

Revista Brasileira de Engenharias

Data de aceite: 08/09/2025

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA IMPREGNAÇÃO DE GRAFITE PARA MANUFATURA ADITIVA

Glauco Buerger

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Andrei Buse

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

George Luiz Bleyer Ferreira

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Junelene Custorio Pruner

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Igor dos Santos Roik

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Rodrigo Blödorn

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque

Todo o conteúdo desta revista está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).



Resumo: Em um cenário industrial cada vez mais conectado e voltado à inovação, a manufatura aditiva (MA) tem ganhado destaque por representar uma metodologia de fabricação emergente, baseada na adição sucessiva de camadas para a construção de peças, o que viabiliza a produção de geometrias complexas. Por ser considerada uma tecnologia de entrada para os sistemas produtivos da Indústria 4.0, a MA tem sido objeto de diversos estudos, tanto no aprimoramento dos processos já existentes quanto no desenvolvimento de novas técnicas de fabricação por adição de camadas. Dentre as principais técnicas empregadas, destaca-se o modelamento por fusão e deposição (FDM), largamente difundido devido à sua popularidade e acessibilidade. No contexto dessa tecnologia, os parâmetros de fabricação exercem grande influência na resistência mecânica e na qualidade estética dos produtos finais. A variedade de materiais utilizados na MA é extensa, abrangendo desde metais, como titânio, aço e cobre, até polímeros, como ABS, PLA e PETG. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de peças fabricadas com filamento de PLA impregnado com grafite em pó. Para isso, foi desenvolvido um cabeçote adaptado ao equipamento Ender 3, da marca Creality, com a finalidade de permitir a inserção controlada do aditivo durante o processo de extrusão. Os ensaios de tração realizados indicaram uma redução de aproximadamente 4,8% na resistência dos corpos de prova contendo grafite, em comparação aos fabricados apenas com PLA. Apesar dessa leve diminuição no desempenho mecânico, os resultados confirmam a viabilidade da impregnação de grafite na matriz polimérica, possibilitando aplicações funcionais, como a produção de buchas autolubrificantes, entre outras soluções com maior desempenho tribológico.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Aditivos. Grafite. Propriedades mecânicas.

INTRODUÇÃO

O segmento de manufatura aditiva (MA) tem alcançado crescente relevância no cenário industrial global. Segundo um estudo conduzido pelo banco americano Goldman Sachs, a MA figura entre as oito tecnologias com maior potencial de transformação dos modelos de negócio atuais. Dados da consultoria norte-americana Wohlers Associates apontam que, entre os anos de 2013 e 2017, a receita gerada por meio da manufatura aditiva apresentou um crescimento médio anual de 25%, atingindo US\$ 7,3 bilhões em 2017 [1]. Projeções realizadas pela mesma consultoria indicam que o setor pode movimentar até US\$ 20 bilhões até o ano de 2021. Além disso, de acordo com o relatório “O Futuro do Trabalho 2018”, elaborado pelo Fórum Econômico Mundial com base em entrevistas com 313 empresas, estima-se que, nos cinco anos seguintes, 41% das companhias em âmbito global passem a adotar a MA nas suas linhas de produção. No Brasil, esse percentual é ainda mais expressivo, alcançando 49%. O setor com maior expectativa de investimento é o aeroespacial, seguido pelos segmentos de logística e transportes.

Esses dados evidenciam a relevância da manufatura aditiva no contexto da transformação digital, especialmente por sua aplicabilidade em diversos setores, como as indústrias automobilística, aeroespacial, médica, odontológica, metalmecânica, além da produção de bens de consumo personalizados. Entre as principais vantagens desse método de fabricação destaca-se a economia de insumos e a redução de resíduos, uma vez que o material é depositado apenas onde necessário, em contraste com processos tradicionais como a usinagem, que se baseiam na remoção de material.

Considerando a constante evolução tecnológica e as exigências do mercado, é evidente que a manufatura aditiva tende a expandir sua

aplicação nos próximos anos. Dentro deste campo, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas e aplicadas, como a Estereolitografia (SLA), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS) e o Modelamento por Fusão e Deposição (FDM), entre outras.

Independentemente da tecnologia utilizada, os parâmetros de fabricação exercem influência direta nas propriedades mecânicas das peças fabricadas. Dentre os parâmetros mais relevantes, destacam-se a densidade e a geometria de preenchimento, a orientação das camadas, a espessura das camadas, a velocidade de impressão e a temperatura de extrusão. Conforme descrito por Fernandes (2016), o aumento da densidade de preenchimento está associado ao acréscimo proporcional na tensão máxima suportada, no módulo de elasticidade e na tenacidade do material. Parâmetros como espessura das camadas e temperatura de extrusão também apresentam influência significativa e proporcional nas propriedades mecânicas.

Atualmente, há uma ampla variedade de filamentos poliméricos disponíveis no mercado, cada um com características distintas. Entre os mais utilizados estão o ABS (Acilonitrila Butadieno Estireno) e o PLA (Ácido Polilático). No entanto, quando as propriedades mecânicas desses materiais se tornam insuficientes para determinadas aplicações, uma alternativa viável consiste na impregnação de materiais reforçantes, evitando, assim, a necessidade de substituição completa do material base.

Um exemplo notável é o estudo desenvolvido por Matsuzaki *et al.* (2016), que demonstrou a viabilidade da impregnação de fibras de carbono durante o processo de fabricação com filamento polimérico. Os resultados obtidos indicaram um aumento significativo no módulo de elasticidade e na resistência à tração dos corpos de prova, conforme ilustrado na Fig. 1.

