



# Identificação do modelo genérico de produção no processo de manufatura aditiva no Fused Deposition Modeling

**Daniel Augusto de Moura Pereira**  
danielmoura@ufcg.edu.br  
UFCG

**Romulo Augusto Ventura Silva**  
ravs1980@gmail.com  
UFCG

**Danillo Marcus Farias Marinho do Monte**  
danilodomonte@gmail.com  
UFCG

**Resumo:** A manufatura aditiva é um dos mais importantes avanços tecnológicos que foi implementado e reconhecido como uma tecnologia de fabricação moderna com muitas vantagens sobre abordagens convencionais, tais como a manufatura subtrativa. A Fused Deposition Modeling é uma tecnologia de fabricação aditiva comumente usada para modelagem, prototipagem e aplicações de produção nas mais diversas áreas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi identificar o modelo genérico de produção de manufatura aditiva no Fused Deposition Modeling. Para tanto, foram coletados dados e informações, a partir de observações diretas, filmagens fotográficas, acerca do referido processo, durante a produção de Face Shields, para o auxílio no combate ao COVID-19 na Paraíba, durante o intervalo de março a junho de 2020. O resultado encontrado foi a geração de um gráfico do processo de fabricação supracitado e a descrição de cada etapa dela, informando suas principais características e impactos para a qualidade do modelo impresso naquela tecnologia.

**Palavras Chave:** Indústria 4.0 - Processo Produtivo - Manufatura Aditiva - FDM -

## 1. INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias em diversas áreas tem proporcionado as empresas de diversos setores a possibilidade de incremento em seus processos produtivos, sejam eles de bens ou serviços, a fim de obter melhores resultados, aumento de produtividade, flexibilidade, redução dos custos operacionais, maior confiabilidade, permitindo que elas respondam as mudanças nos requisitos em mercados globais incertos e competitivos.

Neste sentido, o cenário de Indústria 4.0 (I 4.0) vem se tornando obrigatório nos grandes mercados competitivos e de primeiro mundo. A utilização de tecnologias pilares da I 4.0 como *Big Data*, Sistemas Integrados, Internet das Coisas, Computação na Nuvem, Robôs Autônomos, Realidade Aumentada, Segurança da Informação, Simulações e Manufatura aditiva podem impactar significativamente o aumento de produtividade por meio de automação e otimização, moldar produtos a partir dos dados armazenados e analisados (em tempo real) e fazer com que processos de fabricação possam prever o que irá acontecer antes mesmo da linha de produção parar e quebrar os paradigmas dos métodos tradicionais de fabricação.

Segundo Volpato e Carvalho (2018), os principais processos de fabricação possuem princípios baseados na moldagem do material, envolvendo ou não a sua fusão, remoção (ou subtração) de material, conformação, na união de componentes e na divisão de componentes. Quebrando o paradigma dos processos tradicionais, um novo método de fabricação foi criado, ainda no final dos anos 80 e denominado de Manufatura Aditiva (MA). Este método consiste num um processo de fabricação que adiciona material *layer-by-layer* (camada por camada) para que o produto tome sua forma final.

De acordo com Khan et al., (2017), a manufatura aditiva é um dos avanços tecnológicos mais importantes que foram implementados e reconhecidos como tecnologia de fabricação moderna com muitas vantagens sobre as abordagens convencionais. Por sua vez, a modelagem de deposição fundida é uma tecnologia de fabricação aditiva comumente usada para aplicações de modelagem, prototipagem e produção.

A adição de material em camadas tem sido considerada a nova alternativa para enfrentar o impacto no meio ambiente, a economia de materiais e processos e a oportunidade de gerar novas formas complexas limitadas pela tecnologia clássica de fabricação (DUQUE, 2019). As indústrias sentiram-se atraídas a adotar a MA no momento em que perceberam que poderiam acelerar e tornar rentável os novos processos de desenvolvimento de produtos (CHEN *et al.*, 2015), produzir produtos personalizados (BOGERS *et al.*, 2016) e apresentar peças inovadoras e complexas para seus clientes (DESPEISSE e FORD, 2015).

Desta feita, o objetivo deste trabalho foi identificar o processo genérico de produção na manufatura aditiva no *Fused Deposition Modeling (FDM)*.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. MANUFATURA ADITIVA

De acordo com a *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, a manufatura aditiva pode ser definida como um processo de união de materiais para a criação de objetos a partir dos dados de um modelo tridimensional, usualmente camada sobre camada, de forma oposta ao processo de manufatura subtrativa. Também de acordo com ASTM, alguns sinônimos de manufatura aditiva são, fabricação aditiva, processo aditivo, técnicas aditivas, manufatura aditiva por camadas, manufatura por camadas ou ainda, fabricação de *Freeform* (Forma Livre).

Por sua vez, Volpato (2017) define como um processo de fabricação baseado na adição e adesão de materiais em forma de camadas, orientadas através de informações de uma representação geométrica computacional 3D do componente, normalmente gerado em um sistema de *Computer Aided Design* (CAD). Atualmente, existem sete processos de manufatura aditiva, diferenciados pelo insumo que pode ser processado, conforme indica a Tabela 1.

