



Propriedades mecânicas do compósito polimérico com matriz de resina fotocurável reforçada com pó de espinelio em proporções de 3% e 5%, utilizado no processo de impressão 3D por estereolitografia

Jackson Lima Menezes¹; 0000-0003-2593-1891
Roberto de Oliveira Magnago^{1,2}; 0000-0003-0910-1572
Aline Rodrigues Botelho¹; 0000-0002-5698-1886
Victoria Picchi Chiarello¹; 0009-0004-7373-132X
Giovanna Pena Lopes¹; 0009-0005-0525-7299
Maria Luiza Calderon dos Santos¹; 0009-0008-2118-2452
Ana Luíza Costa Camargo¹; 0009-0002-8100-3408
Ronald Palandi Cardoso²; 0000-0002-7335-2280

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
jackson.menezes@foa.org.br (contato principal)
2 – UERJ-FAT, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Resende, RJ.

Resumo: Este artigo aborda o crescimento da manufatura aditiva em conjunto com área de desenvolvimento de novos materiais, com foco no uso do método de impressão 3D por estereolitografia (SLA). O estudo explorou a incorporação de pó de espinelio ($MgAl_2O_4$) com resina fotocurável. A pesquisa teve como objetivo principal avaliar o desempenho mecânico do material compósito, considerando propriedades como resistência mecânica, flexibilidade e dureza. A pesquisa também integra conceitos de produção aditiva à sustentabilidade, mostrando a importância de trabalhar com materiais de descarte, como o espinelio utilizado nesta dissertação, aumentando seu ciclo de vida, visando minimizar o impacto ambiental. O objetivo foi desenvolver e caracterizar um compósito com resina fotocurável da marca 3Dprime® reforçado com pó de espinelio ($MgAl_2O_4$) fornecido pela Saint Gobain®, em concentrações de 3% e 5%, em duas condições distintas: moído e não moído, para submetê-las no processo de impressão 3D por estereolitografica. Os resultados foram comparados com a resina pura, onde o compósito apresentou resistência inferior, diminuindo assim a capacidade do material em suportar as cargas de tração e flexão. De um modo geral, o pó de espinelio como reforço na matriz polimérica da resina fotocurável não contribuiu asseguradamente para a resistência mecânica. No que engloba a impressão 3D por estereolitografia (SLA), é possível confeccionar peças com o material compósito desenvolvido nesta dissertação, desde que o tempo máximo de impressão seja de 5 horas, para evitar que o material decante no tanque de resina. O método desenvolvido neste trabalho resultou no registro de uma patente, comprovando sua relevância científica e aplicabilidade prática.

Palavras-chave: espinelio, resina fotocurável, polímero, estereolitografia.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D por estereolitografia (SLA), destaca-se como uma técnica inovadora que permite a fabricação de peças complexas com alta precisão dimensional. A otimização de materiais específicos para esse método é relevante para ampliar suas aplicações em setores como medicina e engenharia de precisão. De acordo com Rodrigues et al. (2017), a produção aditiva tem crescido rapidamente, impulsionando a inovação industrial ao permitir a criação de geometrias complexas e otimizar processos produtivos [1]. A revista Pesquisa FAPESP (2023) reforça que a impressão 3D oferece maior flexibilidade, menor custo e capacidade para fabricar peças desafiadoras por métodos tradicionais, possibilitando produtos personalizados conforme necessidades individuais [2].

Além disso, a manufatura aditiva acelera o desenvolvimento de protótipos e produtos finais, permitindo ajustes rápidos conforme demandas do mercado (Pereira, 2022) [3]. Paralelamente, o uso de materiais de descarte na produção aditiva aparece como alternativa sustentável relevante para minimizar impactos ambientais. Segundo a Associação Brasileira de Resíduo e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), o Brasil gerou 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2022, dos quais 33,3 milhões foram descartados incorretamente [4]. Setores como mineração, com baixas taxas de aproveitamento de matéria-prima, são grandes geradores desses resíduos industriais com potencial poluente (Vidal et al., 2014) [5].

A integração da manufatura aditiva com o reaproveitamento de resíduos sólidos contribui para a sustentabilidade ambiental e econômica. Conforme Gibson et al. (2014), a pesquisa contínua em novos materiais é fundamental para expandir as aplicações da impressão 3D e explorar todo seu potencial [6]. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um compósito à base de resina fotocurável reforçada com pó de espinélio ($MgAl_2O_4$) nas proporções de 3% e 5%, adequado para impressão 3D via estereolitografia. Busca-se não só ampliar as possibilidades de materiais para manufatura aditiva, mas também incentivar o uso sustentável de resíduos industriais.