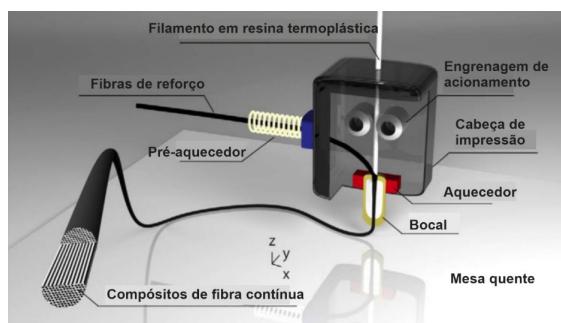


Figura 1. Sistema de impregnação de fibra de carbono [4].

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho é desenvolver um mecanismo acoplável a uma máquina com tecnologia de fabricação FDM, capaz de viabilizar a fabricação de peças com filamento de PLA impregnado com pó de grafite durante o processo de extrusão. O foco principal está na concepção e implementação de uma solução de projeto mecânico que atenda à funcionalidade proposta, permitindo a impregnação do aditivo de forma eficaz. Além disso, busca-se avaliar, de maneira visual e qualitativa, a distribuição e a quantidade de grafite incorporado às peças produzidas.

ESTADO DA ARTE

Com o crescimento exponencial da manufatura aditiva, o número de tecnologias associadas a esse método também aumentou de forma proporcional, priorizando processos mais rápidos, economicamente viáveis e com sistemas de mais compactos. Apesar das variações tecnológicas, o fluxo operacional da MA segue, em grande parte, uma sequência padrão: (1) modelagem tridimensional por meio de software CAD (Desenho Assistido por Computador) ou obtenção da geometria por escaneamento 3D; (2) conversão do modelo para o formato STL (*Standard Triangle Language*), que representa a geometria em malha de triângulos; (3) geração do arquivo *G-code*, responsável por traduzir o modelo em instruções de movimentação e parâmetros de

fabricação, camada por camada, como ilustrado na Fig. 2 e Fig. 4 [15]. Assim como em outros processos de fabricação, a escolha da matéria-prima adequada é etapa fundamental. Neste trabalho, o material selecionado foi o polímero PLA (ácido polilático), amplamente utilizado na manufatura aditiva devido à sua boa processabilidade e origem biodegradável.

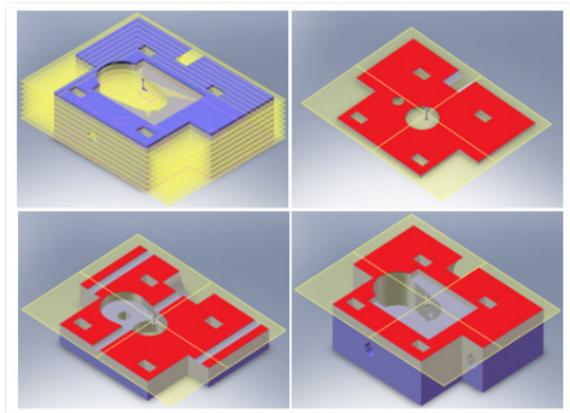


Figura 2. Simulação do fatiamento do modelo 3D (processo CAM) [16].

POLÍMERO PLA

O PLA (ácido polilático) é um polímero termoplástico sintético amplamente empregado em aplicações cotidianas, como sacolas plásticas, garrafas, canetas, tampas, bandejas, tecidos não trançados e, notadamente, como filamento para a MA. Sua composição baseia-se no ácido lático — um composto orgânico de função mista (ácido carboxílico e álcool). A produção do PLA ocorre por meio de processos biotecnológicos, nos quais bactérias sintetizam o ácido lático através da fermentação de matérias-primas vegetais ricas em amido, como milho e beterraba.

Por ser obtido a partir de fontes renováveis, o PLA destaca-se frente a outros polímeros sintéticos, especialmente em termos de sustentabilidade. Sua biodegradação ocorre em aproximadamente dois anos, contrastando significativamente com polímeros convencionais, como o poliestireno e o polietileno, que podem levar de 500 a 1 000 anos para se de-

compor. Além de seu apelo ambiental, o PLA apresenta baixo risco à saúde humana por ser atóxico; mesmo se ingerido, o material é convertido em ácido lático — substância segura e naturalmente metabolizada pelo organismo.

Do ponto de vista da engenharia, as propriedades mecânicas do PLA são fator decisivo na seleção de materiais para projetos envolvendo manufatura aditiva. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as propriedades mecânicas do PLA e do ABS, conforme dados disponibilizados pela empresa Ultimaker (2017).

Propriedades mecânicas	ABS	PLA
	Valor típico	Valor típico
Módulo de tração	1681,5 MPa	2346,5 MPa
Limite de resistência à tração	39,0 MPa	49,5 MPa
Limite de resistência à ruptura	33,9 MPa	45,6 MPa
Alongamento no limite	3,5 %	3,3 %
Alongamento na ruptura	4,8 %	5,2 %
Resistência à flexão	70,5 MPa	103,0 MPa
Módulo de flexão	2070 MPa	3150 MPa
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (à 23 °C)	10,5 kJ/m ²	5,1 kJ/m ²
Dureza	76 (Shore D)	83 (Shore D)

Tabela 1. Propriedades mecânicas do ABS e PLA [2, 3].

