada pela empresa Objet Geometries de Israel. Utilizando um carro portando vários cabeçotes que depositam pequenas quantidades de resinas fotossensíveis e movimentando em alta velocidade, permitindo uma impressão com vários materiais e cores, além de ser muito mais rápida, principalmente comparada na época com as SLS (WOHLERS, 2014).

No ano de 1999, a manufatura aditiva permitiu uma grande realização para humanidade e para a indústria médica. Cientistas do Instituto da Floresta Acorada para Medicina Regenerativa conseguiu criar estruturas sintéticas para auxiliar a regeneração celular dos tecidos de uma bexiga humana, que para tornar compatível com o órgão foi banhado com células do paciente (WOHLERS, 2014).

2.2 ANÁLISE TECNOLÓGICA

Realizar uma análise tecnológica completa no ramo é uma tarefa árdua, e manter atualizada, quase impossível. Isso devido à grande quantidade de novas tecnologias desenvolvidas internamente em empresas e novos métodos que estão constantemente sendo analisadas e validadas para o ramo.

Além deste fato, a engenharia de materiais neste ramo está em crescentes desenvolvimentos, tanto na questão de validação de materiais conhecidos porém fabricados por Manufatura Aditiva como materiais específicos para Manufatura Aditiva para se obter resultados anteriormente impossíveis.

2.2.1 Tecnologias de Manufatura Aditiva

Atualmente pode-se separar as tecnologias em três pilares de acordo com os materiais: polímeros, cerâmicos e metálicos. Cada um desses possui suas características específicas, tanto de acordo com a forma de fabricação e materiais. Selecionando assim naturalmente as aplicações que as peças fabricadas sobressaem.

Compreender as limitações e vantagens de cada tecnologia e dos materiais é saber aplicar adequadamente a tecnologia em qualquer setor, é de suma importância para o setor aeroespacial. A manufatura aditiva vem com o propósito de permitir novas geometrias e complexidades de peças, à uma escala pequena e de produção e aplicação rápida. Contudo, as grandes exigências do setor requerem extensos testes de validação das peças

Neste capítulo é discutido as tecnologias utilizadas, mostrando seus pontos fortes e fracos, além de ser feita uma análise sobre a mesma. Mostrando assim os pontos que devem ser levados em consideração durante o processo de escolha da tecnologia.

2.2.2 Tecnologias de Manufatura com Polímeros

Pela sua facilidade de manipulação, é fácil de entender o motivo dos primeiros processos criados (SLA, SLS, FDM, etc) foram baseados deste material.

Claro, existem vários tipos de polímeros, cada com sua característica própria o tornando adequado ou inadequado para diversas aplicações. Estas que variam de simples protótipos até peças sendo utilizadas diretamente em aeronaves.

Para desenvolver uma peça para este setor, é necessário uma complexa validação das suas características físicas, como temperaturas de transição vítreas, cristalização, dureza, densidade entre outros valores. Além da análise do material em si, é de suma importância compreender o processo, pois os mesmos alteram as características da peça, desde sua porosidade até a resistência física.

Com isso em mente, é comum em reduzir as tecnologias de manufatura com polímeros em cinco categorias, que será discorrido nos subtópicos a seguir. Mesmo que as tecnologias se entrelacem, principalmente em relação a materiais básicos, intermediários e avançados.

2.2.2.1 Deposição de material Extrusado (FDM/FFF)

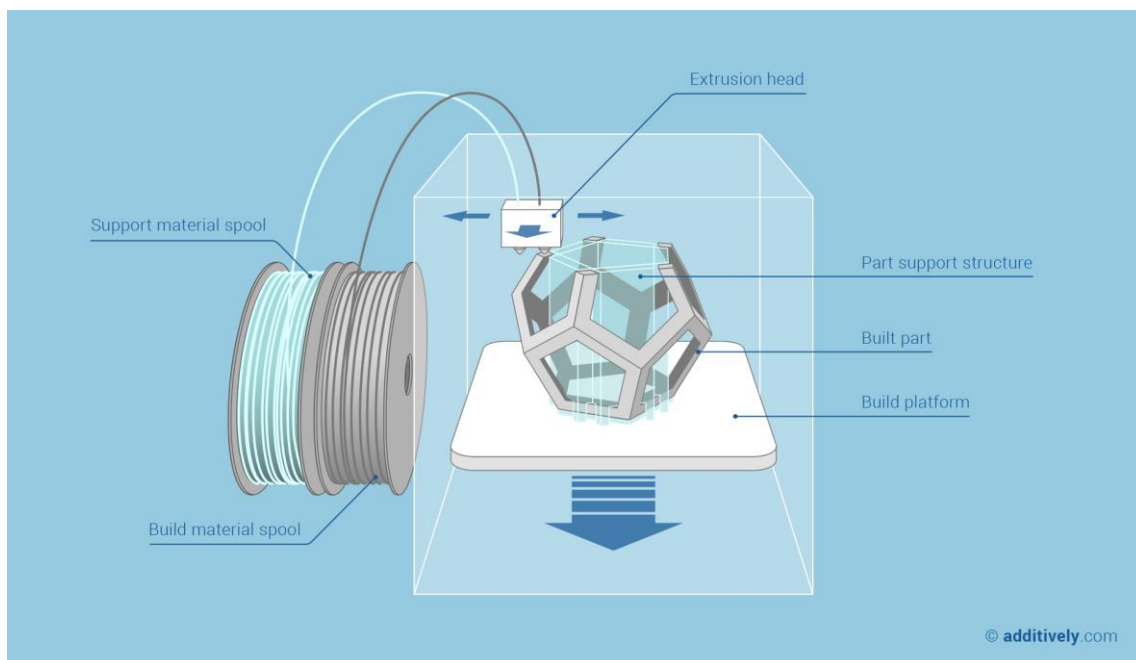
Esta denominação representa as tecnologias que utilizam um bico que deposita o material em camadas. Este material é aquecido para atingir uma consistência pastosa. Esta técnica limita consideravelmente a resistência atingida, principalmente na direção das camadas sobrepostas. Hoje para retificar isto, já possui filamentos que sua resistência entre camadas é maior quando comparado aos outros eixos, como o PCTG desenvolvido pela Essentium. Sendo assim, esta tecnologia permite impressão de baixo custo e com boa qualidade e boa velocidade, claro que estes atributos são definidos também de acordo com a complexidade da peça (CRUMP, 1989).

Representada principalmente pela tecnologia mais famosa e distribuída mundialmente devido ao seu baixo custo e adoção como complementação de diversos hobbies: FDM. Desenvolvida pela Stratasys em 1989, que patenteou a tecnologia como FDM. Por razões legais, outras empresas utilizam a nomenclatura FFF, mesmo depois da patente ter caído (CRUMP, 1989).

Esta tecnologia deriva bastante da viscosidade do material extrusado, isso controlado pela temperatura no bico e pressão inserida. A deposição também é levada em consideração, tendo como conhecimento geral (devido o limite de fluxo

para filamentos de diâmetro comum, 1.75mm, e tamanho das câmaras de derretimento) o uso de camadas de 25 a 50% do tamanho do bico utilizado. Contudo, alterando a pressão interna no bico temos alteração na espessura de saída, mesmo tendo um bico de tamanho fixo.

Figura 1 - Infográfico funcional da tecnologia FDM/FFF



Fonte: Additively.com

Aplicações tecnológicas não convencionais demandam estudos um pouco mais complexos, como extrusores de pellets ou até mesmo de ceras. Uma outra variável a ser analisada é a cristalização e contração do material após ser extrudado. Isto é extremamente significativo para os termoplásticos utilizados. Para os materiais fabricados para então serem transformados em filamentos e depois impressos é de suma importância a noção de cristalização (notavelmente importante, principalmente na família dos Polietherketones, material de alta resistência conhecido pelas grandes diferenças entre os estados cristalinos e amorfos) (CRUMP, 1989).

Com as temperaturas de extrusão dos materiais sendo acima da temperatura ambiente da aplicação e do local de fabricação, o famoso efeito de contração é de extrema importância de análise para o sucesso da impressão. As grandes diferenças de temperatura causam deformações nas peças, e devem ser vistas

junto com as características da plataforma de impressão. As deformações dependem muito do material da plataforma, a temperatura da mesa e da câmara de impressão, além do polímero sendo impresso (CRUMP, 1989).

Por ser a tecnologia mais barata, há muito estudo e conhecimento ao redor do globo, não apenas incentivando o uso, mas também melhorando a tecnologia para todos. Isso também permite que seja utilizada em projetos menores como testes, protótipos e experimentos universitários (HAJASH, 2017).

Há outras tecnologias similares em estudo, como a RLP (Rapid Liquid Printing, Impressão Líquida Rápida) desenvolvida pelo MIT onde uma agulha trafega por um gel depositando o polímero, que solidifica e toma forma. Esta tecnologia está em constante melhoria pelos criadores e continua na fase de testes e análises de aplicações. A tecnologia ainda não permite uma alta precisão, mas facilita o trabalho com polímeros tipo borracha e espumas, além de remover uma grande barreira para as impressões que é a gravidade (não considerando as tecnologias de impressão desenvolvidas para micro-gravidade como os equipamentos da Made In Space que se encontram na Estação Espacial Internacional) (HAJASH, 2017).

2.2.2.2 Fusão de pó (SLS)

Reconhecida pela alta precisão e qualidade de peças em polímeros, trabalhando principalmente com Poliamida, e também conhecida como SLS (Selective Laser Sintering). Esta tecnologia permite uma grande área de impressão, contudo a tecnologia possui um custo bastante alto. A tecnologia consiste em depositar leves camadas do polímero em pó onde um laser realiza uma rasterização, sinterizando o polímero e repetindo o processo até obter a peça (AOU-LAICHE, 2018).

Há plataformas que oferecem um custo menor, porém para atingir este objetivo é utilizado um laser de baixa potência, e para realizar a sinterização é implementado uma câmara aquecida, contudo isso traz complicações para o processo, limitando a reutilização de pó não impresso devido a degradação progressiva sobre o polímero na câmara. Por ser uma das tecnologias mais antigas há

muito suporte e conhecimento, além de muitas empresas com expertise na tecnologia, assim é possível trabalhar com diversos polímeros, novos ou não (AOULAICHE, 2018).

A qualidade das peças dependem de diversos fatores como: tipo do polímero, tamanho do grão, altura de camada, potência do laser, diâmetro do laser, velocidade de rasterização, espaçamento entre passagens, temperatura da câmara, complexidade do modelo e até mesmo a deformação do laser pelos espelhos, entre outras. Garantir uma alta qualidade de granulação é essencial (AOULAICHE, 2018).

Contudo, este é um equipamento que necessita uma estrutura de suporte grande, além de um local apropriado, com boa ventilação, filtros além de suporte elétrico para o equipamento (a maioria dos equipamentos, principalmente os industriais que são maioria, requerem uma fiação elétrica especial). Os equipamentos de EPI e EPC são de suma importância para garantir a segurança dos operadores. Devido às partículas os polímeros serem extremamente pequenas, normalmente na casa de 10 microns mínimos e 50 microns máximos, estas partículas tendem a flutuar no ar por muito tempo, sendo suscetíveis a serem contraídas por animais e humanos causando complicações, principalmente respiratórias (AOULAICHE, 2018).

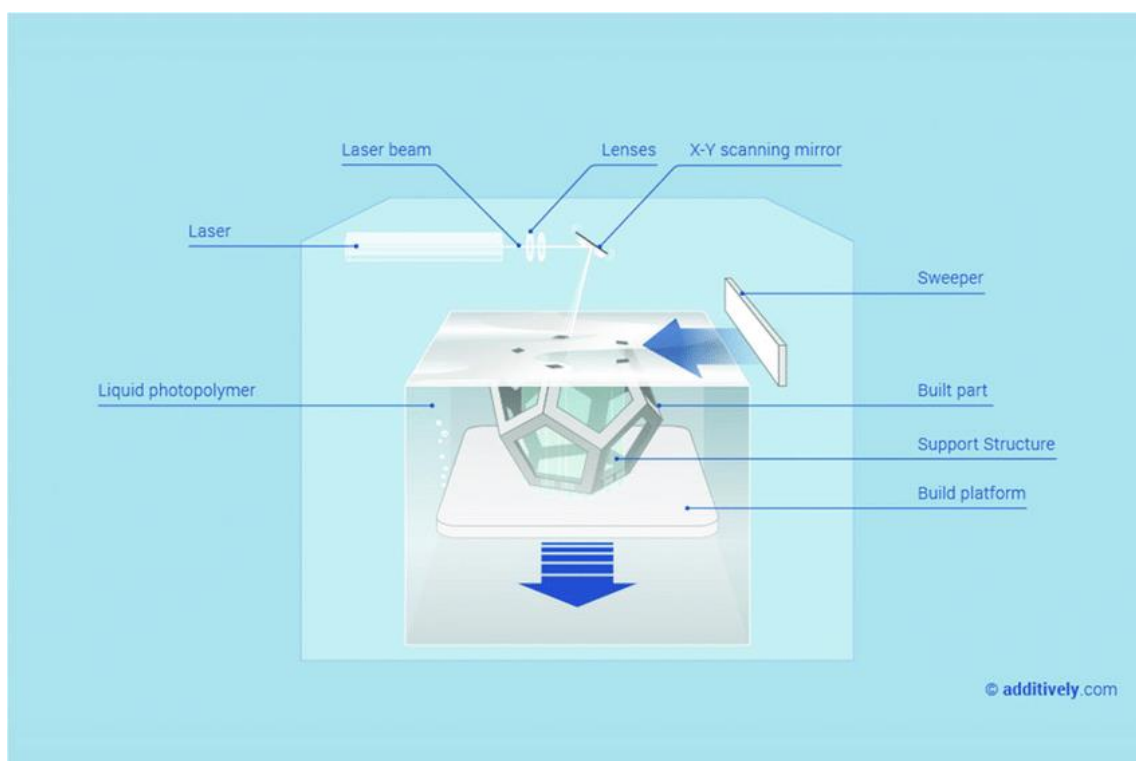
Devido ao seu processo, as peças produzidas tendem a ser isotrópicas, dependendo apenas da granulação do material e gerada internamente. Há diversos estudos sobre os efeitos das direções, tempos de sinterização, entre outros aspectos que variam na qualidade microestrutural (AOULAICHE, 2018).

A tecnologia é amplamente aplicada para modelos de alta complexidade, isso é devido a possibilidade de obter alta precisão sem precisar de suportes (pois o próprio pó não processado é utilizado como suporte), permitindo uma grande liberdade. Contudo o custo inicial do equipamento e adaptações necessárias torna extremamente difícil de ser amplamente utilizado. Há casos, como a impressora da FormLabs que propões simplificar o processo, além de outras empresas (AOULAICHE, 2018).

2.2.2.3 Polimerização em VAT (SLA)

Considerada a primeira tecnologia de impressão criada, e uma das que possui maior número de pesquisas. Podemos classificar esta tecnologia em 3rêstipos de acordo com a forma de polimerização: Laser, DLP e DLP de Estado sólido. Utilizando luz ultravioleta podemos seletivamente solidificar a resina e repetir o processo por camadas. Onde após cada camada solidificada tem-se um processo de movimentação do eixo Z, solidificando a resina que está depositada em um tanque (PAGAC, 2021).