A revolução promovida pelas impressoras 3D impacta setores variados, da medicina à construção civil. No entanto, a diversidade limitada de materiais disponíveis para impressão ainda restringe seu potencial. O desenvolvimento de novos materiais, com propriedades



específicas — térmicas, elétricas, mecânicas — é relevante para ampliar as aplicações e eficiência da impressão 3D (Lim et al., 2016) [7].

Um estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) destaca que o comércio de resíduos industriais movimentava cerca de R\$ 250 milhões por ano no Brasil, com potencial para atingir R\$ 1 bilhão [8]. Isso reforça a relevância econômica além da ambiental no reaproveitamento desses materiais. Gibson (2014) compara a manufatura aditiva com processos tradicionais, ressaltando menor consumo de matéria-prima e energia, caracterizando-a como uma alternativa sustentável [9].

Assim, o desenvolvimento de novos materiais para impressão 3D não só amplia aplicações técnicas, mas também oferece avanços importantes em sustentabilidade, economia e inovação.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um material composto por resina fotocurável reforçada com pó de espinélio ($MgAl_2O_4$) em proporções de 3% e 5%, formulado para utilização em impressora 3D por estereolitografia.

MÉTODOS

Materiais: utilizou-se pó de espinélio ($MgAl_2O_4$) fornecido pela Saint Gobain® - Vinhedos-SP, e resina fotossensível para impressão 3D de baixo odor e cura rápida da 3Dprime®.

Quadro 1 - Especificação do pó de espinélio e resina

Espinélio ($MgAl_2O_4$)		Resina fotossensível	
Fabricante: Saint Gobain®		Fabricante: 3Dprime®	
Tamanho das partículas	1,50µm	Composição	resina acrilada, catalizador UV e pigmentos.
Tamanho do cristalino	190nm	Densidade	1,1g/ml
Densidade	3,56g/cm ³	Tonalidade	Satandart Cinza Claro
Composição de 99,9% em peso de $MgAl_2O_4$			



Fonte: (desenvolvida pelo autor)

As etapas do trabalho envolveram: caracterização do pó de espinélio, moagem, modelagem dos corpos de prova, homogeneização da resina com o pó, impressão 3D, processo de cura e caracterizações mecânicas.

O pó de espinélio foi caracterizado sem moagem por meio de difração de raios X (XRD), utilizando radiação Cu-K α , com varredura entre 10° e 80°, passo angular de 0,05° e tempo de 3 segundos por ponto. Para análise morfológica, foi utilizado microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca HITACHI® TM3000.

A moagem foi realizada com moinho FRITSCH® Pulverisette P-5, com vasos e esferas de carbeto de tungstênio (10 mm), rotação de 250 rpm, relação de massa 6:1 (esferas:pó) e tempo de 60 minutos. Essa escolha visou reduzir a contaminação do pó e preservar suas propriedades.

Os corpos de prova foram modelados no software AutoCAD® 2024 3D e exportados em formato .stl. A modelagem considerou as normas ASTM D638 (tração, Tipo III) e ASTM D790 (flexão). Devido às limitações da impressora, os corpos de prova para tração foram reduzidos para 68% do tamanho original.

Foram realizadas quatro misturas: resina com espinélio moído e não moído, em proporções de 3% e 5%. Foram usados 90 ml de resina para os compósitos com 3% e 150 ml para os de 5%. A homogeneização foi feita com misturador rotativo Fisatom® por 60 minutos. Um ajuste no eixo Z da hélice permitiu melhor agitação, evitando decantação.

Utilizou-se uma impressora FLASHFORGE 3D PRINTER dOne 3D®. O arquivo foi configurado no software FlashDLPrint. Inicialmente, as peças foram dispostas na vertical, o que resultou em tempo de impressão de mais de 15 horas e decantação do material. A solução foi posicionar os corpos de prova na horizontal, reduzindo o tempo para cerca de 35 minutos e garantindo homogeneidade na impressão.