Ao comparar algumas propriedades entre o PLA e o ABS, observa-se que o PLA apresenta maior resistência à tração, maior resistência à flexão e maior dureza superficial. No entanto, em relação à resistência ao impacto, o ABS apresenta desempenho significativamente superior — aproximadamente o dobro do PLA.

Uma alternativa viável para aprimorar as propriedades mecânicas de peças obtidas por manufatura aditiva FDM é a impregnação de materiais de reforço durante o processo de fabricação. Dentre os materiais comumente utilizados para esse fim destacam-se fibras de

carbono, fios de algodão, barbante, entre outros. O estudo conduzido por Matsuzaki *et al.* (2016) demonstrou que a impregnação de fibras de carbono no PLA durante a extrusão do material elevou o módulo de elasticidade para $(19,5 \pm 2,1)$ GPa e a resistência à tração para $(185,2 \pm 24,6)$ MPa. Esses valores correspondem a aumentos de 599% e 435%, respectivamente, em comparação às peças produzidas com PLA puro, evidenciando ganhos expressivos nas propriedades mecânicas.

De forma similar, Yang *et al.* (2017) investigaram a produção de peças com impregnação utilizando filamento de ABS, obtendo um aumento de 180% na resistência à flexão e 372% no módulo de flexão, com valores finais de 127 MPa e 7,72 GPa, respectivamente. Os autores ainda compararam o desempenho mecânico das peças com impregnação com outros processos de fabricação, como moldagem por injeção com ABS puro e com ABS reforçado com fibra de carbono. Conforme ilustrado na Fig. 2, os maiores valores de resistência à flexão foram obtidos por meio da moldagem por injeção com ABS e fibra de carbono, seguidos pelos resultados da FDM com impregnação, demonstrando que esta é uma técnica promissora para melhorar o desempenho estrutural de peças fabricadas por manufatura aditiva.

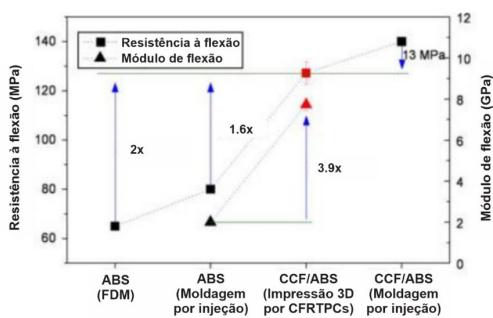


Figura 2. Valores de resistência à flexão (eixo à esquerda) e módulo de flexão (eixo à direita) de cada processo [5].

As propriedades mecânicas do material

utilizado exercem influência direta sobre o desempenho estrutural da peça em operação. Contudo, além da seleção adequada do material, os parâmetros do processo também desempenham um papel determinante nas características mecânicas finais do componente fabricado.

MANUFATURA ADITIVA

Na área de manufatura aditiva, diversas tecnologias de fabricação são empregadas, destacando-se a Estereopolitografia (SL), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). A impressão por estereopolitografia baseia-se na fotopolimerização de resinas líquidas, ativada pela incidência de um feixe de laser ultravioleta de alta precisão, que induz uma reação fotoquímica nas regiões específicas da peça. O modelo tridimensional é previamente processado em um software de fatiamento, responsável por gerar o código de controle da máquina. Durante a fabricação, o laser incide seletivamente sobre a superfície da resina, solidificando apenas as áreas correspondentes à geometria da camada atual. A cada nova camada curada, a plataforma onde as peças são construídas desloca-se no eixo Z em pequenos incrementos — geralmente na ordem de décimos ou centésimos de milímetro — permitindo a deposição e a cura subsequente da próxima camada, conforme ilustrado na Fig. 3 (da esquerda para a direita).

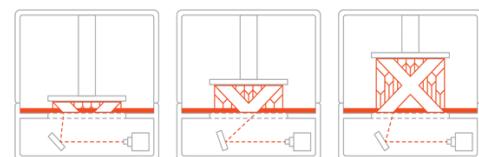


Figura 3. Processo de Estereopolitografia SL [14].

A estereopolitografia dispõe de uma ampla gama de polímeros fotosensíveis disponíveis comercialmente, incluindo resinas com propriedades específicas, como flexibilidade, resistência à água e transparência. Estas resinas

são capazes de simular o comportamento mecânico de diversos materiais, como poliamida (PA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e polipropileno (PP). Dentre os materiais utilizados nesse processo, destaca-se atualmente o emprego de resinas epóxi contendo acrilato em sua composição [9].

O processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) baseia-se na construção tridimensional de peças por meio da sinterização de pós, realizada com um laser de CO₂ de média potência (entre 50 e 1 000 W). Assim como em outras tecnologias de manufatura aditiva, a fabricação tem início com o modelamento tridimensional da peça em *software CAD*, cujo arquivo é posteriormente convertido para um formato compatível com o sistema do equipamento. Esse arquivo é processado por um *software CAM*, que realiza a fatiamento do modelo em camadas bidimensionais, possibilitando a fabricação em etapas sucessivas [9].

Durante o processo, o pó do material é depositado na câmara de construção, mantido a uma temperatura próxima, porém inferior, ao ponto de fusão do material. Esse ambiente é controlado por uma atmosfera inerte, geralmente composta por gás nitrogênio. O feixe de laser percorre a superfície da camada de pó, fornecendo energia térmica suficiente para fundir seletivamente as partículas e formar a primeira camada da peça. Em seguida, a plataforma de construção é rebaixada, uma nova camada de pó é distribuída sobre a anterior, e o processo se repete até a fabricação completa da peça, conforme ilustrado na Fig. 4 [9].

