



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



JACKSON LIMA MENEZES

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL A
PARTIR DE RESINA FOTOCURÁVEL REFORÇADO COM PÓ DE
ESPINÉLIO EM DIFERENTES PROPORÇÕES PARA UTILIZAR NO
PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR ESTEREOLITOGRAFIA**

VOLTA REDONDA

2024

JACKSON LIMA MENEZES

**DESENVOLVER E CARACTERIZAR UM MATERIAL A PARTIR DE
RESINA FOTOCURÁVEL REFORÇADO COM PÓ DE ESPINÉLIO EM
DIFERENTES PROPORÇÕES PARA UTILIZAR NO PROCESSO DE
IMPRESSÃO 3D POR ESTEREOLITOGRAFIA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais reciclados, compósitos, nanomateriais e biomateriais e linha de pesquisa em materiais compósitos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Aline Rodrigues Botelho

VOLTA REDONDA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

M543d Menezes, Jackson Lima

Desenvolvimento e caracterização de um material a partir da resina fotocurável reforçado com pó de espinélio em diferentes proporções para utilizar no processo de impressão 3D por estereolitografia. / - Volta Redonda: UniFOA, 2024. 67 p.: Il

Orientador (a): Prof. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientador (a): Profa. Aline Rodrigues Botelho

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2024

1. Materiais - dissertação. 2. Resina fotocurável - espinélio. 3. Estereolitografia. 4. Polímero. I. Magnago, Roberto de Oliveira. II. Botelho, Aline Rodrigues. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



JACKSON LIMA MENEZES

DESENVOLVER E CARACTERIZAR UM MATERIAL A PARTIR DE RESINA
FOTOCURÁVEL REFORÇADO COM PÓ DE ESPINÉLIO EM DIFERENTES
PROPORÇÕES PARA UTILIZAR NO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR
ESTEREOLITOGRAFIA

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

Roberto de Oliveira Magnago

**Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador**

BANCA EXAMINADORA:

Roberto de Oliveira Magnago

**Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Presidente / UniFOA**

Renata Martins Parreira

**Prof.^a Dr.^a Renata Martins Parreira
Examinador interno / UniFOA**

Márcio Zamboti Fortes

Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes

Examinador externo / UFF

Dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Maria Aparecida Lima Menezes e Alexandre Gonçalves Menezes, que me guiaram com amor, paciência e sabedoria ao longo desta jornada. Agradeço todo o suporte, sacrifícios e encorajamento incondicional, que me permitiram chegar até aqui.

Esta conquista também é de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Professor Dr. Roberto de Oliveira Magnago, meu orientador, por todo o suporte, atenção e orientação durante o desenvolvimento desta dissertação. Sua sabedoria e paciência foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À Professora Dr^a. Aline Rodrigues Botelho, minha coorientadora, sou grato pela dedicação e pelos insights valiosos, que desenvolveram significativamente para o aprofundamento desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Claudinei dos Santos, sou grato pelas valiosas dicas, parceria e pela disponibilização da impressora 3D, que enriqueceram e direcionaram meus estudos.

Expresso também meus profundos agradecimentos ao Sr. Ronald Palandi, pela dedicação e comprometimento nos laboratórios, sempre garantindo que eu pudesse realizar os experimentos necessários com excelência.

Aos técnicos de laboratório, Sr. Dirceu e Sr. Luciano, agradeço pela constante disponibilidade e pelo apoio prestado, facilitando o progresso de minhas pesquisas.

À minha família, Jaqueline Ap. Lima Menezes de Ávila, Ronaldo Elias de Ávila e Laura Lima Menezes de Ávila, que sempre estiveram na torcida por mim, meu sincero agradecimento por todo o carinho e suporte.

E, por fim, aos meus amigos Claudia Vieira Duboc, Luciano Alves de Oliveira, Nathália Duboc Alves e Bruna Duboc Alves, que estão sempre me apoiando nos momentos em que mais preciso, minha profunda gratidão.

EPÍGRAFE

"Não há progresso sem inovação, e a base de toda inovação é nos materiais com os quais conquistamos."

Michael F. Ashby.

MENEZES, J. L. **Desenvolver e caracterizar um material a partir de resina fotocurável reforçado com pó de espinélio em diferentes proporções para utilizar no processo de impressão 3D por estereolitográfica.** 2024. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

RESUMO

Esta dissertação 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 espinélio ($MgAl_2O_4$) 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 espinélio 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 espinélio ($MgAl_2O_4$) 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 estereolitográfica. 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 espinélio 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.

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

MENEZES, J. L. **Desenvolver e caracterizar um material a partir de resina fotocurável reforçado com pó de espinélio em diferentes proporções para utilizar no processo de impressão 3D por estereolitográfica.** 2024. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

ABSTRACT

This dissertation addresses the growth of additive manufacturing in conjunction with the development of new materials, focusing on the use of the 3D printing method by stereolithography (SLA). The study explored the incorporation of spinel powder ($MgAl_2O_4$) into photocurable resin. The main objective of the research was to evaluate the mechanical performance of the composite material, considering properties such as mechanical strength, flexibility, and hardness. The research also integrate additive production with sustainability, highlighting the importance of working with waste materials, such as the spinel used in this dissertation, to extend their lifecycle and minimize environmental impact. The goal was to develop and characterize a composite with photocurable resin from the brand 3Dprime®, reinforced with spinel powder ($MgAl_2O_4$) supplied by Saint Gobain®, in concentrations of 3% and 5%, in two distinct conditions: ground and unground, to be subjected to the 3D printing process by stereolithography. The results were compared to pure resin, where the composite showed lower strength, thus reducing the material's capacity to withstand tensile and flexural loads. Overall, spinel powder as a reinforcement in the polymeric matrix of the photocurable resin did not significantly contribute to mechanical strength. Regarding 3D printing by stereolithography (SLA), it is possible to manufacture parts using the composite material developed in this dissertation.