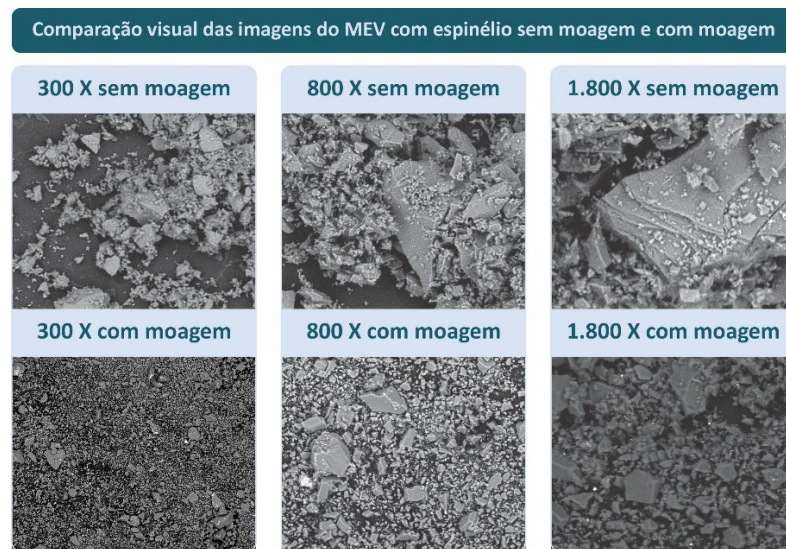
Após a impressão, os corpos de prova foram submetidos à cura em máquina dOne 3D®, utilizando os parâmetros informados pelo fabricante da resina: exposição por camada de 2s, base com 5 a 8 camadas e tempo de 8 a 12 vezes o tempo de cura por camada, com luz UV entre 380 e 405 nm.

Caracterizações mecânicas - Tração: Realizada em máquina EMIC DL10000 com célula de carga de 5kN, a 3 mm/min, com dois corpos de prova por compósito, segundo a norma ASTM D638. Avaliaram-se resistência à tração e módulo de elasticidade. Flexão: Realizada na mesma máquina com célula de 100kN, também a 3 mm/min, com dois corpos de prova por compósito, conforme norma ASTM D790. Dureza Shore D: Utilizado durômetro digital portátil Shore D-TH 210, com dois corpos de prova por compósito, conforme NBR 7456. Os resultados foram tratados com as fórmulas de variância amostral.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise cristalográfica do pó de espinélio identificou alta cristalinidade com picos característicos de $MgAl_2O_4$. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou partículas irregulares, com redução significativa do tamanho dos grãos após a moagem, favorecendo a homogeneização com a resina e o entrelace na matriz polimérica.

Figura 2 – Imagens geradas pelo MEV antes e depois da moagem



Fonte: (criada pelo autor)

Para a resina pura, a resistência à tração variou entre 10,05 MPa e 20,01 MPa, com média de 15,03 MPa. Os resultados do compósito polimérico são: 3% espinélio não moído: média de 7,67 MPa; 3% espinélio moído: média de 11,97 MPa; 5% espinélio não moído: média de 11,93 MPa; 5% espinélio moído: média de 10,46 MPa. Observa-se que o aumento da



porcentagem de espinélio resultou em diminuição da resistência à tração em comparação à resina pura.

Quadro 3 - Média dos resultados de tração

Ensaio de tração (MPa)				
Porcentagem de espinélio nocompósito	Cp 1	Cp 2	Média	Desvio padrão
0%	20,01	10,05	15,03	4,98
3% não moído	6,38	8,97	7,67	1,30
3% moído	9,53	14,41	11,97	2,44
5% não moído	14,17	9,76	11,96	2,97
5% moído	8,45	12,48	10,46	2,02

Fonte: criado pelo autor

Para a resina pura, a resistência à flexão variou entre 1,06 MPa e 1,17 MPa, com média de 1,11 MPa. Os resultados do compósito polimérico são: 3% espinélio não moído: média de 0,83 MPa; 3% espinélio moído: média de 0,86 MPa; 5% espinélio não moído: média de 0,61 MPa; 5% espinélio moído: média de 0,80 MPa. Assim como nos ensaios de tração, houve queda nos valores à medida que se aumentou o teor de espinélio, indicando redução da resistência mecânica.

Quadro 4 - Média dos resultados de flexão

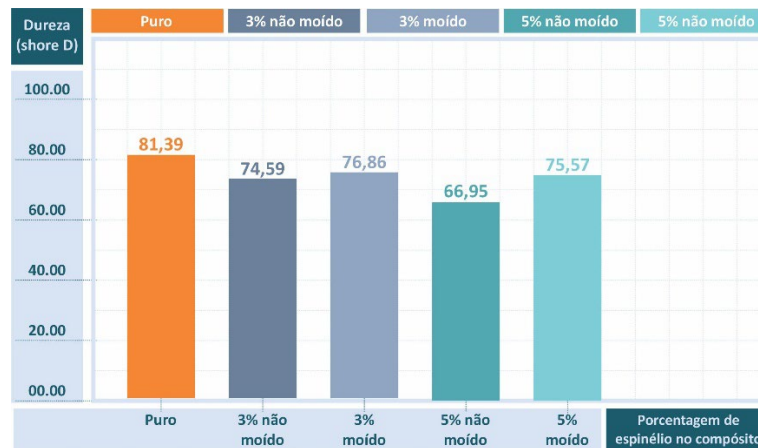
Ensaio de Flexão (MPa)				
Porcentagem de espinélio nocompósito	Cp 1	Cp 2	Média	Desvio padrão
0%	1,17	1,06	1,11	0,05
3% não moído	0,84	0,82	0,83	0,01
3% moído	0,57	1,15	0,86	0,29
5% não moído	0,33	0,90	0,61	0,28
5% moído	0,68	0,93	0,80	0,12