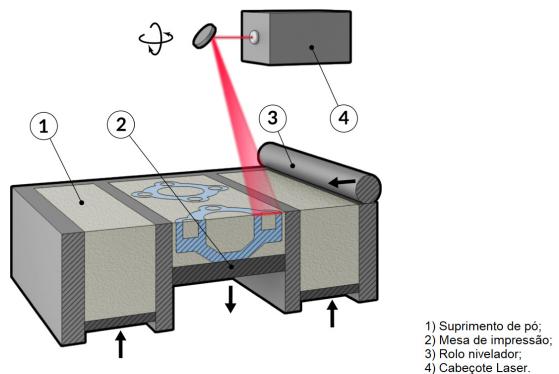


Figura 4. Processo de Sinterização Seletiva a Laser [19].

A atmosfera controlada na câmara de construção desempenha papel fundamental na prevenção da oxidação do material, além de eliminar o risco de explosão das finas partículas de pó presentes no ambiente. O pré-aquecimento da câmara otimiza o processo de sinterização, mantendo o material ligeiramente abaixo da temperatura de fusão. Dessa forma, o laser pode operar com menor potência e realizar movimentos mais rápidos sobre cada camada, aumentando a eficiência do processo [9].

Após a finalização da peça, o pó não sintetizado, utilizado apenas como suporte, pode ser reaproveitado em ciclos subsequentes, respeitando limites para evitar a degradação do material causada pelo uso repetido, o que contribui para a minimização dos resíduos gerados. Os materiais aplicados no processo SLS são, em geral, matrizes poliméricas que podem conter aditivos diversos, incluindo metais, conforme demonstrado na Tabela 2.

Nomenclatura comercial	Descrição	Propriedades
PA 12	Poliamida	Polímero de ampla utilização, geralmente aplicado na fabricação de protótipos funcionais
Alumida	Liga de poliamida com alumínio	Resistência a altas temperaturas e melhor usinabilidade (comparada à poliamida normal)

PA-GF	Pó de poliamida preenchido com partículas de vidro	Excelente rigidez, alta densidade e resistência à tração combinadas com baixa massa específica
TPU 92A-1	Poliuretano termoplástico de borracha	Alta resistência à ruptura e abrasão, alta resistência ao carregamento dinâmico e boa resistência térmica (-20 °C à 80 °C).
Carbonmide	Poliamida reforçada com fibra de carbono	Excelente rigidez e uma relação massa-força maximizada

Tabela 2. Exemplos de materiais empregados na fabricação por SLS.

Entre as vantagens do processo SLS destaca-se a boa rigidez das peças, resultado da utilização de materiais termoplásticos na fabricação dos protótipos. Além disso, não são necessárias estruturas de suporte, pois o pó não sinterizado permanece no local durante toda a fabricação, atuando como suporte natural para a peça. Como a sinterização não funde completamente o material, mas fornece energia suficiente para promover a coalescência molecular das partículas de pó, é possível imprimir diversos tipos de materiais, tais como náilon, elastômeros, poliamidas com microesferas de vidro, entre outros [10].

Outro método de manufatura aditiva bastante difundido é a modelagem por fusão e deposição (FDM). Devido à sua construção facilitada, esse método tornou-se o mais comum entre os equipamentos comerciais. Nesse processo, filamentos de resina termoplástica aquecida são depositados a partir de uma cabeça de extrusão que se movimenta nos planos x e y. O material termoplástico, fornecido na forma de fio, é alimentado a partir de uma bobina. A cabeça deposita os filamentos sobre uma plataforma, formando a primeira camada do componente. A base é mantida a uma temperatura inferior à do material extrudado para que a resina endureça rapidamente. Após essa etapa, a plataforma se desloca no eixo vertical (z) e a cabeça deposita a camada subsequente. Esse ciclo se repete até a construção completa do protótipo. Quando necessário, estruturas de suporte são produzidas para garantir a estabilidade da peça durante

a fabricação. Esses suportes podem ser feitos do mesmo material, porém com menor resistência, ou de materiais separados, geralmente removíveis, que se fixam à peça por meio de junções perfuradas [11].

Comparado aos processos anteriores, o FDM apresenta maior economia, pois deposita material somente nas áreas necessárias, reduzindo o desperdício e a necessidade de limpeza. Outra vantagem é seu menor espaço físico requerido, uma vez que os motores de acionamento demandam menos potência e resfriamento do que os sistemas baseados em lasers.

PARÂMETROS DE PROCESSO

Assim como nos processos de fabricação onde há a remoção de material, os parâmetros de fabricação na manufatura aditiva influenciam diretamente o tempo de produção, nas propriedades mecânicas das peças e no custo do processo. Na tecnologia FDM, os principais parâmetros de controle incluem: (1) a espessura da camada, que corresponde ao avanço da máquina no eixo Z e está diretamente relacionada ao diâmetro do bico de extrusão. A variação desse parâmetro possibilita a obtenção de peças com maior detalhamento ao reduzir a altura da camada; inversamente, o aumento da espessura resulta em peças com menos detalhes, porém com tempo de fabricação reduzido. As propriedades mecânicas seguem comportamento similar, conforme demonstrado na Tab. 3.

Espessura de camada (mm)	Resistência a tração (MPa)	Proporção (%)
0,05	27,22	100,00
0,10	25,38	92,77
0,15	22,33	81,80
0,20	19,47	70,26
0,25	17,53	63,73
0,30	16,36	58,58
0,35	16,15	56,20

Tabela 3. Relação entre espessura de camada e tensão máxima [6].