**Tabela 1** – Divisões dos processos de Manufatura de Aditiva

Método	Processo	Insumo
<i>VAT Photopolymerisation</i>	Cura de camada líquida através de laser	Resina líquida fotossensível
<i>FDM ( Fused Deposition Model)</i>	Extrusão de filamento termoplástico	Filamento termoplástico
<i>Material Jetting</i>	Material pressurizado e depositado em gotas endurecido por luz UV	Polímeros
<i>Binder Jetting</i>	Material em pó é endurecido por meio de jatos de aglutinantes	Polímeros e cerâmicas
<i>Powder Bed Fusion</i>	Fusão do leito de pó com feixe de laser ou elétrons	Polímeros, metais, cerâmicas
<i>Sheet Lamination</i>	Laminação de material em folhas	Papel, Polímeros, metais em laminas
<i>Directed Energy Deposition</i>	Um bocal para depósito de pó ou fio metálico sendo fundido por uma fonte de laser, elétrons ou arco de plasma	Pó de metais, níquel, cobalto, titânio, etc.

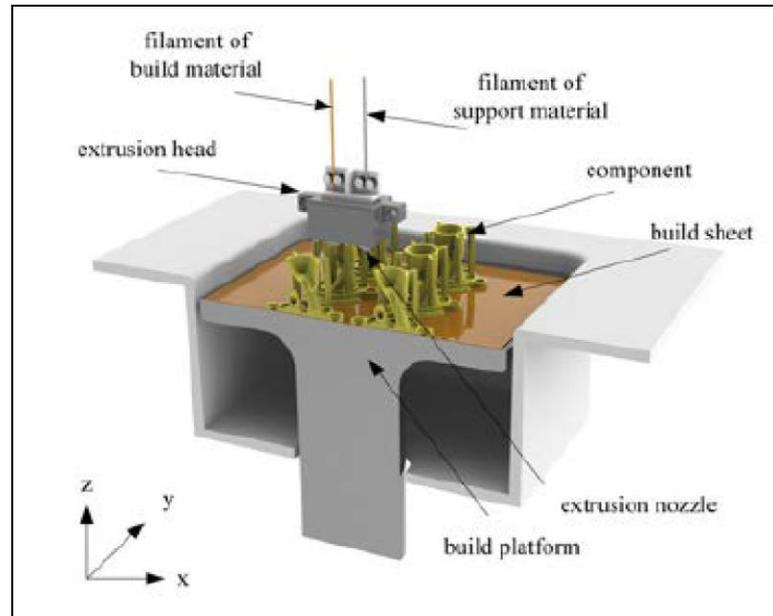
Fonte: Adaptado de <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>

Segundo Giordano, Zancul e Rodrigues (2016), a MA apresenta alguns pontos de interesse como a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto e a economia de material. Para a produção de uma única peça de geometria complexa por meios convencionais, pode ser necessário o emprego de diversas máquinas, ferramental específico e de diversos processos de usinagem e acabamento até obter o produto final. Ao utilizar-se a MA é possível produzir a mesma peça em uma única etapa ou com a redução do número de etapas. Neste sentido, a literatura existente já descreveu a MA como sendo de alta flexibilidade (ONUH e HON, 2001), com alguns a denominando "uma fábrica flexível em uma caixa" (ALPERN, 2010).

Outro fator positivo da MA é que ela traz consigo aspectos de sustentabilidade. De acordo com Niaki, Torabi e Nonino (2019), as tecnologias MA permitem que fabricantes e designers de produtos, a partir de alguns recursos de fabricação, como o *layer by layer* – tornando praticamente qualquer projeto de difícil complexidade geométrica (*complexity for free*) e fabricação sem ferramentas (*tool-less manufacturing*) – uma vez que o modelo é digital e em 3D – façam com que a utilização de recursos durante todo o processo de fabricação seja menor.

## 2.2. FUSED DEPOSITION MODELING

Para Gebhardt (2013) o FDM é um processo de extrusão usando um filamento de polímero termoplástico em bobinas, normalmente Poliacido Lático (PLA), Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) e *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS). O filamento é derretido, extrusado e posicionado no substrato (plano x-y) por um bico aquecido. Devido à fusão térmica, os filamentos depositados formam ligações sólidas com o substrato ou outros filamentos (GEBHARDT, 2014). A Figura 1 ilustra o esquema de um processo FDM.



**Figura 1** - Esquema de processo FDM  
**Fonte:** Lieneke, Denzer, Adam, Zimmer (2016)

Após a extrusão do filamento, e a conclusão da primeira camada (camada de aderência), a plataforma de construção passa a funcionar na adição de camadas com espessura conforme ajustada no software de fatiamento, na direção do eixo z, com o objetivo de criar espaço para a próxima camada. Este procedimento é repetido até que a peça seja concluída. Segundo Wholers (2013) e Fischer e Schopnner (2014), para garantir a fixação das peças e a fabricação de balanços, é utilizado material de suporte, que pode ser removido mecanicamente ou quimicamente após o processo.