Keywords: spinel, resin, polymer, photocurable resin, stereolithography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de compósitos	31
Figura 2. Impressão 3D por filamento	35
Figura 3. Impressão 3D por sinterização a laser	36
Figura 4. Impressão 3D por fusão	37
Figura 5. Infográfico sobre impressão 3D por estereolitografia	39
Figura 6. Infográfico do processo de cura	40
Figura 7. Imagens da análise técnica de difração de raio X (DRX)	42
Figura 8. Imagens da utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV)	43
Figura 9. Imagens da utilização do moinho/misturador	43
Figura 10. Desenho técnico do corpo de prova para tração	44
Figura 11. Desenho técnico do corpo de prova para flexão	45
Figura 12. Imagens da mistura de resina com pó de espinélio	46
Figura 13. Imagens da disposição inicial dos corpos de prova para impressão	47
Figura 14. Erro de impressão devido ao decante do material	48
Figura 15. Imagens do corpo de prova impresso	48
Figura 16. Imagens do processo de cura	49
Figura 17. Imagens do ensaio de tração.....	50
Figura 18. Imagens do ensaio de flexão.....	51
Figura 19. imagens do ensaio de dureza shore D.....	51
Figura 20. imagens geradas pelo MEV antes e depois da moagem	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Especificação do pó de espinélio e resina	41
Quadro 2. Fluxograma das atividades	42
Quadro 3. Gasto total de material e quantidade de corpos de prova	46
Quadro 4. Resultado dos ensaios de tração	57
Quadro 5. Resultado dos ensaios de flexão	60
Quadro 6. Resultado dos ensaios de dureza shore D e suas médias	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Resultado DRX do pó de espinélio ($MgAl_2O_4$).....	52
Gráfico 2. Curva de tensão por deformação Cp's resina pura	54
Gráfico 3. Curva de tensão por deformação Cp's 3% não moído	54
Gráfico 4. Curva de tensão por deformação Cp's 3% moído	55
Gráfico 5. Curva de tensão por deformação Cp's 5% não moído.....	56
Gráfico 6. Curva de tensão por deformação Cp's 5% moído	56
Gráfico 7. Curva de tensão por deformação da resina pura	58
Gráfico 8. Curva de tensão por deformação Cp's 3% não moído	58
Gráfico 9. Curva de tensão por deformação Cp's 3% moído	26
Gráfico 10. Curva de tensão por deformação Cp's 5% não moído.....	59
Gráfico 11. Curva de tensão por deformação Cp's 5% moído	59
Gráfico 12. Média dos resultados de tração (2)	61
Gráfico 13. Média dos resultados de flexão (2)	61
Gráfico 14. Média dos resultado dos ensaios de dureza shore D.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduo e Meio Ambient
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFC	Cúbica de fase centrada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DRX	Difração de raio-X
EBM	Electron beam melting (fusão por feixe de elétrons)
FDM	Fused deposition modeling (fusão e deposição de material)
IPIA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MEV	Microscópio eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PET	Polietileno tereftalato
PLA	Ácido polilático
SLA	<i>Stereolithography</i> (método de impressão estereolitografia)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 POLÍMEROS.....	21
2.2 RESINAS	22
2.2.1 Polimerização por adição	23
2.2.2 Polimerização por condensação:	23
2.3 CERÂMICAS.....	24
2.3.1 Cerâmicas Tradicionais	Erro! Marcador não definido.
2.3.2 Cerâmicas Técnicas ou Avançadas	24
2.3.3 Cerâmicas Refratárias	25
2.3.4 Cerâmicas Biomédicas	25
2.3.5 Cerâmicas Supercondutoras	26
2.4 ESPINÉLIO	26
2.5 COMPÓSITO POLIMÉRICO	28
2.6 IMPRESSORA 3D.....	30
2.6.1 Impressora 3d por filamento	32
2.6.1 Sinterização seletiva a laser	33
2.6.3 Fusão de feixe de elétrons:	34
2.6.4 Estereolitografia	35
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	38
3.1 MATERIAIS.....	38

3.2 MÉTODOS.....	39
3.2.1 Caracterização do pó de espinélio.....	40
3.2.2 Moagem	41
3.2.3 Estabelecer os corpos de prova	41
3.2.4 Proporções e homogeneização do espinélio com resina	43
3.2.5 Impressão 3D por estereolitografia	45
3.2.6 Processo de cura	47
3.2.7 Caracterizações.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	52
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO.....	55
6 TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manufatura aditiva, especificamente a impressão 3D por estereolitografia (SLA), tem surgido como uma técnica de fabricação altamente promissora, a qual permite a criação de peças mais complexas e com elevada precisão dimensional. No entanto, a otimização de materiais adequados para esse método torna-se importante para expandir suas aplicações em diversas áreas, desde a indústria médica até a engenharia de precisão.

Segundo Rodrigues et al. (2017) esse campo aborda o estado da arte e suas aplicações da produção aditiva, que destaca o crescimento dessa tecnologia nos últimos anos e seu impacto na inovação industrial. Explica-se que a produção aditiva permite criar geometrias complexas, tendo também um aperfeiçoamento na eficácia nos processos de produção.

Na atualidade, denominada como impressão 3D, a manufatura aditiva é um tecnológico processo que está reestabelecendo a forma como os objetos são criados, fabricados e aplicados dentro de um determinado contexto. Segundo a Revista Pesquisa FAPESP (2023), a impressão 3D está mudando o processo de fabricação de produtos, oferecendo oportunidades e capacidade de produzir geometrias complexas com menor custo.

Desta forma, o que a manufatura aditiva oferece nos dias atuais, é a fabricação de peças que seriam desafiadoras de serem confeccionadas por métodos tradicionais. Isso abre as portas para o desenvolvimento de produtos altamente personalizados e adaptados as necessidades individuais (Keller et al., 2020).

A manufatura aditiva tem sido também reconhecida por sua capacidade de acelerar o processo de inovação e prototipagem. Ela vem colaborando na diminuição do tempo que é preciso para a criação, sendo ela a de um produto final ou de um protótipo, levando em consideração o desenvolvimento de peças de forma mais rápida e produtiva. Com essa agilidade na construção, podemos ressaltar que equipes de engenharia e design caminham de forma rápida com melhorias e pequenos ajustes

nos produtos, e, conseqüentemente, tendo uma resposta às mudanças e preferências dos consumidores e de novas demandas no setor industrial. (PEREIRA, 2022)

Uma correlação a ser feita entre a manufatura aditiva e novos materiais para este método, são os estudos em novos materiais oriundos de materiais de descarte, que nos traz a importância de contribuir com questões mais sustentáveis. De acordo com pesquisas feitas pela ABREMA (Associação Brasileira de Resíduo e Meio Ambiente), um panorama de resíduos sólidos de 2023 apresentou dados onde 77,1 milhões de toneladas de lixo foi gerado no ano de 2022, e 33,3 milhões de toneladas desse montante é descartada de forma incorreta no Brasil.

Os resíduos industriais contribuem para esse contexto. Segundo VIDAL et al., (2014), o setor de mineração tem baixas taxas de aproveitamento da matéria-prima durante seu período de extração. Muitas dessas matérias-primas são processadas por indústrias, onde geram resíduos com potencial poluente ao meio ambiente.

Há uma crescente associação da manufatura aditiva com uma fração a sustentabilidade. Integrar esse método a novos estudos na área de materiais, possibilitando o redirecionamento de descarte, é um bom atributo ao setor ambiental.

Sendo assim, com o propósito de tornar o processo mais dinâmico e adaptável, o uso da manufatura aditiva também nos oferece a vantagem de impulsionar o desenvolvimento de novos materiais e métodos, o qual possibilita a expansão desse setor tecnológico. De acordo com Gibson et al. (2014), "a pesquisa contínua em materiais é fundamental para ampliar suas aplicações no setor de impressões 3D, visando explorar seu potencial máximo".

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta dissertação 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 ser utilizado na impressora 3D por estereolitografia. Esta iniciativa surge da necessidade não somente de desenvolver novos materiais, mas

também de contribuir com novos que possam ampliar as capacidades da manufatura aditiva, assunto que vem tendo destaque nos dias atuais.

1.2.2 Objetivos específicos

Tendo como um dos objetivos específicos desta dissertação a produção aditiva como uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de produtos e/ou protótipos no setor industrial, destaca-se sua importância na criação e no aperfeiçoamento de novos materiais, buscando atender às demandas do mercado e da indústria. Observa-se que a produção aditiva possibilita uma criação mais direta, tornando seu estudo e avanço cada vez mais relevantes no setor industrial, devido à agilidade e à redução dos ciclos de fabricação.

Outro objetivo é fazer uso da manufatura aditiva, que possibilita uma vasta utilização de materiais para os avanços neste mesmo setor, para atuar com o desenvolvimento de novos materiais. Através da impressão 3D por estereolitografia, será feita a correlação da fabricação aditiva com o desenvolvimento de novos materiais, com o propósito de serem utilizados neste método de impressão.

Dentro do segmento acadêmico, esta dissertação também tem como objetivo específico colaborar com novas pesquisas na área de materiais, sendo na parte teórica ou prática. Veremos a seguir que as quatro categorias de materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos) inseridos na área acadêmica, tem muito a contribuir com os avanços da manufatura aditiva, englobando também questões como sustentabilidade.

Contribuir também em minimizar o impacto ambiental diretamente ligada com o descarte do pó de espinélio, prolongando um pouco mais seu ciclo de vida. Reutilizar materiais descartados é uma forma de redirecioná-los para novos produtos.