A variação do diâmetro do bico de extrusão (2) influencia diretamente o nível de detalhe e o tempo de fabricação: diâmetros menores proporcionam maior detalhamento, enquanto diâmetros maiores resultam em processos mais rápidos. O número de filetes na parede (3), que corresponde à estrutura lateral da peça, afeta sua resistência — um menor número de filetes tende a gerar uma peça mais frágil, enquanto um número maior aumenta sua robustez. A densidade de preenchimento (4), ou gap (espaçamento entre filamentos adjacentes), representa a porcentagem de preenchimento do modelo. Alterações nesse parâmetro, variando de 0 a 100%, promovem um aumento progressivo na resistência à tração, conforme demonstrado na Tab. 4.

Preenchimento (%)	Resistência a tração (MPa)
100	25,65
90	22,73
80	18,81
70	16,27
60	13,46
50	11,15

Tabela 4. Relação entre preenchimento e tensão máxima [6].

O tipo de padrão de preenchimento (5) altera a resistência à compressão e a resistência à tração. As geometrias mais utilizadas são as lineares e as hexagonais, conforme Fig. 5.

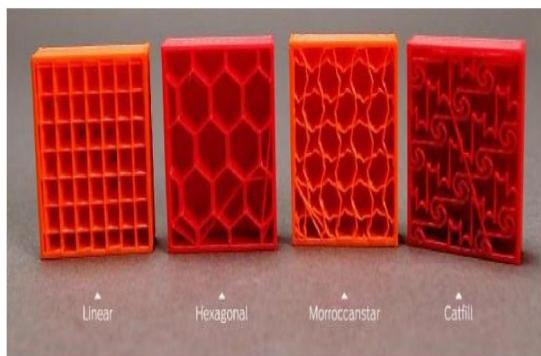


Figura 5. Tipo de preenchimento [20].

A velocidade de extrusão e a velocidade de deslocamento (6) influenciam diretamente o tempo total de fabricação da peça. Cada tipo específico de material (7) exige uma faixa de temperatura adequada para a extrusão; por exemplo, o PLA é recomendado para trabalhar entre 195 °C e 210 °C.

Ao analisar os parâmetros mencionados, observa-se que as propriedades mecânicas das peças produzidas por manufatura aditiva podem variar significativamente conforme os ajustes realizados nos parâmetros de impressão. Dessa forma, essa tecnologia permite a fabricação de uma ampla variedade de peças, atendendo a diferentes aplicações — desde protótipos funcionais até itens decorativos, de componentes que exigem alta resistência mecânica até peças flexíveis — tudo isso pela simples alteração dos parâmetros de fabricação.

APLICAÇÃO

A manufatura aditiva tem se mostrado cada vez mais vantajosa ao longo dos anos, evidenciando sua aplicabilidade tanto no ambiente fabril quanto no uso doméstico. Um dos exemplos mais claros de sua aplicação industrial é a prototipagem, cuja principal vantagem é permitir a construção rápida de modelos em escala real ou reduzida para análise conceitual de projetos. Além disso, surgem oportunidades de comercialização de produtos derivados dessa tecnologia, como solas de sapatos e óculos de natação feitos sob medida, itens de decoração, projetos de robótica com fins educacionais, entre outros. As tecnologias de prototipagem rápida têm se consolidado em diversos setores, abrangendo desde a indústria aeroespacial e automotiva até equipamentos odontológicos, cirúrgicos e outras aplicações médicas. Na imagem abaixo, é possível identificar um *scaffold* polimérico fabricado em biomaterial pelo processo de sinterização seletiva a laser.

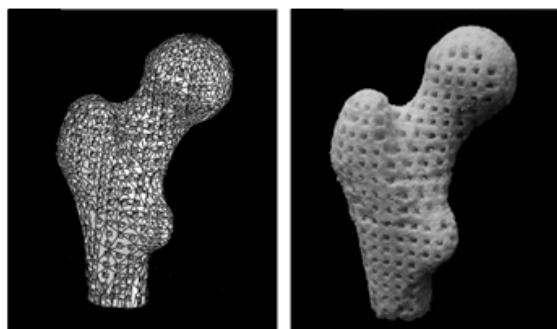


Figura 6. Modelo de *scaffold* fabricado por tecnologia SLS (Adaptado de DUAN e WANG, 2010).

Os *scaffolds* são estruturas porosas tridimensionais que podem ser implantadas em defeitos ósseos para estimular a regeneração do tecido, funcionando como suporte estrutural para o tecido recém-formado (Solano, 2013). A sinterização seletiva a laser foi empregada neste caso devido à sua versatilidade na construção de geometrias complexas, além da capacidade de sinterizar polímeros biocompatíveis e/ou bioreabsorvíveis, que podem ser degradados ou metabolizados naturalmente pelo organismo. Ademais, este processo permite o controle preciso da porosidade e da microestrutura do material.

Segundo Solano (2013), já é possível produzir *scaffolds* impressos em policaprolactona contendo ibuprofeno — um anti-inflamatório não esteroide amplamente utilizado. A incorporação desse medicamento na microestrutura do *scaffold* viabiliza seu uso para controle de processos inflamatórios após o implante, evidenciando a ampla gama de aplicações da tecnologia SLS.

MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento do projeto é utilizado um equipamento de MA com tecnologia FDM Ender 3, da fabricante Creatily, conforme Fig. 7. Este apresenta mesa aquecida, área de construção de 230 mm X 230 mm X 250 mm, com o objetivo de auxiliar na validação do concei-

to de cabeçote para impregnação do filamento de PLA com grafite. Adotou-se a utilização de grafite para lubrificação comercial.