Os modelos fabricados usando o método FDM estão prontos para uso imediato depois que o suporte for removido (caso seja necessário a utilização do suporte na impressão). Eles têm boas propriedades mecânicas, mas a qualidade visual é ruim devido ao chamado “efeito de escada” (que ocorre nas tecnologias de fabricação em camadas) (KONIECZNY, 2003). Para obter modelos impressos com alta qualidade visual, o pós-processamento é necessário - processos como lixar, furar ou pintar podem ser aplicados ao modelo FDM para melhorar sua qualidade e/ou funcionalidade.

Geralmente, os itens fabricados com o processo FDM são usados principalmente na educação e montagem de protótipos. Como o este processo está em constante evolução, está sendo cada vez mais utilizado em áreas como bioengenharia, indústria aeroespacial e automotiva indústrias. Consequentemente, os projetistas devem entender como os itens impressos nessa tecnologia se comportam quando submetidos a cargas mecânicas e devem avaliar sua adequação para uma determinada aplicação (CAMARGO, 2019).

Para Popescu *et. al.*, (2018), o FDM é um processo relativamente complexo e altamente flexível com vários parâmetros que afetam propriedades mecânicas e relacionadas à



qualidade. Portanto, é importante investigar e estudar as propriedades mecânicas e o comportamento da FDM para diferentes categorias de materiais e conjuntos de processos parâmetros / condições de fabricação. Vale salientar que propriedades mecânicas das peças impressas usando o método FDM foram melhoradas sob a exclusão de oxigênio durante o processo de fabricação (LEDERLE *et al.*, 2016).

### 3. METODOLOGIA

Trata-se de um trabalho descritivo e qualitativo. O intervalo do estudo aconteceu entre março e junho de 2020, durante o início da pandemia do novo COVID – 19, nos Laboratórios de Automação (Lab Auto) e Gestão de Operações e Processos (LGOp), do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, da Universidade Federal de Campina Grande, onde ocorriam a fabricação de Face Shields, através da MA, para distribuição gratuita entre profissionais de saúde e de segurança pública dos Estados da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Para a produção dos Face Shields foram utilizadas 3 impressoras Ender 3, 1 Voolt 3D e 1 Da Vinci Pro, todas do tipo FDM.

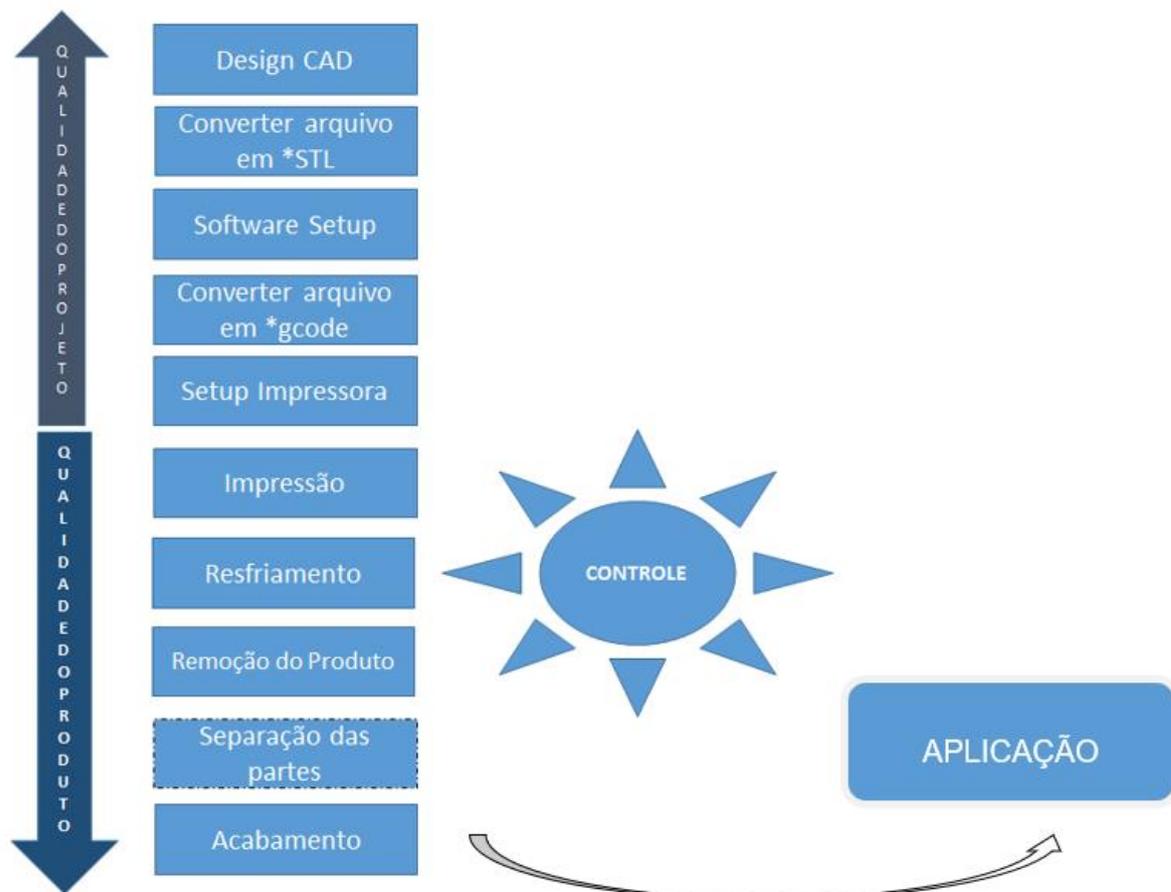
O esquema metodológico utilizado nesta pesquisa pode ser visualizado na Figura 2 e foi dividido em 4 fases. Inicialmente, foi realizado o levantamento dos dados durante o processo de produção dos Face Shields no Lab Auto e no LGOp, através de observação direta, fotografias e filmagens. Foram identificadas quantas atividades eram necessárias para realizar uma impressão 3D sem erros. Em seguida, verificou-se se estas atividades se repetiam (e a frequência delas) para determinar se eram ou não importantes para o processo de fabricação. A partir daí, foram separadas, analisadas e descritas as atividades que mais ocorreram durante o processo de impressão 3D, com o objetivo de construir o gráfico do processo genérico de produção da MA no FDM.