Fonte: criado pelo autor

A resina pura apresentou melhor desempenho em ambos os ensaios. O aumento da concentração de espinélio provocou maior fragilidade, possivelmente devido à criação de áreas de fraqueza na matriz polimérica. Os resultados dos Ensaio de Dureza Shore D são:

resina pura: 81,39 MPa; 3% espinélio moído: 74,59 MPa; 3% espinélio não moído: 76,86 MPa; 5% espinélio moído: 66,95 MPa; 5% espinélio não moído: 75,00 MPa.

Gráfico 1 - Média dos resultados dos ensaios de dureza shore D



Fonte: criado pelo autor

Os resultados confirmam a tendência de redução da resistência conforme aumenta o teor de espinélio, reforçando as conclusões dos ensaios de tração e flexão.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento e caracterização do compósito de resina fotocurável do fabricante 3Dprime® reforçado com pó de espinélio, em proporções de 3% e 5% moído e não moído, apresentou através dos resultados aos ensaios de tração, flexão e dureza shoreD, resistência inferior quando comparado com a resina pura.

Os resultados discutidos nesta dissertação indicam que, independente do espinélio moído e não moído, o compósito apresentou resistência inferior em comparação a resina pura, diminuindo assim a capacidade do material em suportar as cargas de tração e flexão.

Os resultados também sugerem que, mesmo o espinélio oferecendo vantagens em suas propriedades físico químicas, o seu reforço na matriz polimérica da resina fotocurável não contribuiu asseguradamente para a resistência mecânica de um modo geral.

No seguimento da manufatura aditiva, ainda que o pó de espinélio tenha decantado no tanque da máquina com o tempo de impressão de 15 horas, a redução desse tempo contribuiu para a impressão completa das peças. Para peças com dimensões maiores, onde

o tempo de impressão for aproximadamente acima de 5 horas, o pó de espinélio não é indicado para esta aplicação.

O método desenvolvido ao longo deste trabalho apresentou resultados inovadores e consistentes, culminando no registro de uma patente. Esse reconhecimento reforça a relevância científica e tecnológica da pesquisa, evidenciando sua contribuição efetiva para o avanço do conhecimento e para aplicações práticas no setor industrial

REFERÊNCIAS

[1] RODRIGUES, Vinicius Picanço et al. Fabricação aditiva: estado da arte e framework de aplicações. GEPROS: Gestão da Produção e Sistemas , v. 3, pág. 1-34, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i3.1657>

[2] PESQUISA FAPESP. O avanço da impressão 3D. Revista Pesquisa FAPESP , 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-avanco-da-impressao-3d/>

[3] PEREIRA, Felipe di Stéfano. Manufatura Aditiva: barreiras e oportunidades para a aplicação na indústria brasileira. 2022. 97 pág. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/4584>.

[4] ABREMA (Associação Brasileira de Resíduo e Meio Ambiente) brasil destinou 33,3 milhões de toneladas de lixo de forma inadequada em 2022, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/07/18/brasil-destinou-333-milhoes-de-toneladas-de-lixo-de-forma-inadequada-em-2022/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

[5] VIDAL, F. W. H., AZEVEDO, H. C. A. & CASTRO, N. F. Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 700p., 2014.

[6] GIBSON, I.; WU, B. Tecnologias de manufatura aditiva: impressão 3D, prototipagem rápida e manufatura digital direta. Springer Series in Advanced Manufacturing , 2014. DOI: 10.1007/978-1-4614-6430-9.

[7] LIM, C. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Journal of Materials Science & Technology, v. 32, n. 2, p. 125-138, 2016. DOI: 10.1016/j.jmst.2015.10.011.

[8] PAIXÃO, J. F. D. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea – Brasília, 2012.

[9] GIBSON, I.; WU, B. Tecnologias de manufatura aditiva: impressão 3D, prototipagem rápida e manufatura digital direta. Springer Series in Advanced Manufacturing , 2014. DOI: 10.1007/978-1-4614-6430-9.