Figura 7. Equipamento Ender 3, da fabricante Creatily [18].

Para avaliar o desempenho das peças com impregnação de grafite em comparação às peças fabricadas exclusivamente em PLA, foram realizados ensaios de tração e de rugosidade superficial. As amostras utilizadas nesses testes foram produzidas por meio dos seguintes parâmetros: altura de camada de 0,2 mm, três filetes de parede, preenchimento de 100% com geometria do tipo grade, temperatura do bico extrusor de 210 °C e temperatura da mesa de 50 °C.

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Pantec Versat 300 kN, da fabricante Panantec (Fig. 9), com capacidade máxima de carga de 300 kN e precisão de 1 µm no deslocamento. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D638-02a (2002), tipo IV, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, conforme especificado na norma. Vale destacar que esta norma não é amplamente adotada para avaliação de materiais produzidos por manufatura aditiva, sendo utilizada aqui como referência técnica.

Foram fabricados três corpos de prova para cada condição experimental (PLA puro e PLA com grafite). A partir dos dados obtidos nos ensaios, foram calculadas as médias e os intervalos de confiança para análise comparativa dos resultados.



Figura 9. Máquina para ensaio de tração.

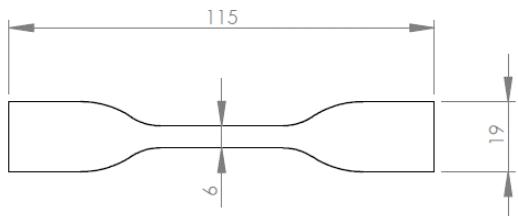


Figura 10. Geometria corpo de prova, conforme norma ASTM D638-02a (2002).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para executar a impregnação do grafite no polímero PLA, dois conceitos foram desenvolvidos: o conceito beta e o conceito alfa. O conceito beta é caracterizado por dois discos de aço (discos de corte), normalmente utilizados para cortar tubos de alumínio, com o objetivo de abrir uma ranhura nas laterais do

filamento. Em seguida, por meio de um canal de alimentação, o grafite é depositado nessas ranhuras antes da extrusão, conforme ilustrado na Fig. 11.

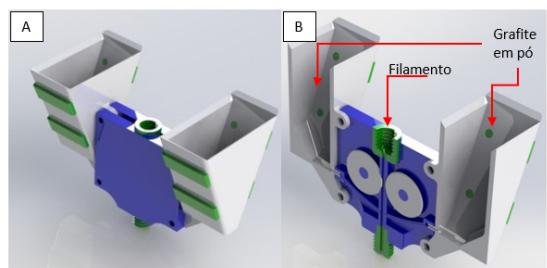


Figura 11. Cabeçote misturador beta: (A) Vista completa e (B) Vista em corte.

Entretanto, esse conceito não se mostrou eficaz, pois os canais produzidos pelos discos de corte eram muito pequenos, o que impedia a deposição adequada do grafite. Por esse motivo, desenvolveu-se a ideia do cabeçote alfa, no qual os discos de corte foram eliminados, e o grafite passa a acompanhar o filamento por gravidade até o bico extrusor, conforme ilustrado na Fig. 12.

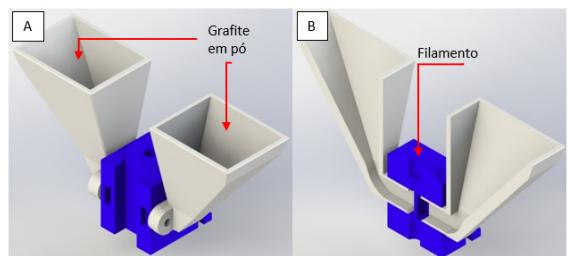


Figura 12. Cabeçote misturador alfa: (A) vista completa e (B) vista em corte.

O cabeçote misturador versão alfa tem como componentes: (1) funil, (2) encaixe do funil e (3) bloco misturador, conforme pode ser observado na Fig. 13.

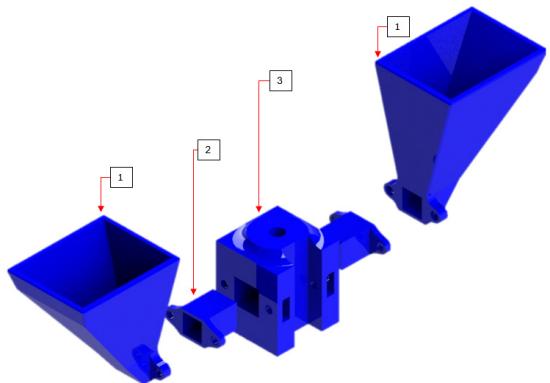


Figura 13. Componentes do cabeçote versão alfa.

O filamento passa por dentro do bloco e, em seguida, é direcionado ao extrusor da máquina. A lógica de impregnação consiste em manter uma coluna de grafite nas laterais do filamento, de modo que ele arraste o grafite até o bico extrusor. A alimentação ocorre por gravidade, por meio de dois funis. Todas as peças do cabeçote foram fabricadas no mesmo equipamento (Ender 3, da fabricante Creality). O cabeçote foi montado sobre a extrusora, conforme ilustrado na Fig. 14.