1.3 JUSTIFICATIVA

O avanço tecnológico das impressoras 3D revolucionou diversos setores industriais, da medicina à construção civil. Porém, para que essa tecnologia alcance

seu pleno potencial, é importante a pesquisa contínua e o desenvolvimento de novos materiais que colaborem de forma conjunta com esse avanço.

Atualmente, a impressão 3D utiliza uma gama restrita de materiais, como plásticos (PLA, ABS), resinas líquidas, no caso da impressão por estereolitografia, e alguns metais. No entanto, a descoberta de novos materiais pode expandir significativamente as aplicações da impressão 3D.

Segundo Lim et al. (2016), adquirir a possibilidade de impressão com novos materiais aumenta o desenvolvimento de produtos com atributos específicos, como por exemplo: características térmicas; elétricas; mecânicas; ampliando assim a aplicabilidade desses materiais no seguimento de impressão 3D.

A sustentabilidade também é uma preocupação crescente, e a pesquisa contínua em novos materiais tem a capacidade de direcionar para a utilização de produtos mais ecológicos, biodegradáveis ou reciclados, reduzindo o impacto ambiental da produção aditiva. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), reforça o incentivo da reciclagem de resíduos considerando tanto a extração de matérias-primas até seu destino final.

Um relatório de pesquisa feito pelo IPIA (Instituto de pesquisa Economia aplicada) sobre o diagnóstico dos resíduos sólidos industriais, ressalta não somente a importância pelo viés ambiental mas também o direciona para o setor econômico, onde mostra que o comércio de resíduos industriais move aproximadamente R\$ 250 milhões por ano no Brasil, e que apresenta potencial para que esse valor chegue a R\$ 1 bilhão por ano.

O desenvolvimento de novos materiais para serem utilizados na manufatura aditiva também engloba o estudo de resíduos sólidos, conectando os novos métodos de impressão 3D com questões ambientais. Gibson (2014), compara a fabricação de produtos da impressão 3D com diferentes processos convencionais, o qual indica que a impressão 3D permite um gasto menor de matérias-primas e energia. Conseqüentemente, esse método proporciona uma produção mais sustentável.

Segundo Oliveira (2023), a otimização de peças produzidas por impressão 3D permite uma redução considerável no consumo de combustível, como por exemplo no

setor aeronáutico, onde a redução de peso das peças resulta em menores emissões de CO₂ durante a vida útil da aeronave.

Outra vantagem com aspecto sustentável é a produção de peças no local, ou seja, produzir a peça no mesmo local de sua utilização, excluindo assim um ciclo de transporte que seria necessário para a viabilização de um projeto. Um simples arquivo digital pode se tornar um método mais cabível para a futura confecção de uma peça (Campbell et al., 2011).

Mais uma potencial vantagem é a redução dos custos. Novos materiais que são mais abundantes ou mais baratos de produzir podem tornar a impressão 3D mais acessível a pequenas empresas e indivíduos.

O Hospital Universitário Basel, na Suíça, forneceu dados em 2022 sobre a economia que obtiveram na redução de custos após utilizar a manufatura aditiva para a confecção e produtos hospitalares. Ressaltam que as cirurgias craniomaxilofaciais tem seu tempo reduzido em 33% devido ao uso de guias cirúrgicos impressos em 3D. E que, em termos econômico, há em uma redução de 2.000 francos suíços por cirurgia.

Outra forma de economia esta direcionada no uso de matéria-prima utilizada nas impressões, como por exemplo as impressoras 3D por filamento (FDM) e por estereolitografia (SLA), onde no primeiro modelo a material (filamento) é utilizada por completo e no segundo modelo, a resina que sobra no tanque após a confecção de uma peça pode ser reutilizada em uma nova impressão, seguindo é claro as orientações dos fabricantes de resinas.

Estudos feitos pelo Departamento de Energia dos EUA (2017), diz que esses métodos não só reduzem custos com materiais, mas também proporcionam um uso mais eficiente dos mesmos, minimizando o desperdício e, assim, tornando-se uma opção mais econômica e ambientalmente sustentável em diversas indústrias.

Estudar novos materiais para utilizar em impressoras 3D auxilia tanto nos avanços de materiais quando caminhar junto com as impressoras que vem sendo desenvolvidas e utilizadas por muitos. Poder utilizar da impressão 3D juntamente com uma ampla variedade de materiais permitirá avanços em sustentabilidade, economia, propriedades mecânicas e novas aplicações. Sendo assim, investir em pesquisa e

desenvolvimento de novos materiais não é apenas uma oportunidade, mas uma necessidade para o futuro da manufatura aditiva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLÍMEROS

Os polímeros são macromoléculas que se formam pela repetição de monômeros, os quais se unem às estruturas menores. Essa união ocorre através de ligações químicas, como ligações covalentes, onde formam-se cadeias longas e complexas. (CANEVAROLO Jr, Sebastião, 2002)

Quando dois átomos partilham pares de elétrons, esta ação é chamada de ligação covalente. Esta ligação é essencial para manter os monômeros unidos na estrutura polimérica. A criação polimérica acontece por meio de processos de polimerização, e de duas formas:

- Polímeros de adição: Nesse caso, as ligações covalentes são formadas por adição direta aos monômeros insaturados, que possuem ligações duplas ou triplas.

Durante o processo de polimerização por adição, as ligações duplas (ou triplas) se quebram, formando assim novas ligações covalentes.

Um exemplo comum é a polimerização do etileno (um monômero insaturado) para formar o polietileno, um plástico amplamente utilizado.

- Polímeros de condensação: Nessa categoria, as ligações covalentes são formadas com a eliminação de um subproduto, geralmente água.

Os monômeros apresentam grupos que reagem entre si, os quais uma molécula de água é liberada para formar ligação covalente entre os monômeros.

Alguns exemplos incluem a polimerização do ácido adípico e do etilenoglicol para formar o poliéster conhecido como PET (polietileno tereftalato), que são utilizados em garrafas de refrigerante.

Em ambos os casos, as ligações covalentes são essenciais para a formação da estrutura tridimensional do polímero. A natureza e a força dessas ligações afetam as propriedades físicas e mecânicas do polímero resultante.

Os polímeros podem ser encontrados em uma variedade de formas e têm aplicações extensas na vida cotidiana, desempenhando um importante papel em materiais comuns, como os plásticos, as fibras sintéticas, adesivos e borrachas, que são alguns exemplos.

2.2 RESINAS

A resina, que pode ser um material viscoso de origem natural ou sintética, é amplamente estudada por sua resistência quando submetida a determinadas condições. Podem ser derivadas de plantas ou criadas quimicamente e suas aplicações são diversas. Quando endurecidas, as resinas formam materiais rígidos e resistentes.

As resinas, sendo elas orgânicas ou sintéticas, podem ser submetidas ao processo de polimerização, o qual irão adquirir características sólidas. Em termos mais técnicos, a polimerização das resinas é um processo químico onde os monômeros irão se unir, formando assim o que chamamos de rede tridimensional de polímeros, o que torna o material com características sólidas e estáveis.

Nesta classificação de polímeros, teremos uma ampla aplicação em diversos segmentos na área industrial, devido às suas propriedades versáteis. Um exemplo altamente encontrado é a utilização de resinas na área odontológica.

De acordo com Silva (2008), as resinas mais utilizadas atualmente, tem sido estudadas não apenas em sua relação com a quantidade de carga que é utilizada, mas também na distribuição, forma e composição, tendo como objetivo enriquecer suas propriedades ópticas e físicas aos novos produtos.

A polimerização das resinas pode ocorrer de duas formas: adição ou condensação.