**Figura 2** - Esquema metodológico utilizado na pesquisa.  
**Fonte:** Autores (2020)

#### 4. RESULTADOS

O Gráfico do processo genérico de produção da MA no FDM pode ser visualizado através da Figura 3.



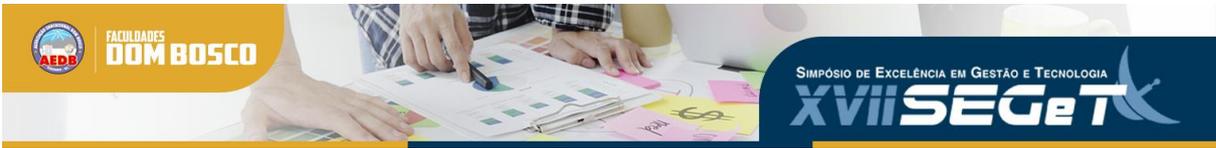
**Figura 3:** Gráfico do processo genérico de manufatura aditiva no processo de Fused Deposition Modeling  
**Fonte:** Os autores (2020)

A partir da Figura 3, são descritas as principais etapas do processo de manufatura aditiva com o uso de tecnologia FDM, nos termos aferidos durante a execução deste trabalho. A complexidade de cada uma dessas etapas vai variar de acordo com o equipamento de impressão a ser utilizado. Algumas etapas serão extremamente simples em algumas máquinas, porém complexas em outras. Podem haver mais ou menos etapas de acordo com as tecnologias embarcadas, bem como variações consideráveis no tempo de processo.

#### 4.1. DESIGN CAD

Nesta etapa, a peça a ser produzida é projetada com o uso de softwares CAD. É neste momento em que um conceito, podendo existir na forma textual, esboços ou modelos físicos, é realizado na forma de uma peça virtual em um computador. Existem diversas plataformas que podem ser usadas para o projeto das peças, tendo como padrão a característica de gerar arquivos no formato STL (abreviatura para *stereolithography*). Este formato se tornou o majoritariamente aceito na indústria de manufatura aditiva e é caracterizado por converter as estruturas sólidas em triângulos. As principais plataformas usadas atualmente são o *SolidWorks* da *Dassault Systèmes*, o *Fusion 360* e o *Inventor*, ambos da *Autodesk*, embora existam diversas outras plataformas para os mais diversos níveis técnicos de usuários, incluindo até versões simples que permitem o rápido aprendizado e prototipagem como o *Tinkercad*, também da *Autodesk*.

Um dos pontos importantes da interconexão do CAD com o FDM é a capacidade de produção de peças complexas em uma única etapa, dispensando a necessidade de montagem



posterior. Peças com dobradiças e outras partes móveis, bem como designs intrincados podem facilmente ser produzidos. Outro ponto importante é a possibilidade de impressão parcial para a avaliação de propriedades mecânicas ou ergonômicas do projeto. Como exemplo, pode-se imprimir apenas a empunhadura de um determinado produto, economizando tempo e recursos.

Assim como em outras tecnologias de manufatura, deve-se levar em conta as peculiaridades da tecnologia e do equipamento de impressão que serão empregados, bem como o material a ser utilizado. Partes com espessuras finas, detalhes, suspensas e outras peculiaridades devem ser projetadas com atenção para que não gerem problemas no momento da impressão. Espessuras finas geram dificuldades na etapa de resfriamento devido a contração, acentuada em materiais como o ABS. Peças com partes suspensas podem demandar a existência de suportes destacáveis que vão gerar mais complexidade nas etapas de acabamento da peça. Maior quantidade de detalhes irá demandar maiores tempos de processamento, impressão e maior possibilidade de falhas.

Salienta-se a importância do processo final de fabricação do produto, caso não seja a manufatura aditiva, devem-se proceder adequações. A exemplo do processo de injeção, onde o produto deve ser desmembrado nas partes que serão injetadas individualmente, caso seja necessário.