Figura 2 - Processo base de sinterização de polímero por resina líquida



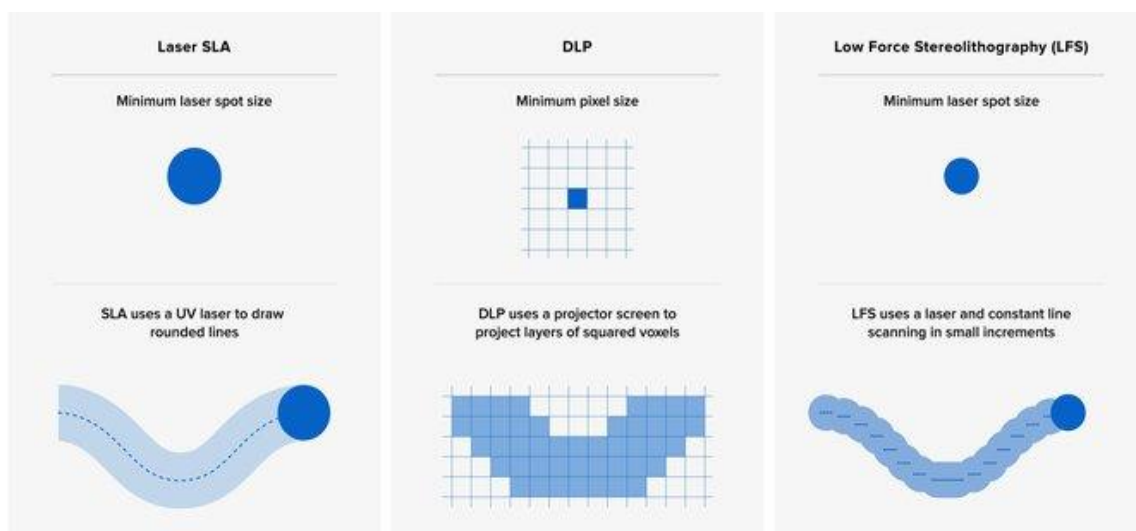
Fonte: Additively.com

A tecnologia à laser utiliza, como dito, um laser que é refletido por dois espelhos motorizados (respectivamente os eixos X e Y), devido a este fato a tecnologia não é muito boa para escalonar para equipamentos grandes, já que há uma distorção considerável quanto mais distante do centro, ovalizando a luz, deformando a peça (a não ser que exista um sistema de compensação mecânica, ou mesmo por algoritmos e *software*). É comum encontrar modelos que utilizem um laser redondo com um diâmetro de aproximadamente 0.15mm, limitando os

detalhes possíveis. Também há a questão de rasterização no processo de solidificação de grandes áreas, demandando mais tempo para manufatura das peças. O tempo de fabricação é bem mais extenso quando comparamos com outras tecnologias desta família (PAGAC, 2021).

Utilizando como base as peças de projetores, DLP utiliza a mesma tecnologia de micro-espelhos, estas que refletem a luz ultravioleta para solidificar a resina. Esta tecnologia desenvolvida depois da SLA permite impressões muito mais rápidas, pois permite solidificar uma camada inteira em apenas alguns segundos. Contudo esta tecnologia também sofre de precisão, distorcendo a luz nos pontos mais extremos. Outro ponto importante é o alto custo de manutenção dos componentes internos, além da diminuição de disponibilidade dos mesmos devido a baixa demanda por esta tecnologia, elevando os preços dos equipamentos elevando o desinteresse da tecnologia e aumentando o interesse em *masked*, devido a isso não é se encontrado facilmente equipamentos DLP (PAGAC, 2021).

Figura 3 - Infográfico mostrando diferenças em resolução entre diferentes tecnologias de solidificação de resina fotosensível



Fonte: HAJASH K., et al. Large-Scale Rapid Liquid Prototyping. 2017,

A tecnologia de Estado Sólido é a mais utilizada devido o baixo custo, sem peças móveis (além do eixo Z). Utilizando uma fonte de luz UV (geralmente LED), muitas vezes múltiplos, esta luz é bloqueada por uma máscara, esta que é uma simples tela LCD. Inicialmente estas telas foram selecionadas por ser abundante

devido ao grande mercado de celulares inteligentes e sua transição de telas LCD para OLED. Contudo com a grande demanda por equipamentos de manufatura aditiva deste tipo iniciou uma busca por processos mais rápidos, levando à implementação de telas de alta resolução monocromáticas, reduzindo o tempo de exposição por camada de dezenas de segundos para unidades (PAGAC, 2021).

Esta tecnologia conta com uma variação, patenteada pela *Carbon3D*, produzindo peças ainda mais rápidas por eliminar o processo mais demorado, a retração da mesa por camada. Quando solidificamos a resina, ela se adere a tudo que toca, devido a esse detalhe é necessário um filme de teflon para impedir que as camadas grudem excessivamente, esta que deve ser trocada constantemente devido ao seu desgaste, por isso é efetuada uma retração a cada camada solidificada. A Carbon 3D desenvolveu um sistema que ao inserir oxigênio pela base diretamente na resina, o que a faz não solidificar, permitindo uma impressão contínua, diminuindo de horas para minutos o tempo de impressão. Contudo esta tecnologia é exclusiva da empresa, tornando os equipamentos extremamente caros (TUMBLESTON, 2015).

Devido ao uso de telas LCDs, a menor resolução deriva do tamanho do pixel nas telas, (normalmente os pixels possuem um tamanho de 0.05mm por 0.05mm). Apesar dos pixels serem menores que um laser, eles criam um artifício nas peças chamado de *Voxel*. São levemente mitigados por algoritmos *anti-aliasing* ou telas com pixels menores. Algo que deve ser lembrado durante a produção de peças com muitas curvas orgânicas (PAGAC, 2021).

Esta família é uma das mais precisas e rápidas na produção de peças, permitindo fazer um grande nível de detalhes e impressão de diversas peças ao mesmo tempo (exceto as variações à laser). Uma grande limitação é sua escalabilidade, devido ao próprio processo de solidificação de resina e sua retração. Quando falamos no processo da *Carbon3D* também encontra-se um problema similar de escalabilidade, o processo de inserção de oxigênio deve ser completamente homogêneo e todo o aparato deve ser transparente para poder solidificar a resina (PAGAC, 2021).

Outras implementações permite mitigar este problema invertendo o Z, descendo a peça impressa dentro da resina que está sendo utilizada, contudo este método raramente utilizado requer uma grande quantidade de resina e apresenta muita dificuldade para o técnico e usuário de se trabalhar (PAGAC, 2021).

2.2.2.4 Jatos de material (PolyJET)

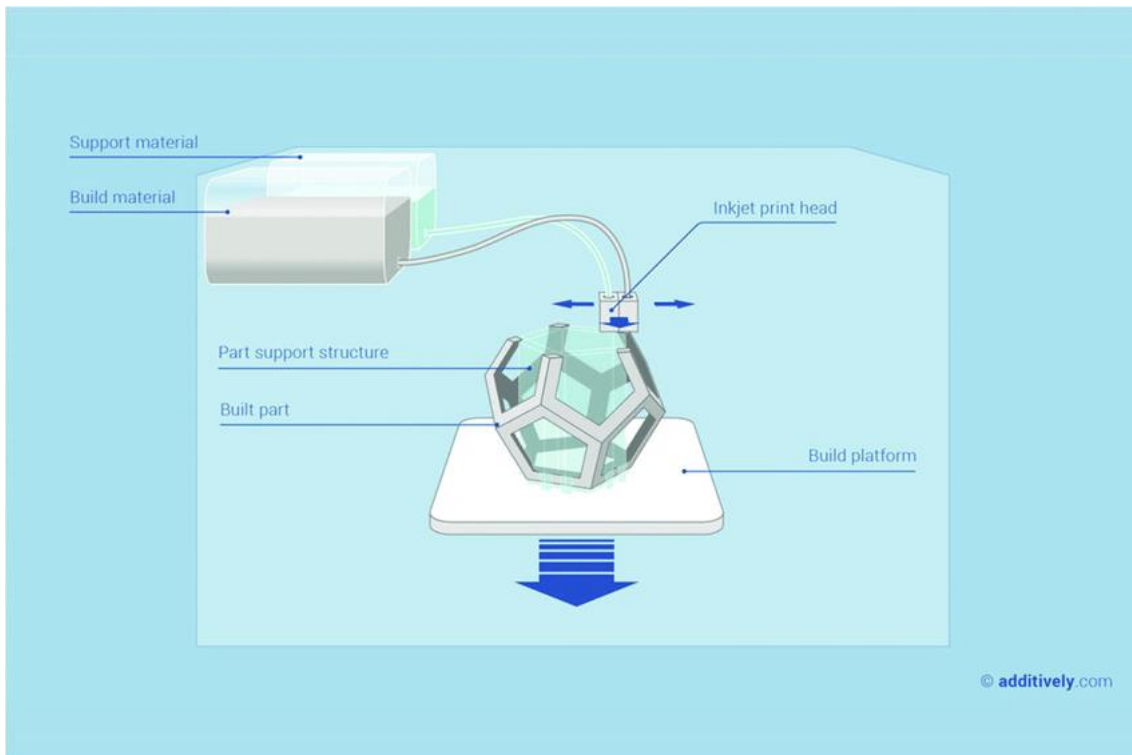
Esta tecnologia é baseada nas tradicionais impressoras de papel de jato de tinta. Contudo ao invés de utilizar corantes sua base é resina fotossensível. Existem diferentes sistemas que permitem uma maior resolução, velocidade ou até mesmo deposição de diferentes tipos de resina (CÁZON, 2013).

Um cabeçote com pequenos bicos de deposição de gotículas de resina movimenta-se em um eixo, depositando pela plataforma pequenas quantidades de resina foto sintética, o cabeçote também é equipado com luz ultravioleta para solidificar logo após a deposição. Diferentes cabeçotes podem permitir uma impressão mais rápida (como cabeçotes do comprimento da mesa, necessitando apenas uma “passada” para depositar uma camada inteira), impressões com deposição de diversas cores ou mesmo de materiais (resinas) diferentes (como resinas de suporte, elásticas e etc.) (CÁZON, 2013).

Ao contrário de impressoras MSLA, trabalhando com solidificação seletiva, a polyjet trabalha com deposição seletiva. Isso causa a sua limitação geométrica seja similar às tecnologias FDM/FFF porém com tempo de impressão menor e com maior detalhe. Por isso esta tecnologia tende a ter apenas máquinas para setores industriais, com grandes tamanhos e sistema de resina fechados pelo fabricante do equipamento (CÁZON, 2013).

O pós-processamento é pequeno devido sua alta precisão em deposição, mas não é nulo pela necessidade de suporte. Mas é um método extremamente optado para projetos de grande porte ou alta complexidade em termos de material (múltiplas cores, misturas de tipos de materiais diferentes como rígidos, suportes ou flexíveis em apenas uma peça). Contudo devido ao material utilizado (resina fotossensível) é importante fazer o processo de limpeza, pois a resina não curada é tóxica. As peças apresentam uma excelente resistência mecânica, similar às impressas por SLA devido a ligação entre camadas da tecnologia(CÁZON, 2013).

Figura 4 - Processo de impressão por jato de polímero direto



Fonte: Additively.com

2.2.2.5 Jatos de Aglutinante (BinderJET)

Extremamente parecida à tecnologia SLS, contudo sem necessidade da sinterização. Esta tecnologia utiliza uma cama de pó com um cabeçote similar ao da polyjet (como o de uma impressora de jato de tinta comum). O cabeçote possui um bico, ou em equipamentos de alto nível e industriais possuem múltiplos bicos injetores para uma velocidade maior de impressão (ZIAEE, 2019).

Os bicos despejam na camada de pó um aglutinante seletivamente., este aglutinante no setor de polímeros é comumente utilizado resina fotossensível. Esta que então é levemente solidificada por uma luz ultravioleta embutida no cabeçote. A próxima camada então segue adicionando pó para então ser depositado pequenas gotículas de polímero para realizar a aglutinação (ZIAEE, 2019).

O pós processamento apresenta as mesmas complicações assim como as outras tecnologias a base de pó. Devido ao pó ser muito fino, na casa de dezenas de microns, é nocivo se respirado. Portanto requer um equipamento EPI ou EPC para limpar a peça, retirando todo o material não utilizado, este que pode ser reaproveitado (caso o material não fora contaminado), para isso pode ser

utilizado em ambiente fechado ferramentas como pincéis, vassouras e aspiradores (ZIAEE, 2019).

As peças após serem limpas devem passar por um processo final de cura para então serem utilizadas. Peças criadas por este processo de manufatura são consideradas compósitos, e isto pode permitir uma gama de aplicações se beneficiando desta técnica. O acabamento é excelente, comparado à peças criadas em MSLA e SLS (ZIAEE, 2019).

2.2.3 Tecnologia de Manufatura com Metais

Muitas tecnologias estão sendo utilizadas ao redor do mundo para fabricação metálica, e constantemente pesquisadores desenvolvem novos métodos e empresas lançam soluções comerciais. Este é um mercado extremamente aquecido, principalmente na Europa e América do Norte com crescente consumo na Ásia. Hoje encontram-se 6 principais tipos de tecnologias de Manufatura Aditiva Metálica. Estas que podemos simplificar a classificação na metodologia de impressão e sinterização.

2.2.3.1 Deposição Metálica Direta (DED e WAAM)

Nesta categoria encontram-se as tecnologias DED e WAAM e suas variantes. A Deposição por Energia Direta (DED) é uma tecnologia de manufatura aditiva metálica com diversas funcionalidades, este processo também é chamado por *Laser Cladding* (LC), *Laser Energy Net Shaping* (LENS), ou *Laser Metal Deposition* (LMD). A tecnologia utiliza um cabeçote de formato único para poder realizar o trabalho, sendo a maior complexidade de toda a máquina. No cabeçote temos três ações ocorrendo ao mesmo tempo: pelo meio temos um laser de alta potência, nas laterais temos a alimentação do material metálico, e junto temos jatos de gás inerte para proteção do material sendo depositado. O metal é inserido no ângulo exato para ser derretido pelo laser ao encostar na peça sendo fabricada. Existem dois métodos para inserir o metal ao bico: em fio e em pó. A técnica de alimentação do metal em fio é a mais antiga, porém recentemente as

empresas têm dado preferência ao método por pó, partículas esféricas com granulções de 50 μ m à 200 μ m, devido a grande disponibilidade de materiais para outros processos de manufatura aditiva, facilidades de alimentação ao processo e facilidade de impressões bi-metálicas (comparado à alimentação por fio) (SABOORI, 2019).

Em relação à tecnologia laser utilizada, têm-se duas opções no mercado, laser à base de CO² ou Nd-YAG (Neodímio enriquecido com Ítrio Alumínio e Granada). O laser de CO² é apropriado para obter camadas grossas e altas (na ordem de vários milímetros) enquanto o ND-YAG é utilizado para criar detalhes finos com camadas menores que 1mm. Também é interessante relevar o fato da necessidade de se utilizar materiais com uma densidade energética apropriada para o processo DED, materiais com baixa energia podem oferecer deposições limitadas, enquanto alta energia obtém-se deposição metálica em excesso. Para se obter uma deposição de alta qualidade é utilizado uma cortina de gás inerte para que o material derretido depositado não reaja com a atmosfera no entorno. Este método reduz o gasto com estes gases caros, a complexidade do equipamento, porém continua sendo um material consumível para o processo de fabricação (SABOORI, 2019).

A tecnologia permite uma excelente qualidade de impressão, trabalhando com vários metais e também permitindo manufatura bi-metálica. Normalmente essas impressoras possuem diversos eixos, permitindo impressões extremamente complexas, muitas dessas trabalham de forma híbrida. É uma tecnologia de alto custo, porém preferida para peças de diversos tamanhos com alta precisão e acabamento (SABOORI, 2019).