2.2.1 Polimerização por adição

Nesta forma de polimerização da resina, os monômeros com ligações duplas reagem entre si sem gerar subprodutos. O processo ocorre em três etapas: iniciação, propagação e terminação. (NUNES, Denise S. S. et al, 2005)

Na iniciação, um iniciador (geralmente uma substância química ou uma fonte de luz e calor) quebra a dupla ligação do monômero. Na propagação, os monômeros ativados se unem a outros monômeros, de forma sequencial, formando assim uma crescente cadeia polimérica. A terminação acontece quando dois radicais livres se combinam, interrompendo o crescimento da cadeia e resultando na formação de uma estrutura sólida, tornando-se assim um polímero sólido.

2.2.2 Polimerização por condensação:

A polimerização por condensação inicia-se com a presença de dois monômeros que reagem entre si, liberando pequenas moléculas como subprodutos (o que difere da adição), podendo ser geralmente água, amônia ou álcool. Resultando então na formação de uma ligação covalente entre os monômeros. O processo é de forma contínua a medida que mais monômeros se conectam e liberam moléculas pequenas, construindo a cadeia polimérica. O encerramento do crescimento da cadeia polimérica ocorre quando todos os grupos reativos forem consumidos, ou então quando a reação não for mais favorecida.

Em ambas as formas de polimerização, as cadeias poliméricas crescem e se entrelaçam para formar uma estrutura tridimensional sólida.

As resinas, ou polímeros resinosos, se mostram importantes no setor industrial devido sua alta versatilidade, resistência e capacidade de serem adaptadas em busca de atender diferentes necessidades de aplicação. Suas propriedades específicas são determinadas pela natureza dos monômeros envolvidos e na polimerização e pelos processos de fabricação.

2.3 CERÂMICAS

As cerâmicas são caracterizadas como materiais inorgânicos, não metálicos, e na maioria das vezes formadas por compostos de metais e não metais, como oxigênio, carbono ou nitrogênio. Eles são fabricados por processos de queima em altas temperaturas, adquirindo propriedades específicas, como por exemplo dureza, resistência térmica e isolamento elétrico. As cerâmicas podem ser cristalinas ou amorfas, sendo amplamente utilizadas em aplicações nas áreas estruturais, elétricas e biomédicas (ARAÚJO, 2019).

As cerâmicas então vem desempenhando papéis importantes dentro dos setores industriais, sendo em aplicações tradicionais, tais como os utensílios domésticos e os revestimentos arquitetônicos por exemplo, até aplicações no setor tecnológico, incluindo eletrônicos avançados, biomateriais e tecnologias dentro do setor energético.

Segundo Ebele Adaobi Silva (2020), em sua tese de doutorado na USP, menciona brevemente sobre a importância de agregar as características únicas de polímeros com cerâmicas, somando suas propriedades. Ressalta também o crescente leque de opções que se mostra a medida em que novos materiais são desenvolvidos, possibilitando assim um gama de aplicações no setor industrial, e em particular ao autor, na área odontológica.

As cerâmicas podem ser classificadas em sub categorias, cada uma com suas próprias propriedades e aplicações distintas. Um periódico publicado pela Universidade de Lyon (2017), ressalta e cita algumas áreas de estudo dentro da categoria dos materiais cerâmicos, apresentados abaixo.

2.3.1 Cerâmicas Técnicas ou Avançadas

Esta categoria engloba uma ampla gama de materiais cerâmicos projetados para aplicações de alta tecnologia. Cerâmicas à base de óxidos, nitretos, carbetos e outros compostos apresentam propriedades mecânicas superiores, como: alta resistência a temperaturas extremas, excelente resistência química e baixa

condutividade térmica e elétrica. Características pertinentes aos setores industriais como o automotivo, aeroespacial, áreas biomédica e de energias.

As cerâmicas técnicas exigem um nível mais elevado de tecnicidade em comparação com as cerâmicas tradicionais e, geralmente, requerem trabalhos de pesquisa e desenvolvimento mais aprofundados. Parte atual do desenvolvimento dessas cerâmicas está ligada ao desenvolvimento da ciência e engenharia de materiais, bem como à necessidade de novos materiais com melhores desempenhos. (FANTOZZI, 2018)

2.3.2 Cerâmicas Refratárias

Seu desenvolvimento para suportar temperaturas consideravelmente altas sem deformação ou fusão, a categoria dos refratários são usadas em fornos industriais, revestimentos de fornalhas, isolamento térmico e de um modo geral, em aplicações de alta temperatura. Aqui, neste grupo, os materiais como óxido de alumínio, carbetos de silício e zircônia, são facilmente encontrados em áreas de estudo e aplicações.

2.3.3 Cerâmicas Biomédicas

Tendo como objetivo maior a projeção para interação com sistemas biológicos, são amplamente aplicadas na área biomédica, em uma variedade vasta de dispositivos e implantes médicos. Materiais como hidroxiapatita e cerâmicas de alumina são frequentemente utilizados em aplicações como os implantes dentários, as próteses ósseas e também os revestimentos de dispositivos hospitalares devido à sua biocompatibilidade e estabilidade química.

“A partir do final da década de setenta, foram desenvolvidas cerâmicas com novas composições e propriedades melhoradas, e seu uso tem sido ampliado consideravelmente” (Alves, 2011).

2.3.4 Cerâmicas Supercondutoras

Esses materiais exibem propriedades de supercondutividade em temperaturas consideravelmente baixas, o que permite a direção de correntes elétricas sem resistência. Embora bastante utilizadas nas aplicações científicas e também de pesquisas, a categoria de cerâmicas supercondutoras têm potencial de caminhar juntos com a evolução tecnológica, como levitação magnética, geração de energia eletromagnética e eletrônica de alta velocidade.

De acordo com Matencio (2020), publicado pela UFMG, o estudo dos materiais cerâmicos, inseridos nas ciências tecnológicas, colaboram de forma fundamental para o progresso social.

Matencio também mostra os seguimentos mais estudados atualmente, tais como: modelagem 3D e impressão 3D; biocerâmica; cerâmica funcional; e novos processos de síntese.

As subcategorias citadas acima representam apenas uma fração da diversidade desse segmento e das aplicações em que são utilizadas. A contínua pesquisa e desenvolvimento, dentro do setor cerâmico, nos mostra através dos exemplos as novas fronteiras que podemos percorrer e em áreas tão diversas.

2.4 ESPINÉLIO

O espinélio é um mineral que pertence ao grupo dos óxidos e possui uma estrutura cristalina distinta. Sua fórmula química de um modo geral é AB_2O_4 , onde os cátions metálicos são representados por A e B. Segundo Heck et al (2005), o espinélio é um óxido ternário, ou seja, que é composto por 3 elementos químicos, onde um deles é sempre o oxigênio. A estrutura do espinélio é conhecida como uma estrutura de célula unitária cúbica de face centrada (CFC), na qual os cátions B localizam-se nos centros das faces e os cátions A ocupam metade dos sítios tetraédricos e a metade dos octaédricos.

De acordo com Heck, 2005, propriedades como boa resistência a temperatura, tanto a ambiente quando mais elevada, resistência a produtos químicos, alto ponto de

fusão, ótimas propriedades ópticas e baixa expansão térmica, permitem que o espinélio $MgAl_2O_4$ apresente uma conjugação específica e desejável de suas propriedades.

O espinélio é encontrado geralmente em rochas ígneas, e são formados pelo resfriamento e solidificação do magma. Segundo uma pesquisa da UFRGS de 2021, o espinélio na maioria das vezes possui importância econômica centrada como pedra preciosa, assemelhando-se ao rubi e safira. O espinélio em folhas, de forma sintética, remete ao vidro, mas com maior resistência.