A maioria das plataformas CAD trabalha com a modelagem de sólidos que são criados a partir da combinação de superfícies, pela adição de espessura a superfícies ou pela subtração de partes de sólidos. Esse modelo de trabalho usualmente garante a continuidade da superfície gerada, evitando peças inadvertidamente vazias, o que facilita, mas não elimina a necessidade da inspeção do projeto para verificação da adequação ao processo de impressão FDM.

#### 4.2 CONVERSÃO PARA STL

A estereolitografia, nomenclatura da qual se origina a extensão STL, foi a primeira tecnologia comercial de manufatura aditiva criada nos anos 1990 (GIBSON *et al.*, 2010). O STL se tornou um padrão para a FDM e para outras tecnologias de manufatura aditiva, consistindo na descrição de uma peça em termos de sua geometria, removendo todas as demais informações do arquivo, como histórico de modelagem, nomenclatura das partes constituintes, etc. Essa descrição é feita a partir de triângulos que se encaixam de forma a construir as faces. As dimensões destes triângulos devem ser menores que a resolução da impressora para que tenhamos uma quantidade adequada de detalhes.

A maioria dos softwares CAD permite a especificação das dimensões dos triângulos constituintes do modelo, seja com maior ou menor capacidade de personalização dos modelos. Essa quantidade de detalhes da geometria, expressa pela quantidade de triângulos aumenta significativamente os tempos de processamento e, não raramente, ocorrem erros de continuidade na peça. A maioria dos sistemas de impressão já tem mecanismos de verificação e correção destas falhas, mas ainda há vários casos em que a peça, em STL, possui incoerências que comprometem a sua impressão.

Existem ainda sistemas especificamente projetados para a verificação e correção destas falhas nos arquivos STL, como o *MAGICS* da *Materialise*. Esse sistema verifica e corrige falhas nestes arquivos que podem causar problemas na sua impressão. Neste ponto, cabe-se salientar que, sendo o STL um padrão para a portabilidade de peças, muitas vezes os modelos não foram especificamente projetados para a impressão FDM e, conseqüentemente, demandam correções.



É importante também observar as dimensões da peça a ser impressa. Muitas vezes ocorre divergência entre a escala trabalhada no software CAD e o resultante arquivo em STL. Assim, cabe uma verificação das corretas dimensões no arquivo gerado.

#### 4.3 SOFTWARE SETUP

A partir do arquivo STL proveniente do sistema CAD utilizado, segue-se para a etapa de configuração dos parâmetros operacionais do equipamento de impressão. É neste momento que se definem características como: velocidade de impressão, geometria da impressão das superfícies, altura das camadas, temperatura do bico de injeção, da mesa, necessidade de ventilação, etc.

A quantidade de parâmetros disponíveis para a configuração por parte do operador varia consideravelmente de acordo com o equipamento. Equipamentos mais eficientes simplificam a maioria destes parâmetros em três ou quatro padrões de qualidade (rápido, normal e alta qualidade, por exemplo) para minimizar a demanda de trabalho nesta etapa, enquanto que equipamentos mais simples e menos dispendiosos deixam a cargo do usuário a definição de uma quantidade elevada de opções.

Os parâmetros também dependem consideravelmente do material usado para a impressão. A maioria das impressoras comerciais trabalha com PLA, ABS e PETG. Esses materiais apresentam temperaturas de fusão, contração e tempos de resfriamento diferentes. As características técnicas da impressora também podem limitar a sua matéria prima ao PLA por exemplo, já que este exige menores temperaturas de trabalho e dispensa o uso de câmaras fechadas.

Neste instante do processo, cabe-se observar a importância dos principais parâmetros que irão impactar diretamente a qualidade da peça:

- Temperatura de Impressão da Primeira Camada;
- Temperatura da Mesa de Impressão;
- Temperatura de Impressão das Demais Camadas;
- Velocidade de impressão;
- Preenchimento;
- Contração do Filamento;
- Altura da Primeira Camada;
- Altura das demais camadas;
- Orientação da Impressão.

A temperatura da primeira camada é o principal parâmetro, configurável, responsável pela adesão da peça na mesa. Caso essa adesão seja inadequada, a peça se desprende durante o processo de impressão, causando danos geralmente irreparáveis. Materiais como o ABS são mais sensíveis a esse parâmetro, exigindo assim uma maior atenção.

Já a temperatura da mesa de impressão (superfície onde a peça é moldada) vai influenciar a adesão da peça e a sua subsequente contração ao longo do processo de resfriamento. Em impressoras abertas e peças de altura elevada, essa temperatura terá impacto ainda mais relevante já que, nestes parâmetros, haverá um gradiente de temperatura mais impactante na qualidade do produto, o que muitas vezes o torna inadequado devido a incoerências dimensionais ou mesmo fraturas durante o processo.

A temperatura de impressão das demais camadas está intimamente ligada às propriedades do material do filamento usado no processo. Os filamentos, muitas vezes por terem fabricantes diferentes, possuem propriedades térmicas, particularmente a temperatura de fusão, que variam consideravelmente, exigindo assim uma configuração de acordo com fabricante do filamento. A cor também influencia, já que tem relação direta com as trocas de calor do material.