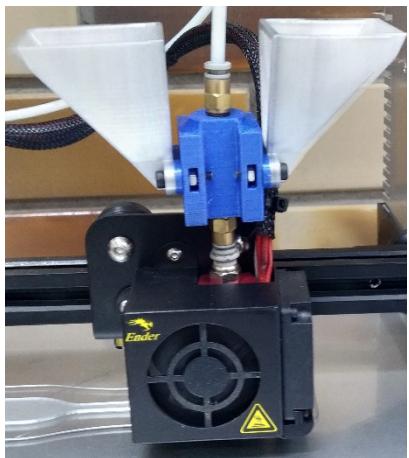


Figura 14. Cabeçote montado sobre a extrusora.

A partir dos primeiros testes de fabricação das peças, observou-se um aumento na quantidade de grafite impregnado, conforme evidenciado na Fig. 15. A necessidade de modifi-

car o projeto surgiu pelo fato de que a presença do grafite não era visível e o bico extrusor entupia com frequência. Para aumentar a vazão de grafite, alterou-se a geometria do funil de alimentação, ampliando-se em 55% o ângulo de entrada, como ilustrado na Fig. 16. Além disso, a temperatura de extrusão foi elevada de 200 °C para 210 °C, valor definido por meio de testes. Apesar da recomendação do fabricante para situar a extrusão do PLA entre 190 °C e 200 °C, a presença de outro material exige maior temperatura, devido às diferenças nos coeficientes de condução térmica. Essas alterações impactaram diretamente nos resultados, com aumento na impregnação de grafite visível na superfície das peças e redução das interrupções durante o processo de extrusão.

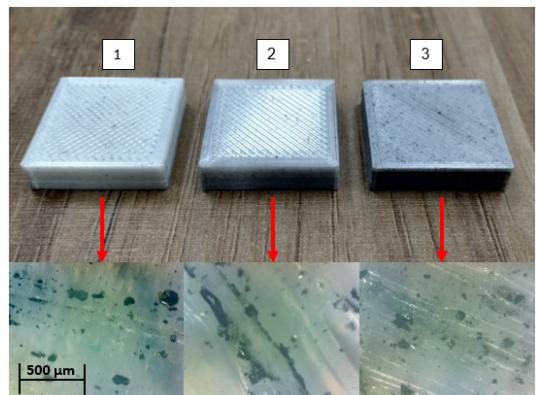


Figura 15. Testes iniciais com o cabeçote de alimentação e microscopia para visualização do grafite nas peças.

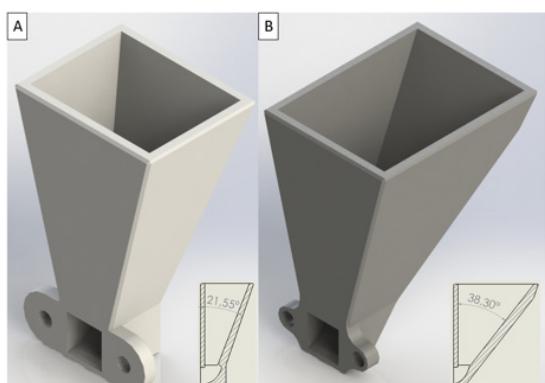


Figura 16. Geometria do funil de alimentação: (A) primeiro conceito, (B) segundo conceito.

Para a comparação entre as peças confecionadas exclusivamente em PLA e aquelas produzidas com PLA impregnado com grafite, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova impressos com ambos os materiais. Os resultados indicaram uma redução na resistência mecânica dos corpos de prova com impregnação de grafite em relação aos produzidos apenas com PLA. O corpo de prova fabricado somente com PLA suportou uma carga de aproximadamente $(8,2 \pm 0,12)$ kN (Fig. 18), enquanto o impregnado com grafite suportou cerca de $(7,8 \pm 0,10)$ kN (Fig. 19), representando uma redução de 4,8%. Essa diminuição de resistência está relacionada ao fato de que o grafite não se funde ao polímero, sendo apenas incorporado ao PLA fundido. Após o resfriamento do material, o grafite permanece na peça, o que contribui para uma maior fragilidade estrutural.

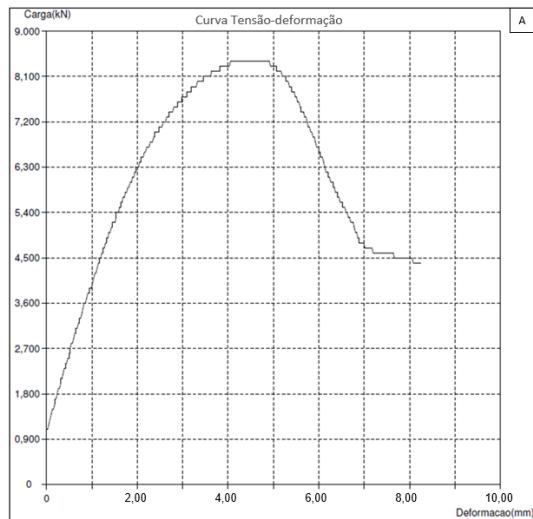


Figura 18. Gráfico carga versus deformação do corpo de prova somente de PLA.

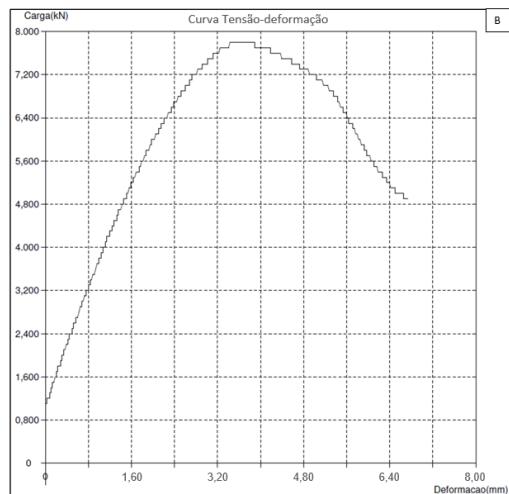


Figura 19. Gráfico carga versus deformação do corpo de prova de PLA com grafite.