A variedade de cores ocorre devido à diversidade nos elementos que podem ocupar os sítios A e B, citados acima, na estrutura cristalina do espinélio. Por exemplo, o espinélio com cátions de ferro (Fe) e alumínio (Al) podem apresentar a cor azul escuro, enquanto o espinélio contendo cromo (Cr) a cor vermelha, promovendo a criação de peças de joalherias imitando o rubi. É importante ressaltar que a presença de impurezas pode interferir coloração do espinélio.

Além de suas aplicações na joalheria, que estão ligadas a questões estéticas, o espinélio também apresenta algumas aplicações no setor industrial e tecnológico.

Estudos de Nevez (2012), mostram que o alto custo dos refratários com espinélio aplicados em carros-torpedos (vagões que tem o objetivo de transportarem metais líquidos dentro de siderúrgicas), pode ser justificado com a queda de reparos necessários nesses vagões, em comparação com refratários convencionais, o que, conseqüentemente, possibilita uma maior eficiência dos altos fornos.

Podemos encontrá-lo também, ainda no segmento industrial, dentro dos setores como na eletroquímica, radiotecnologia, reatores nucleares e materiais transparentes ao infravermelho, entre outros (SILVA, 2016).

Em resumo, o espinélio é um mineral com características de estrutura cristalina e uma variedade de aplicações dentro do setor industrial e tecnologia. Suas propriedades visuais permitem uma maior exploração do minério dentro do setor estético. Características como dureza e propriedades físicas e químicas possibilita o uso do material em áreas como a joalheria, a indústria eletrônica e a de comunicações.

2.5 COMPÓSITO POLIMÉRICO

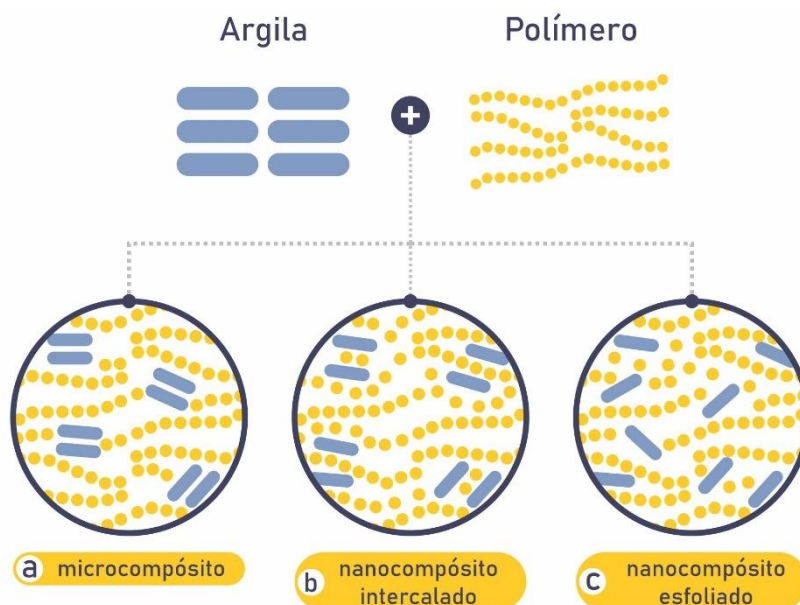
Os compósitos surgem pela união de dois ou mais materiais em diferentes estruturas. Em resumo, um compósito é formado por uma fase chamada matriz, fase predominante e responsável por dar forma e suportar as cargas, e uma segunda fase, menor em quantidade, que altera algumas propriedades da matriz, chamada de reforço.

Os compósitos poliméricos representam uma classe de materiais que têm atraído o interesse científico e industrial, devido as suas propriedades multifuncionais. Esses materiais possuem uma matriz polimérica contendo micropartículas dispersas, que podem ser de diversos materiais, incluindo argila, sílica, carbono, óxidos metálicos, entre outros, e são incorporadas na matriz polimérica para adquirir propriedades específicas ao novo material.

Os elementos retém suas propriedades físico-químicas, mas ao serem combinadas, resultam em um material final com propriedades especiais oriundo da interação entre os mesmos. (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011)

A figura 1 retrata dois materiais sendo incorporados em 3 situações distintas:

Figura 1. Tipos de compósitos.



Fonte: autoria própria.

- (a) Microcompósito: as partículas de reforço na matriz polimérica apresentam-se em dimensões de micrômetros ($1 \text{ micrômetro} = 10^{-6} \text{ metros}$). Elas podem ser dispersas aleatoriamente ou orientada dentro da matriz polimérica, visando melhorar suas propriedades. Há também os que são reforçados com fibras de carbono ou vidro, que são exemplos de microcompósitos.
- (b) Nanocompósito intercalado: de forma relativamente mais homogênea, as nanopartículas de reforço estão entrelaçadas dentro da matriz polimérica, o que ocasiona em uma mistura mais uniforme, e assim, suas propriedades adquirem características mais aprimoradas em comparação a situação anterior.
- (c) Nanocompósito esfoliado: divididas em lâminas, são encontrada em formas de camadas finas dentro da matriz polimérica. Neste modelo de estrutura, adquire-se outras propriedades mecânicas, que diferem das anteriores. A disposição em camadas também pode criar ótimas barreiras contra difusão de gases ou líquidos.

O sucesso na fabricação desses materiais depende da obtenção de uma mistura homogênea das micropartículas na matriz polimérica, buscando garantir que os componentes sejam melhores aproveitados e distribuídos uniformemente.

De acordo com Silva (2023), uma das vantagens significativas dos compósitos poliméricos é a melhoria das propriedades mecânicas em analogia aos convencionais. As micropartículas incorporadas na matriz polimérica ampliam a resistência, rigidez e tenacidade do material, tornando-o adequado para um extenso conjunto de aplicações estruturais.

Em resumo, os compósitos poliméricos é uma classe de materiais onde oferecem a combinação entre propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas, buscando materiais com novas características físico-químicas.

2.6 IMPRESSORA 3D

As impressoras tridimensionais, também conhecidas como impressoras 3D, representam um aspecto notável da engenharia moderna, utilizando de uma técnica conhecida como fabricação aditiva para materializar objetos intrincados a partir de modelos digitais (Cunico, 2015). O que difere dos métodos tradicionais, que operam na removendo material de uma peça sólida, criando assim uma nova forma. As impressoras 3D operam por meio de camadas sobrepostas do material, construindo gradativamente a forma desejada.

Com pouco mais de três décadas, máquinas de impressão 3D vieram se tornando cada vez mais capazes de gerar objetos tridimensionais como método exclusivo, no ano de 2006, essas técnicas começaram a fazer parte no uso para fins pessoais (PINHEIRO et al. 2018).

O material que se utiliza nesse processo é depositado ou solidificado individualmente, camada por camada, o que resulta gradualmente a construção do objeto. Permitindo assim, uma maior liberdade de design e a capacidade de produzir geometrias mais complexas, que anteriormente seriam difíceis de serem alcançadas por outros métodos.

A impressão 3D permite criar objetos de diferentes formas e complexidades, dependendo da tecnologia utilizada. Com tal técnica, é possível fazer desde itens simples, como pequenos moldes, estruturas até mais complexas, como casas e carros (Morandi e Del Vecchio, p. 68, 2020 apud FARIA, Sthefany Munhoz de. 2024)

Atualmente, as impressoras 3D estão sendo amplamente utilizadas não somente na área de engenharia, mas também ganhando grande espaço no setor de design, sendo considerada um forma mais dinâmica, permitindo a impressão das mais diversas formas e modelos únicos. (GABRIEL, 2017)

Segundo Araújo (2017), a grande diversidade de aplicação e materiais, onde se utilizam diferentes tecnologias para a confecção de novos modelos, sendo na área de engenharia ou até mesmo na área da saúde, são facilmente oferecidos com qualidade pela fabricação aditiva.