A velocidade de impressão é determinada pela reologia do polímero usado na peça, ou seja, de como é o seu comportamento em fluxo pelo bico de injeção na temperatura definida nos itens anteriores. Se a temperatura for alta, é possível uma impressão mais rápida, já que podemos injetar mais material, porém temos a consequente rugosidade nas superfícies, e, em casos extremos, entupimentos ou falhas na adesão das camadas. Assim, sistemas de impressoras mais completos, como o da impressora Da Vinci, avisam dos limites da velocidade, bem como da correta relação entre a velocidade e a qualidade da peça final. Outro parâmetro importante a ser considerado é o diâmetro do bico de injeção, que limita a velocidade da impressora quando temos maior precisão dos detalhes em diâmetros menores.

A contração do filamento é o parâmetro que irá determinar o quanto de filamento é retraído, ou seja, é retirado do bico de injeção quando há um trânsito entre partes da peça impressa. Isso evita que, ao passar por um vão, ocorram a formação de fios ou rebarbas. Existem modelos para a configuração deste parâmetro que, assim como a velocidade, variam de material para material e de acordo com o fabricante do filamento.

A qualidade da peça no tocante a definição dos detalhes nas laterais é determinada pela altura da camada. Em geral, o limite dessa altura é de 80% do diâmetro do bico de impressão, podendo chegar a 100% caso o material tenha uma fluidez adequada na temperatura definida. Camadas menores vão originar peças com acabamento superficial melhor, mas invariavelmente vão impactar negativamente o tempo de impressão.

Por sua vez, a densidade do preenchimento define quanto espaço interno da peça terá material e quanto ficará vazio. Este valor varia de 0 a 100%. Se uma peça não precisa de muita resistência, e se deseja um pouco mais de flexibilidade, o preenchimento dela pode ser entre 10 e 30%, por exemplo. Se você deseja uma peça oca, o valor de seu preenchimento será 0%. Por outro lado, se deseja uma peça com alta resistência, mais robustez, porém, com grande gasto de material e maior consumo de tempo. Portanto, esta é uma opção importante quando se pensa em economia de material e de tempo de impressão.

A orientação da impressão também é um fator de extrema importância para a qualidade final do modelo gerado. A melhor orientação de impressão é aquela no qual o modelo possui uma maior área de contato com a mesa (plataforma). Barner (2015), Cantrel *et al.*, (2017), Chacon *et al.*, (2017), Domingo-Espin *et al.*, (2015) e Sood, Odar e Mahaptra (2010) ainda atestam que quando o modelo é impresso na situação supracitada, há incremento em suas propriedades mecânicas. No entanto, salientam também que há dificuldade com os suportes (se necessário) e com maior acabamento da peça.

Além destes parâmetros, existem ainda muitos outros que podem estar disponíveis para o operador, com maior ou menor impacto de acordo com as demandas da peça a ser impressa. Com o objetivo de simplificar essa etapa, é comum fabricantes usarem um grade (uma composição específica de filamento) padrão, vendido com a sua marca, para que o processo de configuração possa ser padrão. Um exemplo deste modelo de operação são os cartuchos de filamento da impressora Da Vinci PRO da marca XYZ, que simplificam o processo de configuração deixando esse processo de impressão mais acessível a usuários menos qualificados.



#### 4.4. CONVERSÃO DO ARTIGO EM G-CODE

Após a configuração dos parâmetros operacionais da impressão, a maioria dos sistemas de impressão FDM faz a geração de um arquivo no formato G-Code, nos mesmos moldes dos arquivos gerados para máquinas CNC. Em muitas situações, esse arquivo é transferido para uma unidade de armazenamento portátil, como um cartão SD, que posteriormente será usado pelo equipamento para a execução das tarefas. Em outras situações, esse arquivo é enviado diretamente ao equipamento via rede wireless ou mesmo via cabo USB.

O G-Code é uma linguagem simples e é processada linha a linha, com apenas uma ação por vez. As ações são identificadas por uma letra no início de cada linha indicando a ação a ser tomada, por exemplo 'G28', na impressora Voolt3d significa mover todos os eixos para a origem. Uma das vantagens deste formato linha a linha é que ele pode ser facilmente interpretado por processadores sem que haja muito dispêndio de poder computacional.

#### 4.5. SETUP DA IMPRESSORA

O início da impressão propriamente dita é precedido por uma série de etapas a serem realizadas no próprio equipamento de impressão a saber: nivelamento da mesa; preparação da superfície e preparação do filamento. Essas etapas garantem que a impressão ocorrerá dentro das condições adequadas para cada peça e material.