O maior diferencial do DED é que o processo pode ser utilizado para várias tarefas, como reparo em peças metálicas, um exemplo são roscas de parafusos de grande porte, tratamentos superficiais, modificações em peças, etc. Um grande exemplo são peças que após impressas em SLM, podem ganhar detalhes com a DED, estes que podem trazer diversos benefícios as peças (SABOORI, 2019).

Esta tecnologia é uma das mais custosas, tanto pelo custo do equipamento, como consumíveis, porém, como visto, é a tecnologia de manufatura aditiva metálica mais versátil, complementando diversos setores de produção, se destacando na aeroespacial (SABOORI, 2019).

Manufatura Aditiva por Fio e Arco (*Wire Arc Additive Manufacturing*) é uma tecnologia que chama muita atenção principalmente no setor industrial, pela possibilidade de criar peças grandes com uma grande estabilidade e fluxo de deposição de material, com um custo relativamente baixo e melhor ambientalmente aceito. Esta tecnologia permite criar peças em diversos materiais para engenharia, como titânio, alumínio, níquel e aço, e permitindo uma redução em tempo de fabricação em torno de 40% à 60%, diminuindo também o tempo de acabamento por aproximadamente 20% e já existem exemplos em uso (como o conjunto do trem de pouso de um avião) de redução em 78% de material comparado à Manufatura Subtrativa tradicional. Contudo devido o rápido desenvolvimento e pesquisa nos últimos anos existem diferentes nomenclaturas pelo mundo todo (WU, 2018).

Pode-se classificar a tecnologia WAAM em três principais processos de acordo com a sua fonte de calor, como: GMAW (Solda de Arco por Gás e Metal), GTAW (Solda de Arco por Gás e Tungstênio) e PAW (Solda de Arco de Plasma). Esta classificação generaliza as diferenças para uma maior compreensão e análise em escolhas. O processo GMAW possui um fluxo de deposição de aproximadamente 2 a 3 vezes maior que as outras (sem contar o processo Tandem duplica novamente este valor e permite uma maior facilidade em se misturar materiais), contudo é bem menos estável, liberando gases indesejados e depende de eletrodos consumíveis. Enquanto o processo GTAW, não precisa de eletrodos e possui uma alimentação do fio metálico separado. E o PAW, por utilizar plasma também não requer um eletrodo e utiliza um sistema de alimentação do fio separado. Os processos PAW e GTAW precisam de um sistema de rotação de fio e da tocha (WU, 2018).

Sistemas da tecnologia WAAM costumam utilizar braços robóticos industriais como sistema de posicionamento do cabeçote com dois estilos de câmaras, sendo um cheio de gás inerte (como os sistemas SLM e DMLS) para proteger o metal sendo derretido e depositado, O segundo estilo utiliza de mecanismos especialmente desenhados para proteção aos gases localmente (WU, 2018).

Os processos WAAM são tradicionalmente utilizados para peças com dimensões trabalhadas em metros, por isso precisam de uma instalação especial, tanto devido ao espaço necessário para o equipamento completo como na rede elétrica. É muito comum esses equipamentos trabalharem com uma grande gama

de metais, e novas tecnologias surgem constantemente para permitir impressões com mais de um material ou até mesmo mais eixos de movimentação. Devido a isso as peças produzidas tem um custo menor comparada à tecnologias de SLM e DMLS, porém não permite a mesma precisão e complexidade geométrica, tendo sua vantagem na sua proporção permitindo impressões de grande porte em velocidades consideráveis (WU, 2018).

2.2.3.2 Impressão com Aglutinante (Binder JET e FDMS)

Tecnologias deste tipo são comuns para produção de baixo custo, fazendo um dos mercados mais aquecidos para peças exclusivas metálicas, utilizando principalmente MBJ e FDMS. *Metal Binder Jet* (Jato aglutinante de Metal) é uma excelente alternativa para impressão à base de pó com excelente precisão porém tornando bem acessível (se comparado a EBM e SLM/DMLS). O sistema consiste em um cabeçote com um bico ou conjunto de bicos que depositam um aglutinante, este sendo um polímero ou cera, em uma fina camada de pó metálico que é depositada em um compartimento, e repetindo o processo por todas as camadas necessárias obtêm-se a peça “verde”. Com a peça verde tem-se duas opções de obter uma peça 100% metálica: o método de infiltração e fusão (LIU, 2020).

Através do método de fusão, a peça é inserida em um forno para fazer o processo da retirada do aglutinante e após a sinterização propriamente dita. Este processo, contudo, diminui as peças em aproximadamente 20%, necessitando um operador habilidoso para lidar com o processo com intuito de ter uma alta precisão (assim como as outras tecnologias que utilizam deste método). O método de infiltração é separado em duas partes, sendo a primeira remover totalmente o aglutinante gerando a peça “marrom” através de um processo de lavagem. A peça “marrom” possui uma porosidade interna de aproximadamente 70%. Após todo o aglutinante ser retirado, o “marrom” é inserido em um forno industrial junto com um outro metal de baixo ponto de fusão (como bronze), permitindo que este preencha totalmente a porosidade da peça. Este método permite uma grande precisão a um baixo custo, contudo se torna uma peça bi-metálica, que deve ser bem analisada para ser utilizada em alguns casos de aplicações (LIU, 2020).

Em geral a tecnologia MBJ permite uma construção rápida de peças (principalmente considerando modelos de equipamentos com múltiplos cabeçotes de jatos de aglutinante), com pouca ou nenhuma necessidade de suportes e permitindo peças extremamente complexas a serem criadas, a um custo baixo de peças pois o processo de impressão é feito a temperatura ambiente, sem necessidade de uma câmara inerte, utilizando fornos industriais comuns. Contudo, a tecnologia demonstra limitações onde pode ser indesejada, como precisão dimensional inconsistente ao necessitar de uma peça de um único material, enquanto o pós-processamento de obter uma peça de alta precisão pode não ter as características físicas desejadas por ser bi-metálica. (LIU, 2020)

A tecnologia conhecida como Fused Deposition Modelling and Sintering (Modelagem por Deposição Fundida com Sinterização), comparado com outras técnicas de manufatura aditiva metálicas possui muitas vantagens e desvantagens. FDMS é um sistema bem mais barato e com uma menor energia gasta por peça, porém com limitações dimensionais (LIU, 2020).

Contudo, o processo de criação das peças metálicas é complexo, exigindo um maior cuidado e atenção. Da mesma forma que o popular processo de fabricação de peças poliméricas, onde temos um bico aquecido e um filamento plástico é empurrado, derretendo o material e formando uma pressão internamente, onde o material derretido é então depositado em uma mesa através de movimentos computadorizados montando a peça desejada. O material depositado na mesa de construção é refrigerado e solidificado e todo o processo é repetido, depositando o material em camadas até finalizar o modelo (LIU, 2020).

O diferencial entre os sistemas poliméricos e metálicos é o material. O filamento utilizado em FDMS é um polímero extremamente carregado em minúsculas partículas de metal, um dos metais mais utilizados possui uma carga de 88% do peso do filamento de aço inoxidável 316L, onde os grânulos possuem algo entre 30 à 50 μm em uma matriz de polímeros, comumente uma mistura de Polipropileno (PP), Polifomaldeído (POM) entre outros polímeros para permitir uma grande fluidez do material pelo bico. Este material permite imprimir a temperaturas abaixo de 250°C (claro que pode haver diferenças de acordo com o fabricante do filamento (LIU, 2020).

O sistema possui três fases, a criação da peça “Verde”, a peça “Marrom”, por último temos a peça metálica final. Para obter a peça verde precisamos imprimir o filamento carregado. Este então é posto em um forno chamado de “*De-binder*” este irá cozinhar a peça verde à 120°C por 8 horas sobre um alto fluxo de nitrogênio (1 L/h) para retirar todo o polímero da peça, formando então a peça marrom. A peça marrom deve ser então passada para o processo de fusão, primeiro removendo o restante do polímero à 600°C por 2 horas e então sinterizando à 1360°C por 2 horas em um forno com proteção de gás argônio (LIU, 2020).

Finalizando o processo temos uma peça metálica, porém em um tamanho levemente reduzido. A manufatura aditiva metálica por FDMS permite criação de peças por um baixo consumo de energia e tempo, porém um pós processamento delicado e com uma grande imprecisão dimensional devido a retirada do material aglomerante das partículas. Além de sua microestrutura apresentar poros, que para muitas peças são indesejadas (LIU, 2020).

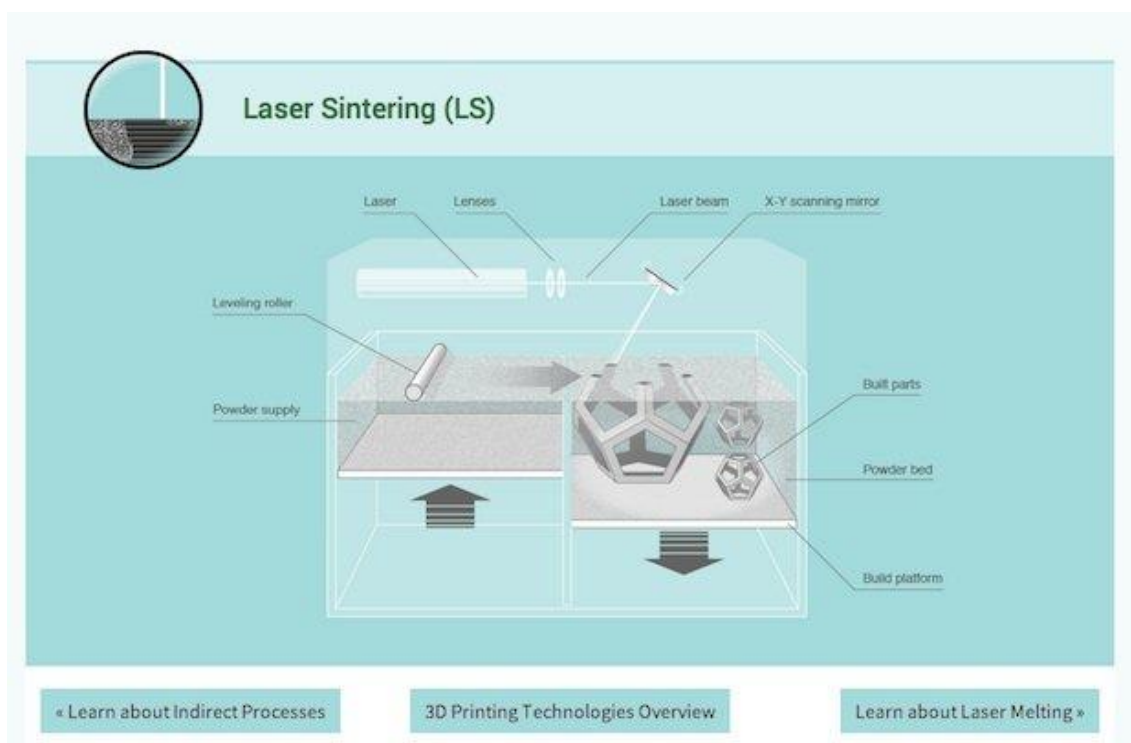
2.2.3.3 Sinterização Direta (SLM e EBM)

As tecnologias de Sinterização Direta (como SLM/DMLS e EBM) são as primeiras que profissionais da área pensam quando falado sobre Manufatura Aditiva Metálica. Por ser as tecnologias mais antigas do segmento existe muita pesquisa e desenvolvimento sobre, contudo, muita pesquisa ainda é necessária. Devido a natureza do método de impressão, da mesma forma que as tecnologias de Deposição Metálica Direta, o conhecimento dos materiais e como são afetados ainda é escasso e necessita de um crescente investimento de pesquisas e desenvolvimento principalmente em engenharia de materiais (BADIRU, 2017).

Essas duas tecnologias (Direct Metal Laser Sintering, Sinterização Metálica Direta à Laser, e *Selectiver Laser Melting*, Fusão por Seleção à Laser) foram desenvolvidas em paralelo na Alemanha, e suas características são bem similares. A maior diferença entre as duas tecnologias é a forma em que o metal é tratado para ser feita a sua sinterização. O processo consiste em uma cama de pó metálico ou até mesmo ligas (como Alumínio com Poliamida) em uma câmara controlada onde possui um fluxo constante de gás inerte (comumente utilizado o Argônio) e um laser de alta potência para seletivamente derreter o pó metálico e

o fundindo no formato da peça desejado, repetindo por várias camadas de pó metálico depositadas. A maior diferença é que enquanto a DMLS utiliza um laser de alta potência, o suficiente para derreter o metal ao ser atingido mesmo este estando em temperatura ambiente, a SLM aquece o pó metálico à uma temperatura próxima do ponto de fusão do material e utilizando um laser para finalizar sua fusão seletivamente. Isso faz com que a SLM gaste muito mais energia, porém à um custo menor devido o laser (sua peça mais cara) ser a peça mais cara da máquina (BADIRU, 2017).

Figura 5 - Infográfico mostrando o processo das tecnologias de sinterização à laser



Fonte: HAJASH K., et al. Large-Scale Rapid Liquid Prototyping. 2017,

O processo de fabricação de peças por DMLS e SLM são muito lentos, porém existem máquinas que permitem acelerar o processo adicionando lasers (muitos modelos possuem até 4 lasers), que é excelente para fabricação de grandes quantidades de peças. Esta tecnologia de fabricação metálica por manufatura aditiva é uma das mais caras por máquinas, insumos, ineficientes (em relação energia por peça) e necessitam de uma instalação dedicada. Os insumos necessários pela SLM/DMLS consistem em refill de argônio e como material de

construção pó metálico. O pó metálico não utilizado pode ser facilmente reciclado, porém é necessário EPCs (Equipamentos de proteção coletivo) e EPIs (equipamentos de proteção individual) para ser trabalhado fora da câmara de construção da impressora (FRAZIER, 2014).

A vantagem das peças serem criadas dessa forma é a uniformidade dos fatores mecânicos em todas as direções (isometria) e geometrias extremamente complexas com mínima ou nenhuma necessidade de suporte. Contudo é importante notar que as peças são sempre totalmente sólidas, claro que isso pode ser facilmente contornado por um modelador experiente (criando no modelo estruturas internas e furos para retirar o pó preso internamente), permitindo peças mais eficientes em custo e peso (FRAZIER, 2014).

Sua microestrutura é um tópico extremamente estudado atualmente pela comunidade científica, pois há diversas variações entre materiais e métodos de impressão que afetam a micro estrutura metálica interna e externa (FRAZIER, 2014).

Muito similar às tecnologias de SLM e DMLS, a Fundição por um Raio de Elétrons (Electron Beam Melting). Esta tecnologia utiliza um grande canhão de elétrons que ao passar próximo por defletores permite uma rasterização de uma “imagem” em duas dimensões, este método é muito similar aos antigos televisores de tubo, alíás é exatamente a mesma tecnologia, porém com um canhão de elétrons muito mais potente (LUTZMANN, 2010).

EBM é uma tecnologia com alta velocidade de produção e utilizada comumente para peças de aviação ou médicas. O processo utiliza-se de uma câmara aquecida e à vácuo. Uma grande diferença comparada com a DMLS e SLM é a penetração dos raios de elétrons no material irradiado, sendo muito maior, devido a grande quantidade de colisões dos elétrons com o metal em pó para transferir a energia cinética em energia térmica (vibração das moléculas). Devido as implicâncias do método em si há dois casos comuns em sistemas não calibrados corretamente, como a delaminação e formação de bolotas de metal (parecida com a do processo de soldagem) (LUTZMANN, 2010).