Um dos principais benefícios da manufatura aditiva é a capacidade de produzir peças distintas de forma rápida e efetiva. Isso é importante em setores como a medicina, onde próteses e dispositivos médicos, podem ser criados na busca por atender as necessidades únicas que cada paciente apresenta. (Raimundo, Gabriela de Abreu Guilherme 2020)

A fabricação aditiva forma material somente onde é necessário, ao contrário dos processos de usinagem habitual, que muitas das vezes acarretam em significativas quantidades de material desperdiçado, isso não apenas reduz o desperdício de matéria-prima, mas também pode levar a uma economia altamente relevante nos custos.

O processo da manufatura aditiva, de um modo geral, inicia-se pela concepção do objeto por meio de softwares especializados em modelagem tridimensional, como CAD por exemplo. Esses programas então permitem a criação de representações digitais detalhadas, capturando cada contorno do objeto a ser produzido. Em seguida, o arquivo digital é preparado para impressão, passando por um processo chamado de fatiamento, no qual o software divide o objeto a ser impresso em camadas extremamente finas, cada uma representando uma fatia. (CUNICO, Marlon Wesley Machado. 2014)

Existem diversas tecnologias de impressão 3D disponíveis, cada uma com suas próprias características e métodos:

2.6.1 Impressora 3D por filamento (FDM)

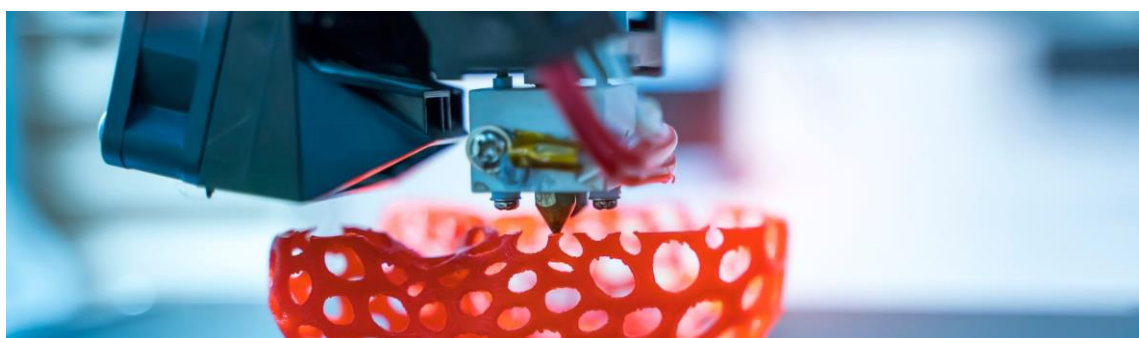
A impressão 3D por filamento, conhecida também por modelagem de fusão e deposição, vem se tornando uma das tecnologias mais conhecidas e acessíveis na fabricação aditiva. Segundo Okuso (2019), a impressão 3D tem se popularizado anualmente, e esse método adquire cada vez mais importância.

Segundo o censo 2019 da Sculpteo, realizado anualmente, mais de 60% das impressoras 3D do mundo são utilizadas para trabalho. Já é passado que a impressão 3D estava apenas ligada à indústria de ponta ou hobby. (OKUSO, L. H. 2019)

Neste método de impressão 3D, um filamento de material termoplástico é alimentado em uma cabeça de impressão aquecida, onde é derretido e depositado em camadas sobrepostas para construir o objeto desejado.

O filamento é então adicionado através de uma mangueira extra fina, onde percorre até sua extremidade chegar na extrusora, onde de fato o termoplástico é aquecido. Na parte externa da extrusora, o filamento é submetido a uma controlada temperatura até que o material se torne maleável o suficiente para ser extrudado. A cabeça de impressão então se move em coordenadas específicas, depositando o filamento em camadas sucessivas. À medida que cada camada é depositada, ela se acopla com a camada anterior, solidificando-se e formando a estrutura do objeto, como retrata a figura 2.

Figura 2. impressão 3D por filamento.



Fonte: banco de imagens unsplash

Vale ressaltar também que a temperatura pode ser controlada separadamente, tanto a temperatura da extrusora quando a da mesa de trabalho, base onde a peça se forma.

O gasto de material também é considerado mínimo neste método. A impressão 3D destaca-se pela baixa geração de resíduos. Sendo um tipo de fabricação aditiva, o processo de impressão do objeto desejado resulta em uma quantidade mínima de desperdício. Desta forma, é considerado um método eficiente no uso de matéria-prima. (PEREIRA, M. V. et al 2023).

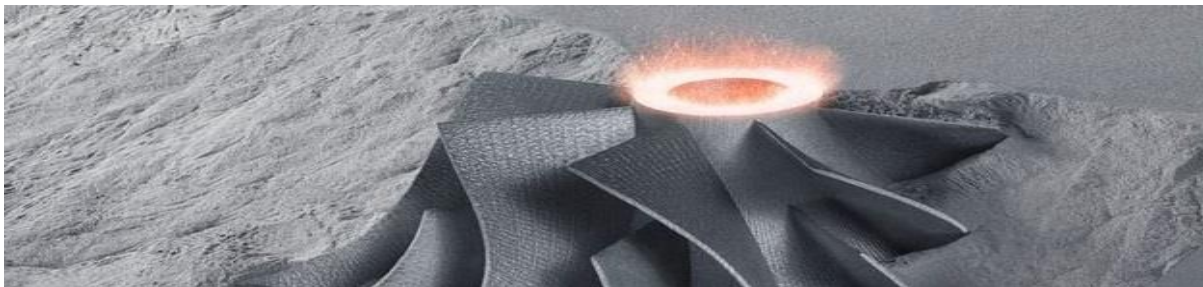
2.6.1 Sinterização seletiva a laser (SLS)

A sinterização seletiva a laser consiste em uma das mais conhecidas técnicas de fabricação rápida existentes no mercado. Este processo utiliza material particulado como base, podendo este ser: metálico, cerâmico ou polimérico. A diversidade de materiais e consequentemente de propriedades consistem no grande diferencial desta técnica em relação a outros processos de prototipagem rápida. (PAGGI, 2008)

O material aplicado nesse método é um pó fino de polímero, metal ou cerâmica, onde é depositado de forma uniforme sobre uma plataforma, formando assim uma camada fina do material. Um laser de alta potência é então direcionado para a superfície do material em pó, seguindo o contorno do objeto a ser construído. O laser aquece as partículas em pó seletivamente, até que elas se fundam parcialmente e solidifiquem, ligando-se umas às outras e formando a camada desejada da peça.

Após a conclusão de uma camada, a plataforma é baixada e uma nova camada de material em pó é espalhada. O laser então repete o processo de varredura, fundindo seletivamente o material em pó novamente, formando assim a próxima camada do objeto. Esse ciclo onde o material é depositado e fundido, camada por camada, é repetido até que o objeto esteja completamente formado, como mostra a figura 3 a seguir:

Figura 3. impressão 3D por sinterização a laser.