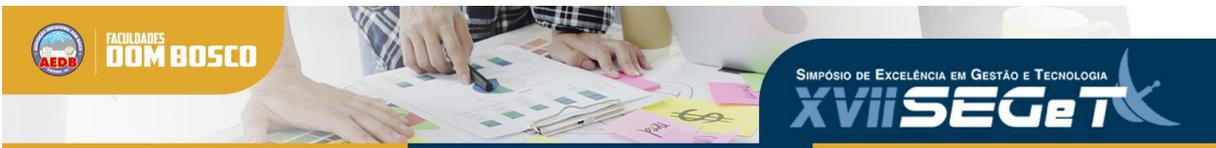
O nivelamento da mesa é o processo que garante que todos os pontos da mesa estejam ao mesmo nível no início da impressão. Isso é de vital importância pois vai assegurar que a peça seja criada em igual altura ao longo de seu corpo nos eixos X e Y. Problemas de nivelamento vão causar peças de dimensões incompatíveis e, muitas vezes, podem levar a obstrução do sistema de injeção de filamento devido a falta de espaço para a expulsão do material. Existem diversos métodos para o nivelamento, desde o totalmente manual, que envolve o ajuste dos eixos da mesa manualmente com a observação da distância do bico, geralmente em torno de 0.4mm da mesa, sendo esse ajuste executado em 4, 6 ou 9 pontos. Existem também sistemas de nivelamento automático que facilitam e aumentam a precisão deste processo.

A preparação da superfície da mesa, onde irão ser depositadas as camadas iniciais da peça, se dá pela limpeza da superfície para a remoção de resíduos de impressões anteriores, poeira, gorduras e outros possíveis contaminantes. Para isso, podem ser usados produtos específicos indicados pelo fabricante, em geral, variam de acordo com o material da mesa. Além da limpeza da superfície, dependendo do material a ser usado na impressão, pode ser necessário adicionar produtos para aumentar a adesão ou facilitar a remoção da peça.

A preparação do filamento se inicia com a medição da sua espessura, para que essa informação seja implementada no software da impressora. A espessura média do filamento, aliada a velocidade de impressão, diâmetro do bico e temperatura irão definir a espessura da camada de material depositada na peça. Após essa medição, se procede a alimentação deste filamento de acordo com as indicações do fabricante da impressora. Na grande maioria dos casos, esse processo é automatizado, partindo da colocação do filamento no alimentador, os processos subsequentes de injeção e limpeza do bico são automáticos.

#### 4.6. IMPRESSÃO

O processo de impressão se inicia com os ajustes automáticos da própria impressora para o início do processo, na maioria dos equipamentos, são feitos os movimentos dos eixos para as suas posições iniciais. Após a movimentação, e, em alguns equipamentos, em paralelo,



são feitos os aquecimentos do bico de injeção e da mesa, procedimentos que variam em tempo de acordo com as temperaturas definidas e a eficiência dos sistemas de aquecimento.

Em seguida aos procedimentos padrão da impressora, inicia-se a deposição da primeira camada. Esse é uma etapa importante no processo, já que é o instante da fixação da peça na superfície de impressão. É importante que o operador esteja atento para, na eventual falha nessa etapa, o processo seja cancelado, a superfície de impressão seja preparada novamente e o processo seja reiniciado. Essa falha é crítica ao processo, já que pode causar desperdício de material e, em muitos casos, dificuldades posteriores para a limpeza e preparação do equipamento para uma outra impressão.

Após a deposição da primeira camada, o processo ocorre de maneira mais simples, tendo o operador que fazer apenas observações em intervalos de tempo para verificar se o processo está ocorrendo de acordo com o planejado. Em materiais que têm uma contração maior, como o ABS, é importante uma observação mais detalhada para possíveis falhas dimensionais. Dado que o processo de impressão é lento, é importante que as falhas sejam detectadas o mais cedo possível.

É importante lembrar ainda que os parâmetros ambientais precisam ser controlados para se ter um melhor resultado no modelo a ser impresso. Temperatura do ambiente, umidade, ventilação, são determinantes para qualidade (ou não) da impressão.

#### 4.7. RESFRIAMENTO

Após a conclusão do processo de impressão, a etapa seguinte é o resfriamento da peça. É nesse momento que o polímero tem a temperatura, gradualmente, diminuída até que a peça possua solidez suficiente para a remoção e manipulação sem que haja deformação. Esse processo pode ser acompanhado, em casos de equipamentos mais simples, pela temperatura da superfície da peça ou pela temperatura da mesa de impressão. O padrão é que se espere até que a temperatura ambiente seja atingida. Em equipamentos mais complexos, que possuem câmara para a impressão, é comum que haja um monitoramento automatizado, havendo assim a indicação do momento em que o processo de resfriamento está concluído.

#### 4.8. REMOÇÃO DO OBJETO

Uma vez finalizado o processo de resfriamento, pode ser feita a remoção do produto da plataforma onde foi impresso. A maioria das impressoras possuem plataformas removíveis para que essa remoção possa ser executada de maneira mais eficiente. No caso de materiais de manuseio mais simples, como o PLA, essa remoção pode ser feita facilmente com o uso de espátula. O processo se dá pelo deslocamento gradual da peça da superfície de impressão, com o devido cuidado e atenção para que não haja danos no caso de peças mais detalhadas.

No caso de materiais mais complexos, como o ABS, é comum que se observem maiores dificuldades no processo de remoção devido ao uso de meios intermediários, como fitas, papéis adesivos ou colas durante o processo de preparação da mesa. Assim, é importante uma atenção redobrada nesses casos para que não ocorram danos a peça ou a plataforma de impressão.