Um sistema completo da tecnologia EBM também requer todos os cuidados como as SLM e DMLS, devido o seu alto consumo energético, utilização de material em pó (nocivo ao sistema respiratório de seres vivos) e necessidade

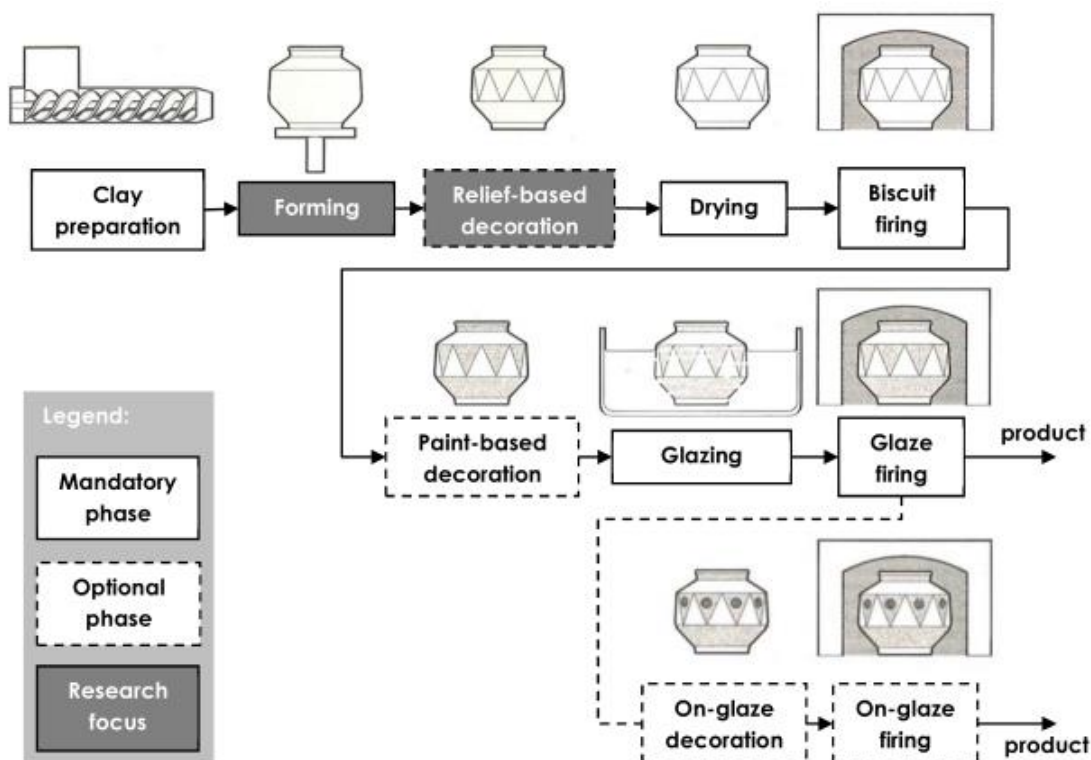
de gases específicos para o seu uso (como Argônio, Hélio e Nitrogênio que possuem diferentes efeitos em diferentes materiais).

Contudo, junto com os sistemas a laser de fundição a pó, a tecnologia oferece peças de extrema qualidade sendo já utilizada em setores renomados e com constantes testes para certificação. Com um custo elevado, junto com as tecnologias de fundição de pó à laser, são os equipamentos que oferecem a maior precisão com uma velocidade de fabricação alto, permitindo criar diversas peças em uma impressão (LUTZMANN, 2010).

2.2.4 Tecnologias de Manufatura Cerâmica

Tradicionalmente, peças cerâmicas são produzidas por pó com aditivos em técnicas de fundição, injeção e etc. Estas que estão bem difundidas em produção em massa como cerâmica do nosso dia a dia comum, como pode ser vista na figura 6. Muito desejadas por suas propriedades como estabilidade mecânica, térmica, química, óptica, elétrica e até mesmo magnética. Devido a estes fatores este material é muito desejado em diversos setores. Contudo uma desvantagem que eles possuem é sua alta dureza e, como consequência, fragilidade, que dificulta a produção dos mesmos em geometrias complexas, requerindo uma grande experiência em usinagem para conseguir uma geometria mais avançada, dependendo do material, além do acabamento superficial (muito importante para algumas aplicações) ser a maior dificuldade com técnicas do tipo (CHEN, 2018).

Figura 6 - Fluxo do processo de criação de peças em cerâmica



Fonte: COSTA, Eduardo Castro e; DUARTE, José Pinto; BÁRTOLO, Paulo. A Review of Additive Manufacturing for Ceramic Production. 2017. Rapid Prototyping Journal.

Fora do método tradicional, a manufatura aditiva oferece a substituição de alguns passos dependendo da tecnologia aplicada, estas que podemos separar em 3 grandes categorias: a base de pasta, a base de pó e semi-sólido. Sendo as tecnologias a base de pasta por deposição direta (como impressoras de concreto), resina fotossensíveis com carga cerâmica, Binder JET, a base de pó encontramos *Selective Laser* e *Laser Melting* e semi-sólidos é utilizado as tecnologias LOM e FDM. Todas as tecnologias, exceto por sinterização direta, requerem a queima de seu aglutinante para realizar a sinterização. Esta queima, dependendo da proporção utilizada, é responsável tanto pela porcentagem de contração como de porosidade do material. (CHEN, 2018; COSTA, 2020; M.K., 2017).

2.2.4.1 Tecnologias à base de Pasta

Nesta definição encontramos três grandes tecnologias Binder Jet, Deposição por pasta e resina fotossensível. Uma característica destas tecnologias é a necessidade da queima do material aglutinador para realizar a sinterização. Contudo alguns casos, como deposição direta, não requerem este processo, como

impressoras de cimento, no qual utilizam água e que ao serem impressas podem iniciar uma reação exotérmica. Contudo, breve poderemos encontrar sistemas parecidos com da canadense Rapidia onde se faz uma extrusão de pasta com metal à base de água para obter peças de precisão similar à impressão FDM/FFF, utilizando por exemplo para imprimir zircônia (CHEN, 2018; COSTA, 2020).

Impressão com resinas fotosensíveis carregadas com partículas de cerâmica é um pouco mais complexo o fluxo de impressão. A impressão em VAT, mesmo sendo a mais barata, possui muitas dificuldades pela natureza própria do processo ao se adicionar qualquer partícula extra (seja gliter, metal ou cerâmica) a separação das camadas do VAT complica principalmente quando há uma maior porcentagem de carga, para isso, equipamentos que permitem uma certa agitação da resina possuem uma melhor eficiência no processo de impressão. A qualidade final depende muito da qualidade dos materiais, porcentagem de cerâmica na peça e o processo de queima e sinterização. A peça tende a diminuir de tamanho durante este processo, o que pode acarretar em imperfeições dimensionais, além de gerar uma peça de alta porosidade (CHEN, 2018; COSTA, 2020).

2.2.4.2 Deposição de Material Semi-Sólido

Quando é pensado em tecnologias dessa categoria temos a LOM (*Laminated Object Manufacturing*) e a famosa FDM/FFF. Na tecnologia LOM temos as chapas de cerâmica verde pronta, comumente zircônia, alumina e variações, onde continuamente é empilhada e cortada. O material extra é separado e usado para formar uma nova chapa de cerâmica verde, e a peça é levada para queimar o aglutinante e sinterizada em um forno. Assim como a tecnologia binder e as de pó, é necessário uma grande quantidade de material extra para a impressão. A definição de altura das camadas é definida pelas chapas usadas do material (CHEN, 2018).

Quando falamos de impressão cerâmica por FDM significa utilizar o mesmo método da FDMS, ou seja, usando um filamento com carga de cerâmica, conhecido como FDC (*Fused Deposition Ceramic*), comumente com até 60% de carga cerâmica no filamento (que também é utilizado normalmente o PLA devido ao sua baixa temperatura de queima, facilitando o processo de *debinder*. Fatores

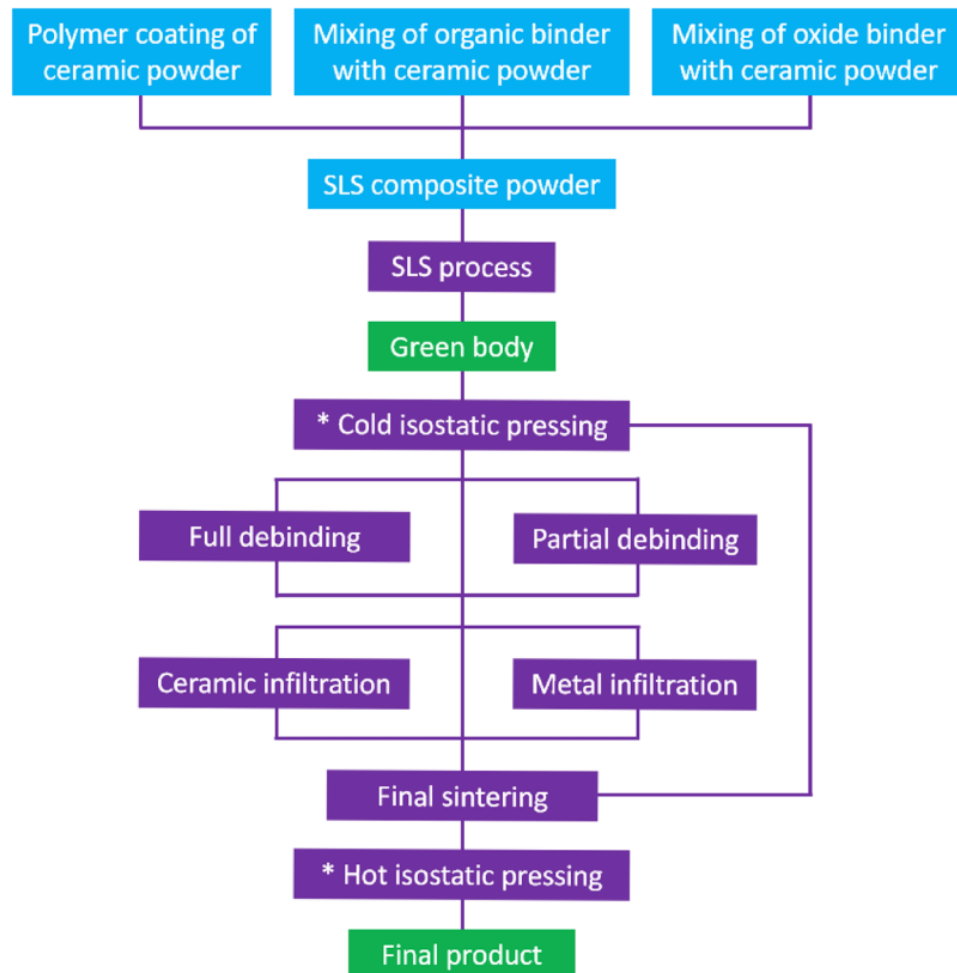
que influenciam altamente na peça final é a dispersão das partículas e sua granulatura (CHEN, 2018).

2.2.4.3 Manufatura por pó

A tecnologia Binder Jet com cerâmica é extremamente similar ao trabalhada com metal, requerindo a sinterização, assim como a citada acima. Seu maior diferencial é o tamanho das peças que podem ser produzidas e também a necessidade de pó extra ao que será impresso volumetricamente de acordo com sua cama de impressão pela altura da peça. Outro ponto interessante de utilizar a tecnologia é não trabalhar com a peça final, permitindo impressão de moldes cerâmicos de maior facilidade podendo utilizar até mesmo areia (CHEN, 2018).

Também é possível trabalhar com SLS. Contudo, como é característico das cerâmicas, seu ponto de fundição é extremamente alto, portanto para trabalhar com alumina, por exemplo, é adicionado óxido de boro ou fosfato de amônia como elementos secundários de menor ponto de fundição agindo como agente aglutinante. Este método então permite uma grande definição de detalhes em pequenas peças, porém grande porosidade e redução dimensional. Por isso é comum encontrar este processo utilizando combinações de polímeros para aumentar a densidade da peça. Utilizando um compósito de alumina com poliamida é possível atingir uma densidade teórica de 94% com este processo. O processo todo pode ser compreendido no fluxograma abaixo (CHEN, 2018).

Figura 7 - Análise de um modelo 3d de preparo da projeção volumétrica



Fonte: **3D printing ceramics: a review**. 2018. Additive Manufacturing Institute. Universidade de ShenZhen.

SLM (*Selective Laser Melting*) ou LM (*Laser Melting*) é a única tecnologia que permite impressão direta de cerâmica. Inicialmente desenvolvida para materiais metálicos, com o avanço da tecnologia, suas capacidades foram estendidas para trabalhar com cerâmica. Estas peças produzidas possuem baixa porosidade, alta precisão porém, devido o processo de fusão, é possível encontrar rachaduras, poros de acordo com a complexidade do modelo é configuração do equipamento. Isto ocorre com a grande diferença de temperatura entre a camada onde está sendo aplicado laser e as camadas já solidificadas. A diferença de temperatura pode afetar a manufatura completamente (CHEN, 2018).

No momento em que este documento é escrito, não há tecnologias comerciais do tipo DED para cerâmica (COSTA, 2020).

2.2.5 Tecnologias Multimateriais

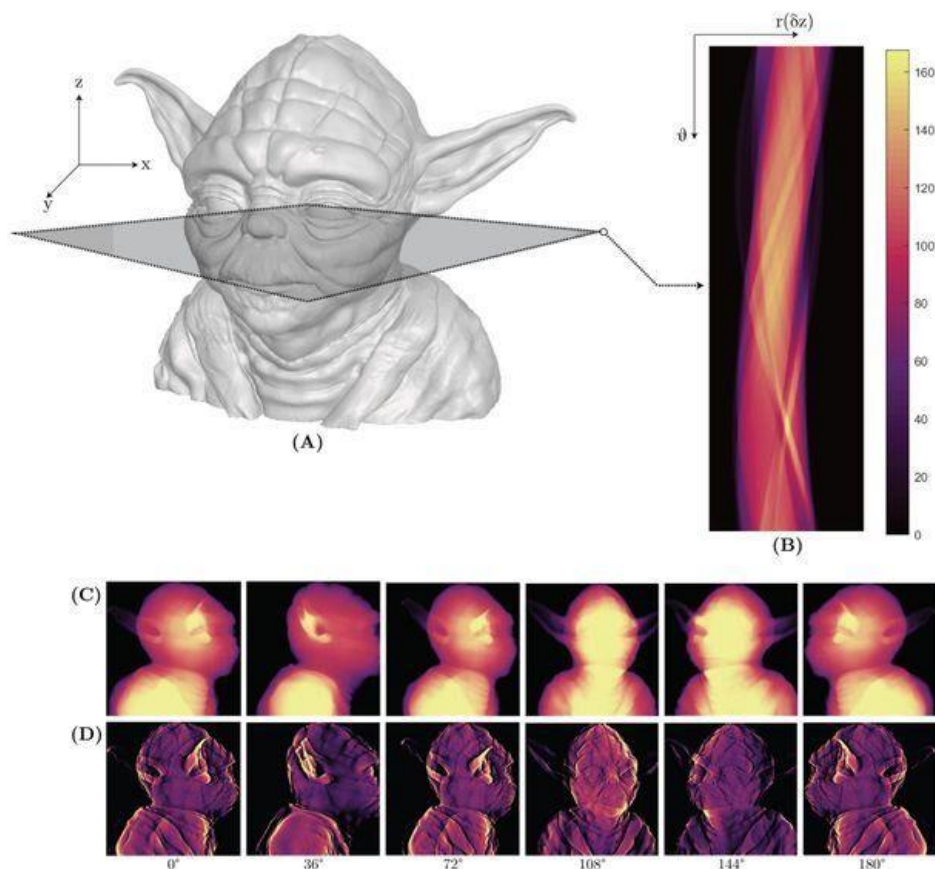
Este é um tópico que está lentamente sendo explorado com novos equipamentos e é um grande segmento da manufatura aditiva que permitirá grandes avanços tecnológicos (WOHLERS, 2014).