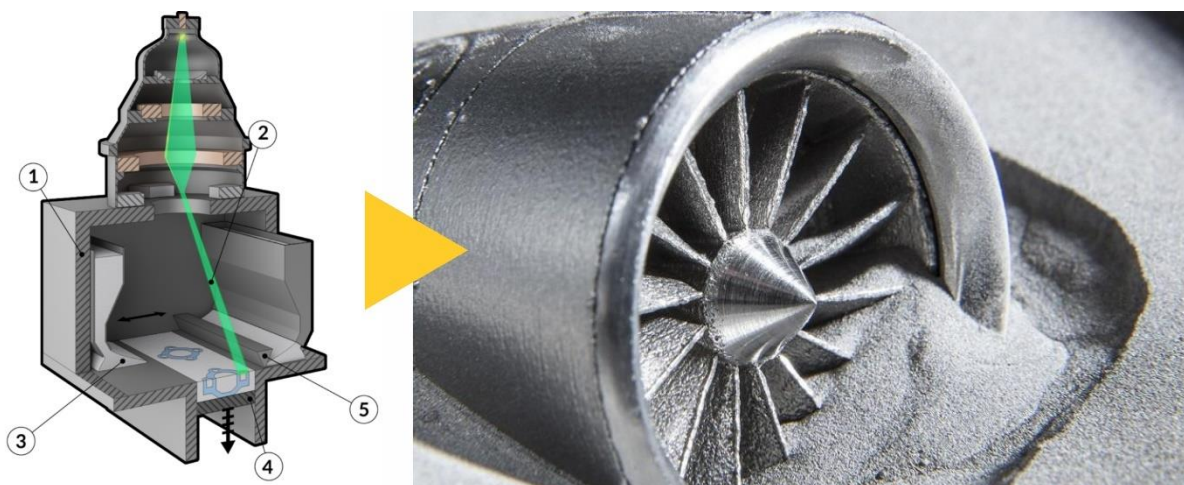


Fonte: banco de imagens unsplash

2.6.3 Fusão de feixe de elétrons (EBM)

O material de construção, geralmente um pó metálico fino, é uniformemente espalhado sobre uma plataforma de construção, formando uma camada fina. Em seguida, um feixe de elétrons de alta energia é dirigido para a superfície do material em pó. Controlado digitalmente, esse feixe varre a superfície do material em um padrão específico, aquecendo seletivamente as partículas do material até que elas se fundam parcialmente ou se solidifiquem, formando a camada desejada do objeto. Podemos entender melhor o mecanismo na figura 4:

Figura 4. impressão 3D por fusão.



Fonte: banco de imagens virtual

Os benefícios desse processo de impressão, segundo LOIOLA (2018) são: o processo é de alta temperatura, portanto não é necessário suporte ou tratamento térmico depois e alta velocidade. Partes densas com porosidade controlada.

LOIOLA (2018) também cita as desvantagens, sendo elas: Tecnologia extremamente dispendiosa, materiais moderadamente caros, a poeira pode ser perigosa para a saúde, risco explosivo, superfície áspera e resolução mais baixa.

2.6.4 Estereolitografia (SLA)

Sendo patenteada no ano de 1986, a estereolitografia (*StereoLithography*, SL), iniciou seus avanços na área de prototipagem rápida. Este métodos confecciona peças tridimensionais utilizando como matéria-prima os polímeros fotossensíveis, em outras palavras, resinas fotocuráveis, onde se solidificam quando expostos à luz ultravioleta (VOLPATO, N. Núcleo de Materiais Cerâmicos e Vidros , Florianópolis, Santa Catarina, 2009).

YANG e DU (2022) descreve o processo de impressão por estereolitografia da seguinte forma: moldagem tridimensional fotopolimerizável é um tipo de impressão de SLA, que usa principalmente resina fotossensível líquida e é curada pela luz. A moldagem fotopolimerizável é a mais amplamente usada devido ao seu alto grau de automação no processo de moldagem, boa qualidade na superfície, precisão dimensional e capacidade de obter moldagem dimensional relativamente fina.

A estereolitografia então utiliza de um feixe de luz ultravioleta direcionado ao tanque da impressora, onde sua base é de acrílico, permitindo a passagem de luz, com a finalidade de solidificar resinas líquidas foto-sensíveis, camada por camada, construindo assim objetos tridimensionais com excelente precisão e detalhes geométricos. Este modo de impressão nos oferece uma série de vantagens e aplicações significativas.

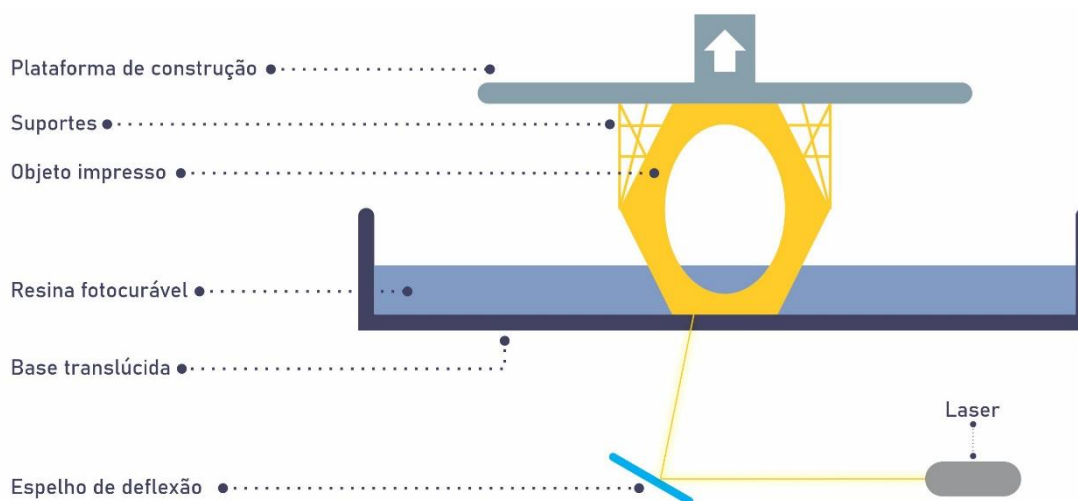
O processo de impressão é iniciado com a projeção de um modelo digital tridimensional (3D). Este modelo é então fatiado em camadas finas, com sua espessura dentro da categoria dos micrômetros. Durante a impressão, a plataforma

de construção mergulha dentro de um tanque onde é depositado a resina fotosensível ainda no seu estado líquido.

Um feixe de luz ultravioleta (UV) é então direcionado controladamente sobre a base do tanque de acrílico, transpassando-o e atingindo a resina líquida, solidificando-a segundo os padrões já pré definidos de cada camada do modelo. A medida que cada camada é solidificada, a plataforma é levantada, permitindo assim que uma nova camada de resina líquida se solidifique novamente e se anexando a camada já formada anteriormente. O processo então se repete, camada a camada, até que o objeto esteja impresso por completo.

A imagem figura 5 mostra cada atributo da impressora estereolitográfica:

Figura 5. infográfico sobre impressão 3D por estereolitografia.



Fonte: criada pelo autor, 2024

A estereolitografia vem desempenhando um papel relevante na fabricação aditiva, permitindo o alcance de peças precisas e versáteis, o que torna esse método uma escolha ideal para várias aplicações industriais e criativas. Listados abaixo, estão alguns fatores relacionados a este processo:

- **Resolução de camada:** habilitado para criar camadas extremamente finas, dentro da faixa de micrômetros. Essa resolução de camada ultrafina permite a criação de detalhes minuciosos e superfícies suaves, resultando em peças com acabamentos de alta qualidade. Segundo Melchels et al (2010), a

estereolitografia é particularmente versátil com relação à liberdade de projetar estruturas e às escalas nas quais elas podem ser construídas.

- Precisão dimensional e fidelidade geométrica: dentro da impressão estereolitográfica, a precisão dimensional das peças é notável, sendo bem fiel às dimensões especificadas no modelo digital.

O avanço das técnicas de fabricação de formas livres sólidas melhorou significativamente a capacidade de preparar estruturas com geometrias precisas, usando projetos auxiliados por computador e dados de imagens (Melchels et al 2010).