#### 4.9. SEPERAÇÃO DA PARTES

Existem diversas situações onde a peça impressa usou suportes, ou seja, estruturas adicionais que foram adicionadas na geração do arquivo G-Code para dar sustentação a partes suspensas do produto. Existem também situações onde uma área de impressão adicional foi colocada ao redor da peça, ou mesmo camadas adicionais abaixo foram usadas para melhorar a adesão a mesa. Nestes casos faz-se necessária a remoção destas partes adicionais antes do



uso final do produto impresso. Essa remoção pode ser feita manualmente ou com ajuda de ferramentas cortantes, geralmente usando-se abrasão para melhorar o acabamento dos pontos de contato.

#### 4.10. ACABAMENTO

A última parte do processo de impressão é o acabamento do produto. Em muitos casos os modelos a serem impressos são simples, ou a sua aplicação não demanda modificações subsequentes, assim a peça já está pronta para uso. Em outras situações, temos a montagem de estruturas mais complexas a partir das peças impressas, e, nesses casos, podem ser necessárias modificações adicionais como cortes, abrasões ou similares para que haja uma conformidade dimensional da peça com o projeto. Em produtos mais elaborados, pode-se encontrar a pintura, preenchimento e outros processos mais complexos que vão exigir maiores habilidades manuais do operador.

### 5. CONCLUSÃO

O processo de manufatura aditiva pode ser descrito como um processo de fabricação baseado na adição e adesão de materiais *layer by layer*, orientadas através de informações de uma representação geométrica computacional 3D do modelo. Este artigo teve como objetivo identificar o processo genérico de manufatura aditiva no *Fused Deposition Modeling*. Neste sentido, foram identificadas 10 etapas para o processo supracitado, a saber: *Design CAD*, Conversão do arquivo em *\*STL*, *Software Setup*, Conversão do arquivo em *G-Code*, *Setup* da Impressora (estas primeiras determinam a qualidade do projeto do modelo), Impressão, Resfriamento, Remoção do Produto, Separação das Partes e Acabamento (junto com o controle de parâmetros ambientais, estas etapas determinam a qualidade do modelo impresso). Complementarmente, foram descritas cada etapa do processo supracitado, suas características e como elas podem impactar na qualidade do modelo impresso.

Com a identificação do modelo genérico do processo de fabricação supracitado, espera-se que haja uma melhor compreensão desta tecnologia e de como replicá-la de maneira mais eficiente e eficaz.

### 6. REFERÊNCIAS

- AGUILAR-DUQUE, J. I. et al. Additive manufacturing: fused deposition modeling advances. In: Best Practices in Manufacturing Processes. Springer, Cham, 2019. p. 347-366.
- ALPERN, P. Beam me up, Scotty. *Industry Week*, 259(2), pp. 46—47, 2010. AUTODESK. 2018. Instructables [Online].
- BARNER, S. Mechanical properties of additive manufactured honeycomb structures. Thesis. Mechanical Engineering - Clenson University, p 110, 2015.
- BOGERS, M.; HADAR, R.; BILBERG, A. Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 225-239, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.024>
- CANTRELL J. et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D printed ABS and polycarbonate parts. *The Society for Experimental Mechanics* pp. 89–105
- CAMARGO, J. C. et al. Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 103, n. 5–8, p. 2423–2443, 2019.
- CHACON, J. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater Des* 124:143–157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- CHEN, D. et al. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of cleaner production*, 107, 615-625, 2015 doi: [10.1016/j.jclepro.2015.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.009)



- DESPEISSE, M.; FORD, S.** The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, v. 460, p. 129–136, 2015.
- DOMINGO, E. M.; et al.** Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts. *Mater Des* 83:670–677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- GEBHARDT, A.; KESSLER, J.; THURN, L.** 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des additive manufacturing (AM). Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- GEBHARDT, A.** Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.** Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. [s.l: s.n.]. v. 5
- LEDERLE, F.** et al. Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 1, n. 1-2, p. 3-7, 2016.
- KHAN, I.** et al. Part Specific Applications of Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, v. 12, n. December 2016, p. 89–95, 2017.
- KONIECZNY, R.:** Projektowanie z wykorzystaniem narzędzi Rapid Prototyping, *Mechanik*, t.76, nr 12, 2003.
- NIAKI, M. K.; TORABI, S. A.; NONINO, F.** Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 222, p. 381–392, 2019.
- ONUH, S.O.; HON, K.K.B.** “Integration of rapid prototyping technology into FMS for agile manufacturing”, *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 12 No. 3, pp. 179-186, 2001.
- POPESCU, D.** et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review. *Polym Test* 69:157– 166, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.
- SOOD, A.K.; OHDAR, R.; MAHAPATRA, S.** Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater Des* 31(1):287–295, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>.
- VOLPATO, N.** Manufatura aditiva 1ª edição. Livro, v. 1ª edição, n. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D / organização de Neri Volpato. – São Paulo: Blucher, 2017., p. 400 p. : il., 2017.
- WOHLERS, T. T.; CAFFREY, T.; WOHLERS ASSOCIATES, I.** Wohlers report 2013 : additive manufacturing and 3D printing state of the industry : annual worldwide progress report. [s.l.] Wohlers Associates, 2013.