Muitos equipamentos FDM/FFF de baixo custo já permitem o trabalho com 2 ou mais filamentos em uma única peça. Mostrando como inovações em peças que requerem características diferentes em seguimentos criando, fielmente, peças únicas (WOHLERS, 2014).

2.2.6 Compreensão dos avanços tecnológicos

Há tecnologias que são verdadeiramente pontos fora da curva como impressão volumétrica que possui várias equipes trabalhando em diversas formas de aproximação. Impressão volumétrica possui uma beleza verdadeiramente de ficção científica, apesar de sua alta complexidade. Solidificar resina polimérica fotosensível em um pequeno compartimento por bombardeio de fótons requer muito conhecimento de material e controle sobre como vemos na figura 8. A área de poder computacional para este tipo de tecnologia é de suma importância. Realizar cálculos de densidade energética no local onde está sendo aplicada sobre a resina para formar os objetos. Outro ponto é a composição da resina, sendo necessário adicionar oxigênio (assim como os equipamentos da *Carbon3D*), para desacelerar o processo de solidificação para permitir a peça “ser criada do nada”. Isso nos diz a importância de engenharia de materiais neste segmento (STEVENSON, 2020).

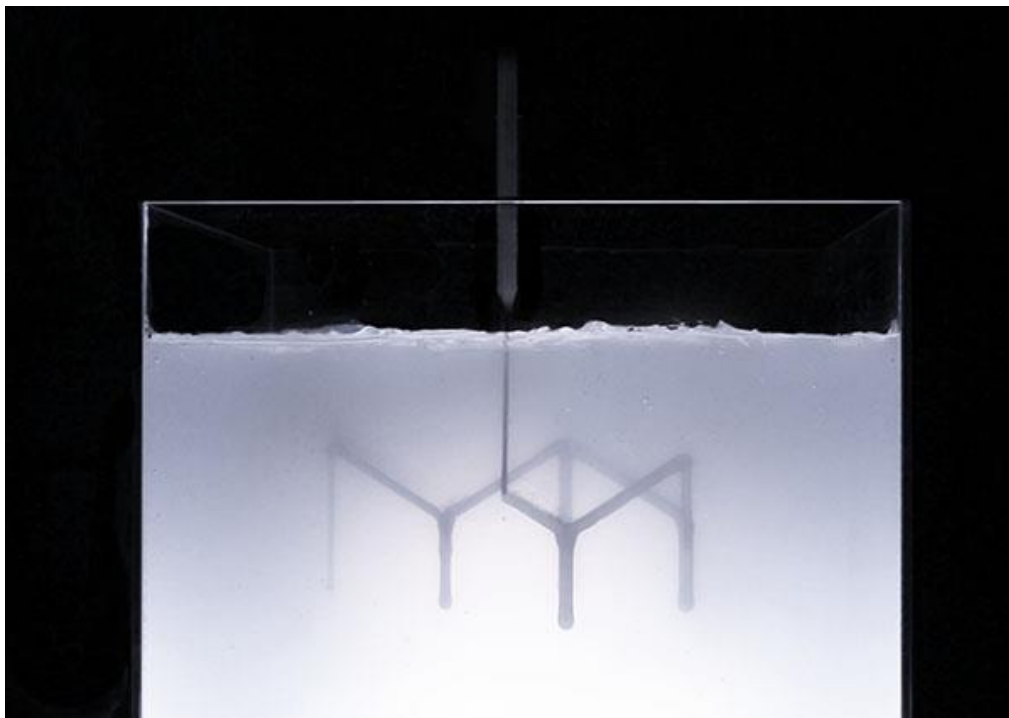
Figura 8 - Análise de um modelo 3d de preparo da projeção volumétrica



Fonte: STEVENSON, Kerry. Volumetric 3D Printing Is Far More Complex Than You Imagine. 2020. Disponível em: fabaloo.com. Acesso em 25 de outubro de 2021.

Uma tecnologia revolucionária na área de extrusão de polímero que deve ser citada neste documento é Impressão Líquida Rápida (Rapid Liquid Printing), desenvolvida pelo laboratório "Self Assembly" do MIT. onde uma grande agulha deposita um polímero em um banho de gel como mostrado na figura abaixo, este que mantém o polímero em posição até solidificar para depois ser retirado e limpo. A chave desta tecnologia é o direcionamento da agulha, sua velocidade e fluxo de injeção (HAJASH, 2017).

Figura 9 - *Rapid liquid Prototyping*



Fonte: HAJASH K., et al. Large-Scale Rapid Liquid Prototyping. 2017, MIT Self Assembly Lab.

2.2.7

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A tecnologia sempre está em constante transformação e aprimoramento. Isso ocorre devido a constante adição de camadas de experiência e mesmo utilizando tecnologias simples, desenvolvimento de peças para o setor aeroespacial é um pouco mais complexo que impressão de chocolate, essa que sucesso ou falha de impressão é a definição de estar apresentável ou não.

Entretanto, neste trabalho está se focando nas aplicações da Manufatura Aditiva no setor Aeroespacial. Por isso deve-se compreender o processo. Neste capítulo é explorado as formas utilizadas na pesquisa do conteúdo escrito no capítulo de revisão bibliográfica

3.1 PESQUISAS

O ponto mais importante do trabalho de um especialista no setor é o conhecimento, não apenas do saber definitivo, mas também de como pesquisar. No capítulo de Revisão bibliográfica encontramos uma extensa explicação sobre as tecnologias atuais, identificando seus pontos fortes e fracos de cada característica geral (diferenças entre equipamentos é algo que deve ser aprofundada somente se definido a tecnologia geral). Para a construção do mesmo, foi utilizado o conhecimento do autor adquirido ao longo dos anos de seus constantes estudos na área (desde 2017). Contudo grande parte desde conhecimento veio de artigos nas revistas *TCTMagazine*, *3DNatives*, *All3DP*, *3D Printing Industry*, *3D Print dot com*, *Additively*, *Wohlers* além de blogs pessoais de profissionais da área. Após encontrado estas informações, relativamente superficiais dependendo da fonte, é efetuado um aprofundamento direto nos artigos científicos publicados.

3.2 FOGUETE TIGAS DO FACENS ROCKETS

Colocando o conhecimento em prática. A equipe facens rockets é pioneira na região com o trabalho de foguetes experimentais. trazendo a especialidade de trabalho com compósitos do LINCE. Contudo, desde o início da equipe em 2019, a manufatura aditiva já era explorada em estados iniciais, mas sem

estudo e conhecimento da tecnologia em si. Neste trabalho é explorado as futuras iterações onde recentemente o trabalho de manufatura aditiva na equipe foi elevado em várias partes, como é possível observar no exemplo da figura 10. Estas peças foram desenvolvidas com sistemas de impressão FDM de baixo custo (Impressora Biqu B1 modificado com o *hotend* E3D V6 original, *firmware* customizado baseado em *Marlin*, extrusor duplo e tubo de *Teflon Capricorn* de alta qualidade), com uma pequena variedade de bicos (0.3, 0.4, 0.5 e 0.6 milímetros). Em relação ao material utilizado na impressão foram selecionados a poliamida (*Nylon*) da *Conex tools* e filamentos PETG da 3D Fila e Cliever. Desenhadas utilizando os softwares CREO Parametric e SolidWorks. Para controle dos equipamentos, é gerado o código através do fatiador open-source PrusaSlicer configurado adequadamente para a impressora utilizada.

Figura 10 - Foguete TIGAS da equipe Facens Rockets



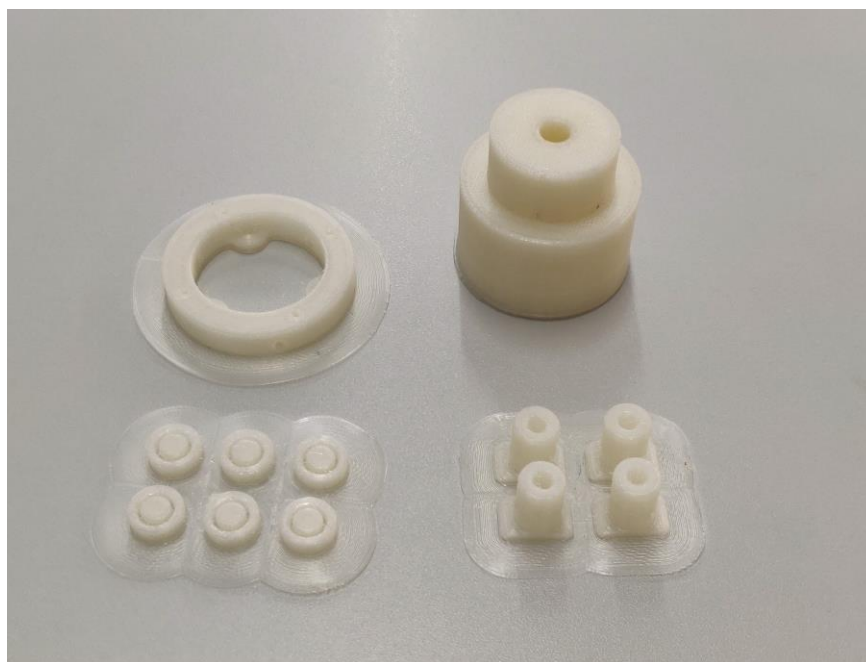
Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.1 Sistema de Recuperação

Este sistema de extrema importância para o foguete, não só é requerido nas competições, mas também garante o retorno seguro do foguete para reuso de suas partes. O foguete TIGAS de apogeu 500 metros utiliza de um sistema pirotécnico para abertura de paraquedas.

O funcionamento do sistema segue os seguintes passos: Detecção do início da descida pela aviônica, após descer 2 metros um pulso é liberado para realizar o acionamento do *skib* (fósforo eletrônico), este que inicia a expansão da pólvora gerando uma elevação de pressão para realizar a liberação no nosecone e do paraquedas.

Figura 11 - Peças impressas em poliamida: suporte para aviônica, ferramenta para montagem do motor e tubos de carga de pólvora da recuperação



Fonte: Arquivo pessoal.

Neste sistema encontramos 3 grandes peças impressas: Suporte separador, ignitor com tampa e nosecone (este que também faz parte do sistema aerodinâmico e estrutural). Sendo o separador e ignitor com tampa impressos em poliamida e o nose cone inicialmente impresso em poliamida trocado para PETG devido à sua densidade ser maior, necessária para o equilíbrio aerodinâmico do foguete.

3.2.1.1 *Nosecone*

O *nosecone* foi impresso em duas partes, sendo impresso a parte superior e inferior de 165 milímetros separadamente, totalizando um tamanho de 330 milímetros. Este então é colado e dado acabamento com lixa externamente para garantir a melhor aerodinâmica possível. Para corrigir o peso é então adicionado bolas de metal e resina assim prendendo também a corda do paraquedas internamente. Para uma liberação do paraquedas mais suave é também adicionado grafite internamente. Inicialmente as peças foram impressas à 230°C porém após uma segunda calibração do equipamento, as peças estão sendo impressas à 265°C. Este valor é acima do recomendado pelos fabricantes (de até 250°C) porém com o *hotend* de alta qualidade mostrou-se mais eficiente este método, obtendo uma maior resistência à cisalhamento entre camadas.

Devido o processo normal de fabricação FDM, as camadas são bem proeminentes, a altura destas é de 0.2 milímetros e devido o tamanho foi necessário ser dividido em duas partes de 165 milímetros e colada. Para garantir uma excelente rugosidade necessária para um vôo eficiente, utilizou-se lixa d'água de granulatura fina.

O primeiro modelo foi impresso em Poliamida, vista na imagem a seguir, contudo acabou tendo dois problemas. Pelo processo de impressão ser longo pela peça ter uma altura significativa em Z, ser dividido em duas impressões (para se ter um acabamento superficial final melhor) a poliamida utilizada acabou absorvendo uma quantidade significativa de umidade (devido poliamida ser altamente higroscópica) acabou gerando pequenos furos no qual impediam o funcionamento correto do sistema de recuperação. Devido a baixa densidade do material o *nosecone* acabou sendo leve demais (com apenas 88 gramas), desbalanceando o foguete mesmo mantendo sua alta resistência. Então ao se imprimir o *nosecone* em PETG com 100% de preenchimento, temos uma peça com 111 gramas, ainda insuficiente para corrigir o centro gravitacional do foguete, para isso foi então adicionado mais 145 gramas (aproximadamente, cada versão nova do foguete seria necessário uma leve alteração na gramatura adicionada) de bolas de ferro e resina. É complicado definir a densidade deste material utilizada, já

que o fabricante não disponibiliza, porém, sabendo que os filamentos de PLA possui uma densidade de $1,24\text{g/cm}^3$ e o PETG possui $1,27\text{g/cm}^3$ (segundo os dados disponibilizados pelos fabricantes), podemos estimar a densidade do Polimadi sendo aproximadamente $0,89\text{g/cm}^3$. Com o peso adicional do *nosecone* foi necessário dobrar a carga de pólvora para realizar uma ejeção repetível e confiável.

Figura 12 - *Nosecone* impresso em poliamida



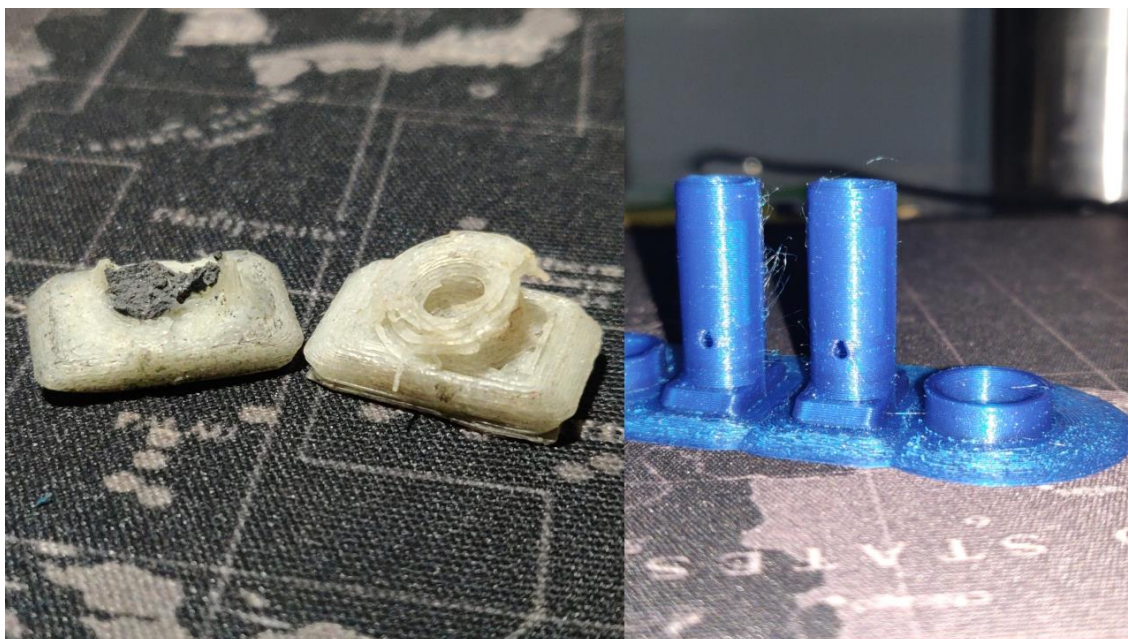
Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.1.2 Ignitores

Estas peças pequenas carregam muita importância. Todas as peças foram impressas em poliamida, pois desde o primeiro teste estas peças apresentaram performance excepcional.