O grafite é um lubrificante sólido amplamente utilizado na indústria, sendo aplicado em buchas de latão autolubrificantes, na lubrificação de componentes de deslizamento, entre outros. Com esse propósito, a impregnação de grafite em peças produzidas por manufatura aditiva abre possibilidades para a fabricação de buchas autolubrificantes, por exemplo, como uma alternativa de menor custo. Em comparação com peças reforçadas com fibra de carbono, as peças impregnadas com grafite apresentam menor resistência mecânica, porém incorporam as propriedades lubrificantes características do material. Em buchas de bronze grafitado, a presença do grafite aumenta a vida útil do componente e reduz o coeficiente de atrito, efeito semelhante pode ser esperado ao se adicionar grafite a peças em PLA.

CONCLUSÕES

Atualmente, existem no mercado filamentos com grafite em sua composição que custam, em média, R\$170,00 por quilograma. Este projeto, por sua vez, demonstrou a viabilidade da impregnação de grafite diretamente durante o processo de manufatura aditiva FDM, utilizando filamento de PLA e grafite em pó, resultando em um custo aproximado de R\$ 115,00 por quilograma.

Com essa técnica de impregnação, torna-se possível fabricar mancais de deslizamento, buchas autolubrificantes, apoios para elementos móveis, entre outras aplicações.

Todas as peças necessárias para o desenvolvimento do projeto foram fabricadas por meio da própria MA, o que permitiu manter o baixo custo de execução.

A partir deste estudo, observa-se também a viabilidade de impregnação de outros tipos de materiais, como pó de alumínio, pó de vidro, entre outros. No entanto, a diferença entre os pontos de fusão desses materiais e do PLA é um fator que deve ser considerado e estudado para garantir a eficiência do processo.

REFERÊNCIAS

- 3DLAB. **Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios! 2018.** Disponível em: <[https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficos/](https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/)>. Acesso em: 23 ago. 2019.
- AB, Manufacturing Guide Sweden. **Selective Laser Sintering, SLS.** Disponível em: <<https://www.manufacturingguide.com/sv/selective-laser-sintering-sls#>>. Acesso em: 26 set. 2019.
- ABREU, Sofia Alexandra Chaves. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo.** 2015. 259 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Feup - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.
- AGUIAR, Magna Caires. **AVALIAÇÃO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA EM IMPRESSÃO 3D COMO UMA INOVAÇÃO TECNOLOGICA APlicada ao DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS – UM ESTUDO MULTICASO.** 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, Marília, 2013.
- AZOMSEP. **Grafite (c) - Classificações, propriedades e aplicações de grafite.** 2002. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1630&Lang=pt>>. Acesso em: 29 jul. 2019.
- Chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Yi Cao, Dichen Li, (2017) “**3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance**”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 23 Issue: 1, pp.209-215, <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>
- FERNANDES, João Francisco Miranda. **Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA.** 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.
- Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B. (2010). **Additive manufacturing technologies.** New York: Springer.
- GUO, Haichang et al. Recent advances on 3D printing graphene-based composites. **Nano Materials Science**, Beijing, v. 1, n. 2, p.101-115, jun. 2019.
- HONGBIN et al. **The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties.** Rapid Prototyping Journal, v.24, p. 80-92, 2017.
- MATSUZAKI, Ryosuke et al. **Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation.** Scientific Reports, [s.l.], v. 6, n. 1, p.1-7, 11 mar. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep23058>.
- O AVANÇO DA IMPRESSÃO 3D: Aplicações na área da saúde e na indústria impulsoram crescimento de 25% ao ano dessa técnica de manufatura aditiva.** São Paulo: Fapesp, 01 fev. 2019. Mensal. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/02/11/o-avanco-da-impressao-3d/>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

RAULINO, Bruno Ribeiro. **MANUFATURA ADITIVA: DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPEGEM RÁPIDA BASEADA NA TECNOLOGIA FDM (MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO)**. 2011. 152 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SANTOS, Fernando César dos. **DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA EQUIPAMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)**. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufsc - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

STALICK, Andy. **2D Tools for 3D Printing**. Disponível em: <<http://slides.com/andystalick/toolsfor3dprinting/fullscreen#/12/3>>. Acesso em: 21 out. 2019.

STETZ, Kyle. **Selective Laser Sintering (SLS)**. Disponível em:<<https://kylestetzrp.wordpress.com/2009/05/20/selective-laser-sintering-sls/>>. Acesso em: 09 maio 2018.

TECHNOLOGIES, Wishbox. **Creality Ender 3**. 2018. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/impressora-3d/ender-3/>>. Acesso em: 16 set. 2019.

ULTIMAKER. Ultimaker (Org.). **Ficha técnica ABS**. 2017. Disponível em: <<https://ultimaker.com/download/67639/TDS%20ABS%20v3.011-por-PT.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2019.

ULTIMAKER. Ultimaker (Org.). **Ficha técnica PLA**. 2017. Disponível em: <<https://ultimaker.com/download/67603/TDS%20PLA%20v3.011-por-PT.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2019.

VOLPATO, Neri et al (Org.). **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.