Os ignitores passaram por uma dezena de revisões geométricas com intuito de facilitar a sua montagem. Este conta com uma base com um formato sextavado na sua lateral para poder encaixar e travar mantendo sua posição durante o vôo. Com dois furos opostos próximos da base onde se é passado os fios do *skib* que deve estar o mais próximo da base possível. Após é necessário adicionar pequenas gotas de cianoacrilato para manter o fósforo eletrônico no local desejado. Os fios então são soldados em um conector para facilitar montagem e remoção. Finalizado é então adicionado 0,2 gramas de pólvora negra e selado com a tampa e uma gota de cianoacrilato.

Figura 13 - Ignitores em poliamida e PETG após impressos e após utilizados



Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.2 Sistemas Estruturais

A maior parte da estrutura externa foi construída em fibra de vidro, porém como esta técnica é extremamente complicada para se produzir detalhes, peças impressas em 3D preenchem esta lacuna. Das peças internas temos os suportes, que conta com o suporte da recuperação (impresso em poliamida), os suportes superior e inferior da aviônica (impressos em PLA) e os suportes do motor, macho e fêmea (impressos em poliamida). Além dessas peças internas encontra-se a aleta, uma peça aerodinâmica, atualmente impressa em PLA.

3.2.2.1 Aletas

As aletas sofrem pouco esforço físico, ela é responsável pela aerodinâmica de controle do foguete, ou seja, estão guiando o fluxo de ar do estado de alta pressão para o de baixa pressão, criando um menor arrasto e maior controle em altas velocidades. A forma das aletas é simples e deve seguir um cálculo, esse realizado através do openrockets.

3.2.2.2 Suportes internos

Os suportes internos são de alta importância para o projeto. O suporte da recuperação conta com rasgos para inserir anéis de vedação na parte superior e inferior. Impedindo que os gases da expansão da pólvora afete a aviônica ou outro componente. Esta peça conta com um rasgo onde o conector elétrico para o fósforo se encontra, e um trilho, inspirado em trilhos *Picatinny* comum em armamentos em geral, onde o ignitor é preso.

Os suportes da aviônica são extremamente simples, sendo dois anéis onde as placas, baterias e sensores se mantem presos para proteção da extrema vibração durante o voo.

O suporte do motor conta com duas peças, o macho e a fêmea. O conjunto motor e aleta encontra-se em uma parte separada de toda a estrutura. Para realizar a união é utilizado duas peças impressas em poliamida. É então colocado porcas nos canais da peça. A peça fêmea é parafusada no corpo superior enquanto a peça macho é parafusada no inferior. Estas peças no seu desenho não possui folgas, contudo, controlando corretamente o fluxo de deposição de material. O ajuste feito no equipamento gerou uma interferência excelente. Algo interessante é seu peso, além de sabermos que sua densidade é de aproximadamente $0,89\text{g/cm}^3$, o fato da peça impressa mostrada na figura 14 ter essa texturização mostra que a impressão estava com uma quantidade considerável de umidade, este fator torna a peça sutilmente mais leve naturalmente.

Figura 14 - Conjunto de suporte de motor macho e fêmea



Fonte: Arquivo pessoal.









4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizar uma análise tecnológica completa no ramo é extremamente difícil, e manter atualizada quase impossível. Isso devido à grande quantidade de novas tecnologias desenvolvidas internamente em empresas e novas que estão constantemente sendo analisadas e validadas para o ramo.

Além deste fato, a engenharia de materiais neste ramo está em crescentes desenvolvimentos, tanto na questão de validação de materiais conhecidos porém fabricados por Manufatura Aditiva como materiais específicos para Manufatura Aditiva para se obter resultados anteriormente impossíveis.

Por isso o técnico que vai trabalhar com a decisão deve compreender bem as opções a serem escolhidas para realizar a decisão correta de acordo com cada projeto. Não há tecnologia ou equipamento que sirva para tudo. O infográfico abaixo apresenta um resumo de tecnologias tradicionais industriais onde pode-se compreender melhor as diferenças. Mas deve-se sempre estar atento a este mercado inovador para ter melhores decisões de projetos. Claro que muitas vezes um projeto deverá ser adaptado para o equipamento em que se tem acesso.

Figura 15 - Infográfico de tecnologias tradicionais materiais em relação à qualidade de impressão em Durabilidade, Acabamento, Detalhamento e Aplicação

Materials	Technologies		
	Parts built through polymerization	Parts built through bonding agent	Parts built through melting
Ceramic		 BJ	 LM
Metal			 EBM
Sand			
Plastic	 SL  PJ		 FDM  LS
Wax			 MJ *

Lower	Durability	Higher
Smoother	Surface finish	Rougher
Higher	Detail	Lower
Prototypes Indirect processes	Application	Functional parts

* MJ achieves smooth surface finish and high detail

© additively.com

Fonte: Additively.com

4.1 ANÁLISE DA MANUFATURA ADITIVA METÁLICA

Da mesma forma que se é trabalhado com outros tipos de manufatura, o correto é sempre analisar o que se é desejado da peça para decidir o seu processo de fabricação. Manufatura aditiva tende a ser uma linha reta na questão de custo por quantidade de peças fabricadas, porém se torna um ínfimo detalhe quando analisamos a velocidade que podemos imprimir um único modelo de baixo custo (para teste por exemplo) e a liberdade em relação à complexidade geométrica sendo fabricada, esta que estará levando alta performance à um peso reduzido (FERA, 2016).

É muito importante que o setor de modelagem e fabricação estejam muito bem integrados para realizar as análises necessárias em relação ao processo de fabricação em relação à rugosidade desejada, materiais a serem utilizados, complexidade geométrica em relação às capacidades do equipamento, etc.

Também é importante falar das tecnologias de Manufatura Híbrida. Este é um tópico extremamente abrangente, pois o segmento da manufatura híbrida

envolve tanto tecnologias similares como tecnologias opostas. E da mesma forma que podemos considerar uma peça fabricada por manufatura híbrida, existem equipamentos híbridos, como os sistemas da DMG. Uma tecnologia que chama a atenção neste segmento é a empresa Fabrisonic que necessita da subtrativa para criar as peças.

Chamada de UAM (Manufatura Aditiva por Ultrassom), a tecnologia consiste em “soldar” finas camadas de folhas metálicas utilizando ultrassom, sendo assim um processo de criação de peças metálicas à temperatura ambiente (claro que no processo de subtração há uma elevação de temperatura, porém pode ser controlado), após cada camada depositada os detalhes são usinados para se repetir o processo (HEHR, 2018).

Comparando por exemplo com equipamentos mais baratos e acessíveis, os sistemas da DMG MORI utilizam da tecnologia DED para adicionar e para se definir detalhes o cabeçote de fresadora finaliza o trabalho. Como citado anteriormente, o sistema DED é um dos mais versáteis, permitindo adicionar detalhes em peças metálicas fabricadas após uma usinagem ou até outras metodologias, como por exemplo: um cabeçote de motor fabricado a maior parte do corpo por SLM, após adicionado detalhes com DED e finalizando a rugosidade com usinagem.

A manufatura híbrida é essencial para peças em alta qualidade, principalmente de extrema complexidade e dependendo da rugosidade desejada.

Um assunto muito discutido na comunidade científica de produção de peças por fundição de pó é o efeito térmico causado pela fonte energética nos sistemas, e ainda é necessário bastante estudo para implementação de novos algoritmos nos programas fatiadores (muitas vezes proprietários dos fabricantes, dificultando o ciclo de atualização) permitindo uma melhor qualidade e principalmente precisão dimensional. Isso tende a ocorrer devido a tendência de aglomeração da maior parte do material em um ponto devido aos efeitos de evaporação nas superfícies derretidas pelo, por exemplo, jato de elétrons, causando até mesmo erros nas camadas seguintes. Isso pode ocorrer devido à potência utilizada, aquecimento de câmara, qualidade e precisão geométrica do pó metálico utilizado. Estas variáveis devem estar bem sincronizadas para garantir uma boa superfície (C.KÖRNER, 2016).

Outra análise feita por todas estas tecnologias e que devem ser levadas em consideração é a granulometria dos materiais e porosidade, pois cada processo de produção gera uma microestrutura interna de forma única. E que para análise da mesma, não só a tecnologia utilizada mas também o processo em si também devem ser analisados, como a direção em que o cabeçote ou laser utilizou para fabricação, os processos de sinterização que podem alterar as propriedades do material, principalmente se for mal executada.

Neste quesito podemos analisar as técnicas da seguinte formas. Técnicas de posicionamento metálico por aglutinantes, que são necessariamente retirados antes do processo de sinterização, causando uma imprecisão dimensional, porosidade não controlada, possíveis alterações na micro estrutura devido o processo de fusão e os gases no forno, além de uma possível oxidação entre camadas, afetando a qualidade. Contudo são os métodos mais baratos já que necessitam poucos consumíveis (filamento plástico com carga metálica, pó metálico e aglutinante, etc), e são mais eficientes energeticamente, porém a maioria dos processos requer um longo processo após a impressão para se obter a parte totalmente metálica.

Sinterização direta, em um sistema bem calibrado (pois são sistemas mais complexos a se calibrar, dependendo extremamente do fabricante para o ato), tendem a possuir a menor porosidade (junto com DED), excelente ligação entre camadas, grande liberdade em geometrias externas (dependendo do sistema utilizado não é necessário o uso de suportes), porém possui limitações na geometria interna na peça. Como sabemos, a manufatura aditiva permite desenvolvermos peças com cavidades e geometrias internas com facilidade, reduzindo a quantidade de material utilizado e conseqüentemente o peso, porém há algumas tecnologias que podem enclausurar o material, mesmo que não utilizado no processo de fabricação da peça, por isso é importante fazer uma modelagem correta e também o posicionamento da peça na área de trabalho do equipamento. Devido à isso é muito comum peças fabricadas por essa tecnologia serem focadas apenas na geometria externa, possuindo então um preenchimento totalmente sólido, o que deixa de aproveitar as capacidades totais do equipamento.

Esta tecnologia tende também a possuir um custo extremamente alto em relação aos consumíveis, além de todos os equipamentos e infraestrutura ne-

cessários. Em relação à infraestrutura, sistemas requerem uma rede elétrica especializada, um ambiente especializado, além de todos os equipamentos de EPC e EPI e os de pós-processamento. Os consumíveis envolve a grande quantidade de pó metálico, este que nunca é utilizado completamente, e a grande quantidade de gás argônio.

Em comparação sistemas com deposição metálica direta são um pouco mais complexos de se analisar, pois nesta categoria vê-se as tecnologias DED e WAAM. Enquanto a DED possui um excelente acabamento, e grande facilidade em trabalhos bi-metálicos, a WAAM brilha em projetos de grande porte e velocidade com baixo custo. Sistemas DED tendem a acompanhar a tecnologia de usinagem no mesmo equipamento, permitindo uma grande flexibilidade de produção em um pequeno espaço, porém sofre dos mesmos problemas que sistemas de sinterização direta em relação à custo e consumíveis, mesmo utilizando de forma mais eficiente. A WAAM requer um espaço maior para trabalho, pois devido sua facilidade a produzir peças grandes em um menor tempo há poucos equipamentos “pequenos” (muitos são simplesmente um braço robótico com um “bico de solda”).

Ter esses pontos em mente é essencial para poder-se analisar a melhor alternativa de aplicação para as peças a serem feitas pela indústria. Em relação ao setor de pesquisa de baixo custo, as tecnologias mais simples, em relação ao pós processamento necessário e consumíveis, demonstrando assim tecnologias como a FDMS, MBJ e outras emergentes como da empresa Desktop Metal ou Rapidia (que são similares à FDMS). Porém setores industriais mais críticos como aeroespacial e de alta performance é recomendado equipamentos de tecnologia DED, EBM, SLM e similares, devido a todas vantagens que estas oferecem em relação a complexidade geométrica interna e externa, além de sua precisão elevada.

4.2 ANÁLISE DA MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA

As tecnologias de impressão com polímero são as mais amplas e mais conhecidas, não somente por serem as mais antigas, como visto no capítulo anterior, mas também ser um material extremamente fácil de se trabalhar. Além das tecnologias citadas detalhadamente, devido estarem amplamente aplicadas na

indústria, há novas tecnologias sendo desenvolvidas em universidades e empresas, além dos avanços nas tecnologias já bem implementadas, como avanços em algoritmos de controle dos equipamentos. Algoritmos de um nível mais avançado permite um maior controle, tanto na solidificação de material extrusado, solidificação de fotopolímeros e sinterização de pó.

Tecnologias emergentes podem transformar este cenário. Destas, no setor de fotopolímeros é interessante destacar duas: o sistema desenvolvido pela *Carbon3D* e o segundo pionerizado pela *Readily3D*. O sistema da *Carbon3D* (como citado anteriormente) mostra o pico atual da tecnologia no momento em que este documento é transcrito, não sendo somente uma teoria viabilizada, mas concretizada, sendo capaz de trazer alta precisão com a velocidade mostrada em filmes de ficção científica.

Contudo quando o assunto é velocidade, o sistema volumétrico da *Readily3D* é realmente digno da atenção. Digno da imaginação de Douglas Noel Adams ou até mesmo de Eugene Roddenberry. Criando uma peça ao girar um frasco de resina fotosensível sendo bombardeada por fótons de diversos lados, materializando o modelo binário desenvolvido em um computador. Contudo esta tecnologia ainda não permite uma alta precisão da peça gerada, esta que pode ser mitigada com avanços em algoritmos de processamento dos modelos à geração de comandos para o equipamento; além de sofrer um problema similar ao da *Carbon3D* em relação à escalabilidade, sendo limitado ao próprio fluido e seu processo. Devido a necessidade de selecionar um ponto único para solidificar dentro de um recipiente onde é o mesmo material, quanto maior a quantidade de material, os fótons vão interagir com moléculas no caminho, pois nem mesmo o vácuo do espaço (devido a física quântica e matéria escura) tem uma transparência perfeita. Tendo assim perdas na transmissão de fótons, necessitando uma fonte mais potente que limita assim a escalabilidade (DELROT, 2021).

Quando é pensado neste tipo de tecnologia lembramos de: Peças pequenas de alta precisão e alta velocidade de produção. A precisão das impressões são variáveis de cada setup. Em sistemas com laser, o diâmetro do laser que dita a precisão (comumente em torno de 0.15mm de diâmetro) sem esquecer de possíveis distorções por espelhos utilizados. Em setups que utilizam telas LCD a precisão depende do tamanho dos pixels, (em média o tamanho destes é de 0.05mm em impressoras comuns, podendo variar) que podem mudar de acordo

com o tamanho da tela e a resolução. A precisão vai além do tamanho da máscara ou laser, mas também da exposição e a dispersão de luz através do material. Outro ponto é a temperatura de operação das resinas, estas que solidificam melhor e em menor tempo quando estão aquecidas (dependendo das diferenças entre qualidades e fabricantes) portanto um controle contínuo é necessário desde a calibração até o uso diário. Um ponto complexo para se fazer análise é o grande problema das camadas destas tecnologias. Ao solidificar uma camada, esta tende a grudar na base, por isso é utilizado um filme FEP para facilitar o procedimento de separação e início da próxima camada (algo que a tecnologia da Carbon evita por trabalhar a solidificação sem grudar no filme devido à camada de oxigênio inserida), e que pode gerar um erro de impressão se a força para desgrudar do filme for maior que a força onde o material está grudado à mesa (geralmente que se encontra de ponta cabeça, onde o peso da peça já impressa também pode influenciar) este causará uma grande falha, e se não causar haverá deformações no objeto a ser impresso. Para mitigar isso, grandes peças podem ser pré-peradas (pré fatiamento, porém hoje alguns fatiadores já oferecem esta função) tornando os modelos ociosos, não só permitindo uma economia de resina mas também diminuindo a força necessária para ser exercida em cada troca de camada. Em peças grande é também importante lembrar da qualidade dos suportes, sendo recomendado utilizar vários softwares para testar e definir a melhor forma de suportes para cada tamanho de impressão e máquina, alguns softwares podem gerar suportes fracos, ou até mesmo suportes automáticos (definido pelo algoritmo do mesmo) insuficiente ou em pontos errôneos. Este é um ponto que a tecnologia de fotopolímeros peca em relação à tecnologia de filamento fundido. Todos estes fatores contribuem pela difícil aplicação da tecnologia em médias e grandes escalas.

Com fotopolímeros ainda tratamos das tecnologias que as usa como aglutinantes, gerando assim compósitos, estes que podem ser com fibras, outros polímeros ou até mesmo metais e cerâmicas (que nos permite tornar a peça totalmente nesses materiais após queimar ou retirar quimicamente o polímero e sinterizar o material desejado. Estas permitem uma precisão similar à sinterização direta porém com menor consumo de energia, permitindo também a total reutilização dos materiais não utilizados no processo, contudo isto mostra o re-

querimento de material extra para realizar uma impressão. Esta tecnologia também possui uma grande habilidade de impressões totalmente coloridas sem necessitar pós processamento, facilitando muitos processos. Contudo é uma tecnologia que requer muita atenção, não só por trabalhar com elementos UV mas também a periculosidade das SLS, SLM e etc, os materiais em formato de pó, requerendo assim um ambiente especial para ser trabalhado.

Com a tecnologia de deposição selecionada de fotopolímero permite um trabalho com grande porte facilitado, tendo também grandes inconvenientes da tecnologia FDM/FFF em relação à suportes. Porém permite uma velocidade de trabalho de camadas menor que FDM e pouco maior às MSLA (quando consideramos telas monocromáticas que permite solidificação em até 2 segundos) sem os problemas da verticalidade gerada pela dificuldade de separação do filme protetor.

Contudo todas estas tecnologias que trabalham com fotopolímeros, resinas que solidificam com luz ultravioleta mostram uma necessidade de treinamento do profissional que estará utilizando a máquina, não somente pela dificuldade das tecnologias em si, onde todas as tecnologias de manufatura requerem uma curva de aprendizado característico, mas principalmente com o trabalho da delicada resina líquida, principalmente por ser tóxica, sua manipulação deve ser bem atenta todas as vezes.

Saindo do território de sinterização de fotopolímeros diretos, tem-se em mente as tecnologias de sinterização por pó, esta que muitos atributos são similares às tecnologias SLM e DMLS (que é explorada nos próximos tópicos deste capítulo). Trazendo todas as complexidades destas tecnologias porém a uma temperatura menor (pois com metais as temperaturas estão próximas ou acima de 1000°C enquanto os polímeros trabalham na faixa de 200° à 400°C). por ser também um material de menor densidade as complicações da fundição são levemente alteradas. Além que dependendo do material utilizado é necessário um tratamento nos gases liberados pela queima das grandes cadeias, algo que não é preocupante entre as ligas metálicas.

Entramos assim na análise da tecnologia de manufatura aditiva mais difundida do planeta, pelo seu baixo custo alvo de muitos hobistas (tornando impressoras tipo MSLA as segunda mais requeridas pelos hobistas principalmente para figurinhas devido ao seu alto nível de detalhe). Esta tecnologia é conhecida

tanto por produzir peças do dia a dia de um “*Maker*”, peças utilizadas diretamente pela NASA e outras organizações de nível até no setor automotivo gerando um chassi inteiro de um carro elétrico desenvolvida pela Local Motors em uma grande impressora com um bico de extrusor de pellets (normalmente utilizado para fazer o filamento para impressoras de pequeno e médio porte. Quando trabalhamos com uma extrusão de material polimérico é de suma importância saber que este precisa de um controle bom na sua temperatura e seu tempo de exposição ao mesmo para não carbonizar. A pressão sendo exercida no bico gera uma mudança na precisão geométrica devido ao volume de material que está sendo liberado pelo bico. Esta pressão é definida pela velocidade de alimentação do material como também pela precisão da área do filamento, sendo proporcional aos dois fatores. Com materiais flexíveis há a necessidade de um maior controle do caminho total até ao setor de derretimento, sendo mais complexo devido às suas características elastômeras, assim, equipamentos onde o caminho entre o extrusor e o bico é menor (estilo *direct drive* ou *flex drive*), onde as polias extrusoras está a milímetros da zona aquecida possuem uma maior facilidade de trabalho. Isso não impede que outros métodos tenham sucesso, porém podem não ter algo remotamente similar devido ao jogo de tolerâncias no conjunto.

A maior vantagem desta tecnologia é a facilidade de manipulação devido a sua grande comunidade. Devido sua grande comunidade de indivíduos entusiastas e empresas, onde muitos projetos são de fonte aberta (*RepRap*, *Voron*, etc), é possível encontrar muitas soluções sendo aplicadas de forma diferente. Destas é interessante destacar as formas de utilizar vários filamentos em uma mesma impressão. As inúmeras formas automatizadas de troca de cabeçote, cabeçotes duplos, *hotend* duplos, triplos, quadruplos, sistemas IDEX, sistemas como o MMU da Prusa e o *Palleto* da *Mosaic* permitindo trabalhar com um cabeçote comum fixo. Muitas destas tecnologias são desenvolvida para trabalhar com filamentos de cores diferentes, o que não deixa de ter um excelente uso técnico como código de cores em uma peça e etc). Porém as aplicações técnicas mais interessantes são aquelas que permitem trabalhar diversos materiais em uma mesma peça.

Neste quesito, por mais fantástica seja a solução da *Mosaic* na qual os filamentos inseridos no equipamento são cortados e soldados formando um único filamento alimentando o único bico. Esta técnica apresenta limitações, não só de

gasto de material e tempo, mas também os materiais devem ser de certa forma similares, pois mesmo com versões avançadas não podemos juntar um TPU com um PEEK por exemplo. As diferenças de características do material são tão grandes que ao tentar algo do tipo podemos tanto danificar os polímeros como os equipamentos utilizados não combinarem bem, tanto na soldagem como transição dentro do bico, podendo queimar e cristalizar entupindo-o. Uma solução parecida que permite algo similar é sistemas como o MMU da Prusa, que retira o filamento a ser usado e insere um novo. Este possui limitações similares, necessitando de tempo e um maior gasto de material para fazer a limpeza e preparação ao próximo, contudo, como os filamentos não devem ser soldados a transição para filamentos diferentes é mais suave, mas continua-se os problemas de gasto de tempo e material. Soluções do tipo “blending nozzles” (bicos misturadores) possuem as mesmas características de um MMU com o adicional de poderem trabalhar misturando dois materiais para atingir uma 3ª característica desejada. Considerações da manipulação devem ser levadas devido o tamanho da câmara de derretimento e efeitos que os materiais misturados podem gerar.

Mecanicamente, temos no topo 2 tecnologias, as que efetuam uma troca de cabeçote e as IDEX. Aplicações que efetuam trocas de cabeçote permitem trabalhar até mesmo com outras tecnologias (como subtrativas como fresas, lasers e etc), contudo são limitadas pela integração de *software* de suas especificidades. Até mesmo simples trocas de espessura de bico podem dificultar o trabalho pré-impressão. Similar aos cabeçotes de bicos duplos, onde podemos trabalhar com dois materiais e dois bicos diferentes em uma única peça, os sistemas IDEX apresentam uma maior capacidade ao custo de complexidade mecânica. Um dos maiores problemas em cabeçotes de bico duplo é a troca entre um cabeçote ativo ao outro, pois quando trabalhamos com fluídos nada é digital. O bico desativado deve manter uma temperatura razoável para assim que ativado não demore a efetuar o seu serviço, ou seja, não acrescente muito tempo nas trocas de atividade necessitando de um acréscimo grande em tempo mesmo em peças teoricamente simples. Porém seus maiores defeitos é devido suas maiores vantagens. Pelo seu posicionamento, é necessário uma excelente calibração do *offset* entre os bicos. A sua habilidade de trabalhar com materiais e bicos diferentes dificulta ter-se uma impressão bem limpa devido a natureza dos bicos soltarem pequenas quantidades de material. Para mitigar isso, é utilizado escudos de

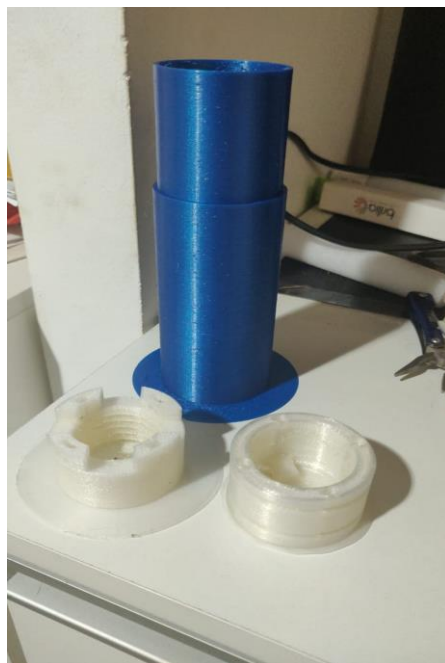
ooze, escovas de metal e torres de limpeza (assim como as tecnologias citadas anteriormente). Sistemas IDEX (Extrusores Independentes) trabalham de forma similar, mas como o nome sugere estes são independentes. Sim, é possível utilizar braços robóticos para efetuar impressões com cabeçotes totalmente independentes, mas quando falamos de impressoras convencionais (deltas e cartesianas) o sistemas cartesianos IDEX possuem liberdade em apenas 1 eixo (comumente o X, longitudinal). Ao imprimir-se uma peça com materiais diferentes, o cabeçote inativo pode se retirar para um local de descanso definido, muitas vezes equipado com um sistema de limpeza automática. Esta tecnologia ainda permite duas funções que aumenta o nível de produtividade. Ao imitar os movimentos do bico principal no eixo independente, a impressora é capaz de criar duas peças ao mesmo tempo ao custo da área de impressão ser reduzida, ou espelhar os movimentos para obter a peça, como citada, espelhada.

As tecnologias de trabalho com polímeros são extremamente amplas, e todo técnico que se trabalhe para criar uma peça deve ter noção ao menos de toda a parte básica dos materiais como das formas de impressão. Contudo, a análise mais importante a ser feita pelo técnico é das necessidades de resistência (seja mecânica, química, radiação, biocompatibilidade, etc), acabamento final diretamente impresso (todas as maneiras de fabricação aqui citadas permitem processos de acabamento após a impressão) e sua complexidade geométrica. Muitas vezes é limitado o acesso à outras tecnologias (até mesmo entre as de polímeros) e este é um grande fator para fazer a consideração da escolha do método de fabricação (junto com custo).

4.3 ANÁLISE DAS PEÇAS DO FOGUETE TIGAS

As peças impressas do TIGAS realizam várias funções diferentes no foguete de suporte à aerodinâmica, por isso é importante entender as correlações entre tecnologias, materiais e funcionalidades. Infelizmente o maior fator limitante é a tecnologia disponível para uso. No caso do Facens Rockets, a equipe conta com disponibilidade de diversas impressoras FDM de diferentes fabricantes e com suas características únicas. As peças impressas em PLA não requerem características especiais, tornando o processo de impressão mais simples pela grande disponibilidade de equipamentos.

Figura 16 - Base da recuperação e suporte fêmea em poliamida e parte inferior do *nosecone* em PETG



Fonte: Arquivo pessoal.

Contudo, a impressora utilizada por um patrocinador na impressão das aletas não estava corretamente calibrada no slicer utilizado gerando imperfeições. Estas imperfeições consistem em *underextrusion* (fluxo de extrusão abaixo do ideal) e baixa adesão entre camadas que é então agravada com o *underextrusion*. Devido a geometria das aletas serem finas, elas não requerem preenchimento, utilizando apenas perímetros. Com o fator de *underextrusion*, os perímetros após extrusado não encostam, ou seja, não estão “soldados” juntos, fragilizando a peça ao todo, pois assim pode ser descamada como uma cebola. Outro ponto é a adesão entre camadas, esta que pode ser melhorada pela temperatura de extrusão do material. É notável que equipamentos diferentes agem de forma diferente com materiais e temperaturas, além do fator do próprio material ter suas características próprias, como diferentes corantes afetam suas qualidades em resistência, condução de calor e etc. Uma grande diferença notada tanto no setor profissional quanto a comunidade hobbista é a influência da qualidade de peças, principalmente no bico extrusor, tem com o uso de materiais diferentes, porém o principal fator é a qualidade de acabamento interno, afetando a distribuição de

calor de forma homogênea afetando então a adesão entre camadas. A escolha da equipe em utilizar PLA para as aletas resultou em as tornar descartáveis, ou seja, há a necessidade de se trocar a cada lançamento, não importando o estado do pouso. Isso se deve ao fato da geometria entrar em conflito com o método de fabricação utilizado e escolha do material, além do PLA possuir uma alta densidade gerando um peso maior necessário para contrabalancear no nosecone. Uma excelente opção é o poliamida que além de resistir o impacto de uma forma excelente possui uma densidade baixa. Utilizando o poliamida pode permitir que a peça não derreta ao redor dos parafusos durante a ignição do motor. Estes fatores podem ser vistos na figura 18. Esteticamente essas peças estão excelentes, demonstrando apenas inconsistência de extrusão.

Os suportes de motor surpreendeu a todos da equipe, tanto pela sua resistência e precisão na rosca. Sendo impressa apenas dois conjuntos, sendo utilizado um deles até quebrar. Houve diversos lançamentos falhos, de uma ventania enganar o altímetro e liberar o paraquedas, até lançamentos sem estabilidade. Depois de diversos lançamentos falhos e sucedidos apenas uma peça macho quebrou, como pode ser visualizado na figura 17. Essa peça demonstra o total potencial de peças impressas em poliamida. Contudo suas dificuldades também devem ser abordadas. A impressão de poliamida requer bastante conhecimento do material e do equipamento a ser utilizado. Poliamida é bem conhecido pela sua temperatura de extrusão um pouco mais elevada e também sua alta taxa de contração. Para controlar isso devemos diminuir o estresse sofrido pelo polímero no processo de impressão, isso é, aumentar o tempo de transição de viscoso para sólido. Para isso há algumas maneiras como: garantir que o ambiente de impressão esteja em uma temperatura estável amena ou aquecida, utilizar temperaturas de extrusão um pouco mais elevadas e utilizar um bico maior ou outras formas de reduzir pressão na câmara de derretimento. Tendo este conhecimento é possível imprimir poliamida em equipamento de baixo custo e até mesmo impressora aberta. Mas é sempre recomendado um maior estudo por parte do técnico para compreender o conjunto todo que ele irá trabalhar. Em análise do resultado das peças, houve uma leve contração na peça final em sua base, porém não suficiente para descartá-la (apesar de haver múltiplas falhas totais no processo de calibração). A geometria da rosca ajuda muito no processo de impressão, além da geometria da peça permitir e induzir a impressão das

mesmas na vertical. Isto é muito importante para o processo, principalmente para a tecnologia FDM, onde de forma horizontal estas sofreriam muitas deformações. A posição ideal para esta tecnologia é alinhada ao eixo normal do bico ou em até 60° (na maioria dos equipamentos comuns) a partir deste eixo. Outro fator que contribui para sua resistência é sua característica semiflexível de alto impacto, o que permite que peças com alta quantidade de material seja sólida enquanto geometrias mais finas sejam flexíveis. É necessário lembrar que estas peças foram impressas com 100% de preenchimento o que aumenta sua contração.

Figura 17 - Suporte do motor após impacto



Fonte: Arquivo pessoal.

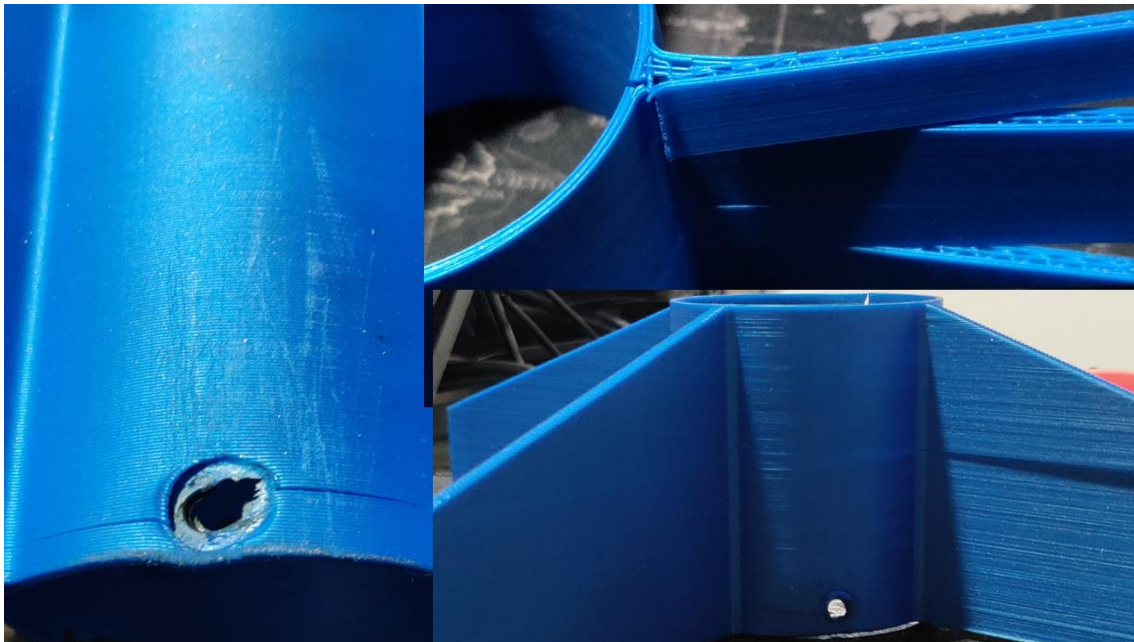
Outra peça impressa em poliamida é o conjunto de recuperação, onde têm-se o ignitor e o suporte. O suporte é um cilindro externamente com sua parte interna côncava e sua guia de suporte ao ignitor inspirado em trilhos *picatinny* de armamento. Externamente encontra-se dois rasgos, um superior e outro inferior para a utilização de *oring* selante, este que veda entre as duas seções (recuperação e aviônica) para o funcionamento correto da recuperação e proteção da

aviônica contra a expansão de gases. Houve três motivos para utilizar poliamida nesta peça, para se ter certeza que aguentaria a pressão necessária, aguentar a temperatura dos gases e reduzir o peso. Devido a geometria e a intenção de ejeção do paraquedas a pressão não é tão intensa quando imaginada inicialmente. Além destes fatores, a geometria interna contribui para a distribuição de pressão. Os gases após a ignição está com temperaturas acima de 160°C, algo além dos limites de PLA e PETG, mesmo que por segundos. Esta peça foi impressa apenas uma vez, encontra-se em operação com pequenos sinais de uso devido à fuligem.

Os pequenos ignitores são peças consumíveis, são desenhados para explodir junto com a pólvora, criando um aumento de pressão na câmara de forma instantânea. A questão mais interessante é que encontramos resquícios desta peça sem nenhuma aparência de derretimento, assim como visto na figura 13, mostrando a resistência do material.

O nosecone é a peça mais surpreendente, permitindo entorno de 40% de redução de peso quando impresso em poliamida, infelizmente pela distribuição de massa do foguete não foi possível utilizar, demandando muito ajuste de peso inibindo o espaço disponível para o paraquedas. Contudo é extremamente notável sua flexibilidade e resistência ao impacto, podendo se tornar uma solução única de múltiplos reusos. As peças em PETG permitiram uma solução intermediária de maior eficiência quando comparado às impressas em PLA. Um grande diferencial foi o pós processamento, onde requereu um processo de lixa para alcançar um excelente acabamento diminuindo o arrasto. Algo que as peças em PLA requeriam lixar em um tanque de água para não deformar sob o calor.

Figura 18 - Aletas de PLA após vôo



Fonte: Arquivo pessoal.

4.4 ANÁLISE DO SETOR EM GERAL

Cada vez mais encontra-se peças de manufatura aditiva substituindo desde pequenos injetores de combustível em motores de turbina à trocadores de calor em robôs interplanetários. A manufatura aditiva vem lentamente sendo implementada de acordo com as validações criadas pelas empresas desenvolvedoras dos equipamentos em conjunto com empresas implementadoras, requerindo um alto controle de qualidade e certificações (como 9100), como feito pela SpaceX validando impressoras de metal e Boeing validando PEEK recentemente.

Constantemente histórias são notificadas para a população em geral através de mídias, contudo não é trabalhado totalmente os motivos e suas técnicas. Devido as implicidades do setor por baixa quantidade de produção, alta qualidade além de requerir geometrias complexas com o avanço da tecnologia, o custo com métodos tradicionais é extremamentente alto. Ainda há a necessidade de avanço nos setores computadorizados para melhor auxiliar os engenheiros e técnicos neste setor. Como esta tecnologia é nova e foi desenvolvida já na era da informação, acredito que não vai precisar de muito tempo para alcançar um nível de alto controle, porém no momento em que se é escrito, ainda encontra-se de certa forma inferior a tecnologias tradicionais.

Os avanços tecnológicos que encontramos hoje estão ricos em geometrias complexas, estas que muitas podem apenas serem fabricadas através da manufatura aditiva. Grandes avanços como trocadores de calor de alta eficiência e redução de peso e espaço, permitindo novos experimentos a serem carregados pelo robô *Perseverance* da NASA, possuindo ao todo 11 partes impressas. A Lockheedmartin anunciou um avanço tecnológico no futuro avião SR-72 em impressão de trocadores de calor em titânio. Ou até mesmo foguetes inteiramente impressos, com tanques coaxiais como o da empresa *Relativity Space*. Um exemplo notável são os bicos dosadores do novo motor da *General Electric* GEnX para aviões. Sua geometria é tão complexa que só pode ser produzido por manufatura aditiva. Esta peça gera dois vortex um dentro do outro, para misturar de uma forma mais eficiente o combustível no ar. Este e outros avanços permitem que o motor seja até 15% mais eficiente em consumo de combustível, pois trabalha em uma faixa pobre em combustível, sendo mais frio e gerando até 60% menos NOx, uma das substâncias mais nocivas ao meio ambiente (STICKLES, BARRETT, 2013). O setor de cerâmicas também encontra muita procura e pesquisa nos setores de alta temperatura como hipersônicos.

Infelizmente muito desse conhecimento é dito como proprietário, dificultando o avanço tecnológico de certa forma. Isso pode-se ver no setor de cerâmicas onde as empresas que estão envolvidas guardam este segredo, e os aplicadores da tecnologia assinam um contrato onde devem manter o segredo. Portanto quando em uma apresentação da NASA se é falado das peças de cerâmicas impressas, estes falam das vantagens sem entrar em detalhes.

A procura gera também um incentivo bilateral no desenvolvimento de novos materiais. Sabemos que o setor de manufatura aditiva é pura engenharia de materiais, esta que pelos avanços torna-se cada vez menos exata, beirando não só a área de probabilidades quanto da própria física quântica. Muito estudo requer neste setor, mesmo com os avanços da computação que permite facilitar, ainda requer muita dedicação.

Este aumento de interesse exponencial nos últimos anos no setor causa uma deficiência em atraso tecnológico nacionalmente. Há muito interesse pelas partes das empresas, porém da mesma forma há uma carência. Carência de equipamentos, profissionais da área e materiais. Hoje, infelizmente, a maior parte é importada, impressoras nacionais sempre utilizam peças importadas, tornando

a tecnologia nacional atrasada em 30 anos, obrigando aos que tem capital em importação total, tanto pelas estruturas dos fornecedores como qualidade final.

5 Conclusão

Realizar uma análise tecnológica completa no ramo é extremamente difícil, e manter atualizada requer muito tempo de pesquisa, conhecimento e escrita. Além de muitos documentos, principalmente destes do mais alto nível são conhecimentos restritos pelas empresas. Muitos dos conhecimentos aqui apresentados não seria possível sem a experiência de trabalho no setor.

O setor clama pela implementação rápida e acertiva desta tecnologia, o que está acontecendo internacionalmente, cada vez mais empresas e organizações substituem peças criadas através de métodos tradicionais por manufatura aditiva. Infelizmente a maior parte deste avanço só é possível em países extremamente desenvolvidos como da América do Norte e os líderes do setor, os europeus. Contudo, países em desenvolvimento demonstram inovações de baixo custo e sustentáveis, porém em um ritmo menor.

No Brasil encontra-se exemplos demonstrando a capacidade da tecnologia no setor, como o foguete TIGAS da equipe Facens Rockets. Estes que demonstram com pouco as grandes melhorias que estas geram. Há a necessidade de investimento de forma correta no setor de manufatura aditiva por parte nacional, tanto no setor público como privado. Assim aos poucos podemos diminuir o vazio de desenvolvimento.

Além de todos os benefícios técnicos encontra-se os sustentáveis, pois permite um desenvolvimento mais rápido, ou seja gerando menores custos e também resíduos. Tornando a manufatura aditiva um sistema completo e inteligente. permitindo um avanço da humanidade como um todo, não apenas no setor aeroespacial, mas este sendo o catalizador para futuras tecnologias.

REFERÊNCIAS

- AOULAICHE, Mokrane et al. **Process of selectivi laser sintering of polymer powders: Modeling, simulation and validation**. 2018. Université Claude-Bernard Lyon.
- Autor desconhecido em 3DSourced. **The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2021**. Disponível em <https://www.3dsourced.com/>. Acesso em: 29 de abril de 2021.
- BAESE, Carlo. **Photographic process for the reproduction of plastic objects**. 1902. Patente N°US77459A. Domínio público.
- BEAMAN, Joseph J. **SOLID FREEFORM FABRICATION: An Historical Perspective**. 2001. University of Texas, Austin, Texas.
- BHAVAR, Valmik et al. **A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing**. 2014. Kalyani Centre for Technology and Innovation.
- BLANTHER, J.E. **Manufacture of contour relief-maps**. 1892. Patente N°US473901A. Domínio público.
- CÁZON, Aitor et al. **PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties**, 2014. Journal of Engineering Manufacturing.
- CHEN, ZhangWei et al. **3D printing ceramics: a review**. 2018. Additive Manufacturing Institute. Universidade de ShenZhen.
- COSTA, Eduardo Castro e; DUARTE, José Pinto; BÁRTOLO, Paulo. **A Review of Additive Manufacturing for Ceramic Production**. 2017. Rapid Prototyping Journal.
- CRUMP, S. Scott. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. 1989. Patente N° US5121329A. Stratasys, Inc.
- DELROT, Paul, et. al. **Intelligent volumetric additive manufacturing**. Proc. SPIE 11677, Laser 3D Manufacturing VIII, 1167704 (9 March 2021).
- Essentium. **PCTG technical data sheet**. Revisão 1.0, 2020. Disponível em: https://www.essentium.com/wp-content/uploads/2020/08/TDS-Essentium-PCTG_v1.0-Minus-3D.pdf. Acesso em: 27 de abril de 2021.
- FERA, M. et al. **State of the art of Additive Manufacturing: Review for tolerances, mechanical resistance and production costs**. 2016. Cogent Engineering.

- FRAZIER, William E. **Metal Additive Manufacturing: A Review**. 2014. Journal of Materials Engineering and Performance.
- GALL, Jean-Luc. **PHOTO/SCULPTURE: L'invention de François Wil-
lème**.1997. Études photographiques. Société française de photographie, 1 de novembro de 1997.
- GIBSON, I; ROSEN, D; STUCKER, B. **Direct Energy Deposition Process**. 2015. Springer.
- HAJASH K., et al. **Large-Scale Rapid Liquid Prototyping**. 2017, MIT Self Assembly Lab.
- ISAO, Morioka. **Process for manufacturing a relief by the aid of photography**. 1932. Patente N°US2015457A. Domínio público.
- KÖRNER, C. **Additive Manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review**. 2016. International Materials Reviews.
- LIU, Bin et al. **Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering**. 2020. National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing.
- MUNZ, John Otto. **Photo-glyph recording**. 1951. Patente US2775758A. Domínio público.
- M.K. Mohan; A.V. Rahul, K; Van Tittelboom; G. De Schutter. **Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review**. 2020. Cement and Concrete Composites.
- PAGAC, Marek et al, **A review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing**. 2021. Center of 3D Printing Protolab, Department of Machining, Assembly and Engineering Technology, Faculty of Mechanical Engineering of Ostrava.
- STICKLES, Rick; BARRETT, Jack. **TAPS II Technology Final Report - Technology Assessment Open Report**. 2013. GE Aviation.
- SABOORI, Abdollah et al. **Application of Direct Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair**. 2019. Departamento de Ciência Aplicada e Tecnologia, Politécnico di Torino.
- SWAISON, Wyn Kelly. **Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product**. 1971. Patente N° US4041476A. Domínio público.
- STEVENSON, Kerry. **Volumetric 3D Printing Is Far More Complex Than You Imagine**. 2020. Disponível em: fabaloo.com. Acesso em 25 de outubro de 2021.

TUMBLESTON, Jhon et al. **Continuous Liquid Interface Production of 3D Objects**. 2015. Science Express.

WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. **History of Additive Manufacturing**. Wohlers Report 2014. 2014.

WU, Bintao et al. **A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties defects and quality improvement**. 2018. University of Wollongong, Foshan University, Tsinghua University.

ZÄH, M.F., LUTZMANN, S. **Modelling and simulation of electron beam melting**. 2010. German Academic Society for Production Engineering.