- Ausência de linhas de camadas visíveis: em contraponto às impressoras de filamento que vimos acima, onde podem exibir linhas de camada visíveis, o método estereolitográfico é capaz de produzir superfícies contínuas e uniformes, sem resaltos. Isso permite que o modelo das peças obtenha uma aparência final altamente profissional.

Após o processo de impressão, a cura das peças 3D estereolitografadas é um passo importante no processo pós-impressão, tendo como finalidade estabilizar por completo o material utilizado, tornando-se rígidas e garantindo suas propriedades desejadas.

A cura propriamente dita é realizada por exposição à luz ultravioleta (UV). As peças são então colocadas em uma câmara de cura sob com luz UV, como mostra a figura 6, onde são expostas a comprimentos de onda específicas, sempre fornecidas pela fabricante de resina.

Figura 6. infográfico sobre processo de cura.



Fonte: criada pelo autor, 2024

Com a exposição a luz UV, onde ocorrem reações fotoquímicas no material já impresso, a peça se polimeriza, solidificando assim por completo as camadas impressas, obtendo o objeto completamente sólido e pronto para acabamentos futuros, caso tenha necessidade.

A estereolitografia tem uma ampla gama de aplicações no setor industrial, tendo sua capacidade de confeccionar peças de alta precisão, detalhes e um notável acabamento de superfície.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 MATERIAIS

Para esta dissertação, 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®.

O processamento e caracterização do pó de espinélio foi realizado nos laboratórios do UniFoa (Volta Redonda - RJ) e UERJ (Resende - RJ). O quadro 1 abaixo nos ilustra as principais características das matérias primas utilizadas:

Quadro 1. Especificação do pó de espinélio e resina.

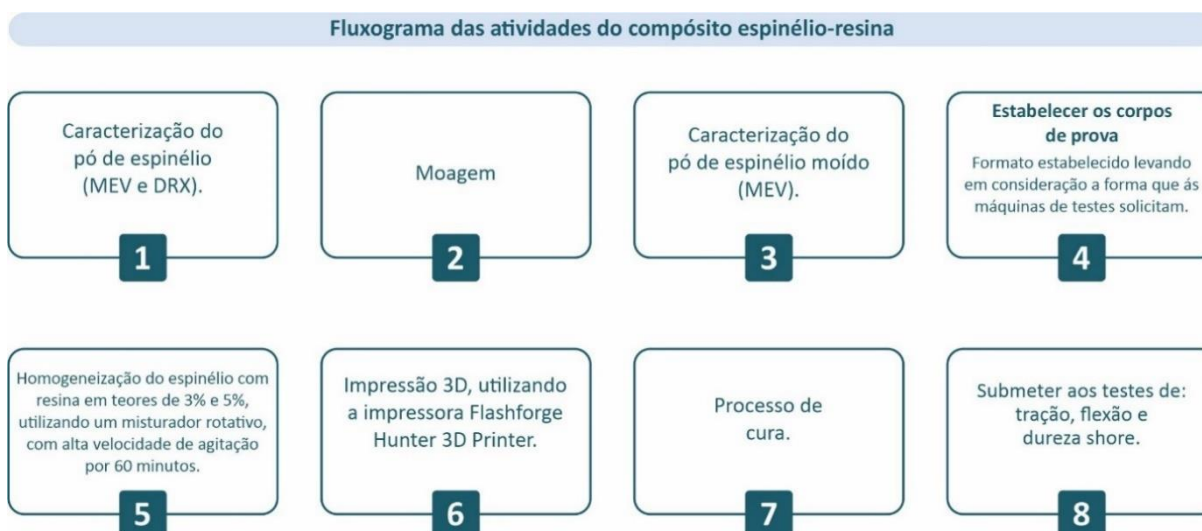
Espinélio ($MgAl_2O_4$)		Resina fotossensível	
Fabricante: Saint Gobain®		Fabricante: 3Dprime®	
Tamanho das partículas	1,50 μ m	Composição	resina acrilada, catalizador UV e pigmentos.
Tamanho do cristalino	190nm	Densidade	1,1g/ml
Densidade	3,56g/cm ³	Tonalidade	Satandart Cinza Claro
Composição de 99,9%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



Fonte: criada pelo autor, 2024

3.2 MÉTODOS

O fluxograma abaixo (quadro 2) apresenta as etapas relacionadas ao trabalho de dissertação:

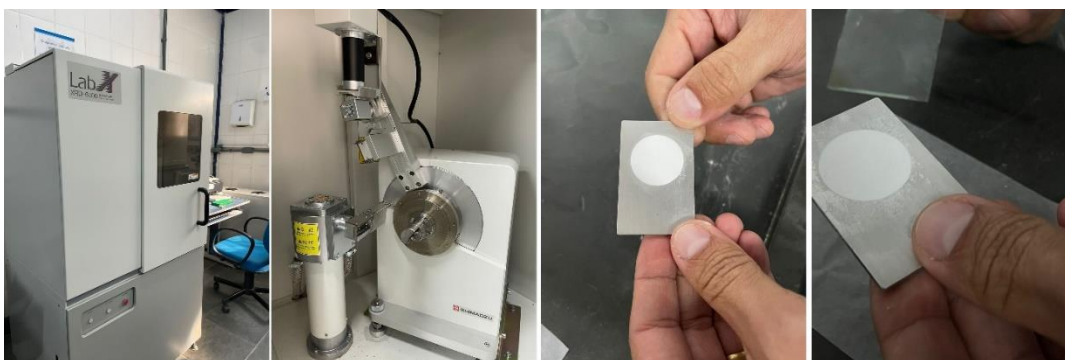
Quadro 2. fluxograma das atividades.

Fonte: criada pelo autor, 2024

3.2.1 Caracterização do pó de espinelio

Para a caracterização do pó de espinelio sem moagem, a matéria prima foi submetida a técnica de difração de raios X, (figura 7) utilizando o difratômetro modelo XRD-6100 da marca SHIMADZU®, com radiação Cu-K α , realização de varredura entre 10° e 80°, com passo angular de 0, 05° e o tempo de três segundos por ponto de contagem.

Figura 7. imagens da análise técnica de difração de raios X (DRX).



Fonte: criada pelo autor, 2024

Para a morfologia da matéria prima, o pó de espinelio foi submetido ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), como mostra na figura 8, da marca HITACHI® TM-3000 do laboratório do UniFoa (Volta Redonda - RJ).

Figura 8. imagens da utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: criada pelo autor, 2024

3.2.2 Moagem

Após a caracterização do pó de espinélio, o material foi submetido ao moinho da marca FRITSCH® Pulverisette P-5, seguindo o parâmetros abaixo:

- Vasos de carbeto de tungstênio de 225ml;
- Esferas de carbeto de tungstênio com 10mm de diâmetro;
- Velocidade de rotação de 250rpm;
- Relação da massa das esferas para a massa de pó de espinélio 6:1;
- Tempo de moagem de 60 minutos.

Foi utilizado o recipiente e as esferas em carbeto de tungstênio, com características de metal duro, alta densidade, baixa porosidade, resistente à abrasão e erosão, como mostra a figura 9 abaixo, com as vantagens de reduzir a possibilidade de contaminação do pó de espinélio, evitando alterar suas propriedades.

Figura 9. imagens da utilização do moinho/misturador



Fonte: criada pelo autor, 2024

3.2.3 Estabelecer os corpos de prova

Tendo em vista que o material será submetido a impressora 3D por estereolitografia, os corpos de prova tiveram que ser previamente modelados tridimensionalmente (estando de acordo com as normas ASTM para tração e flexão). Uma vez que as peças são formadas no tanque de resina da impressora.

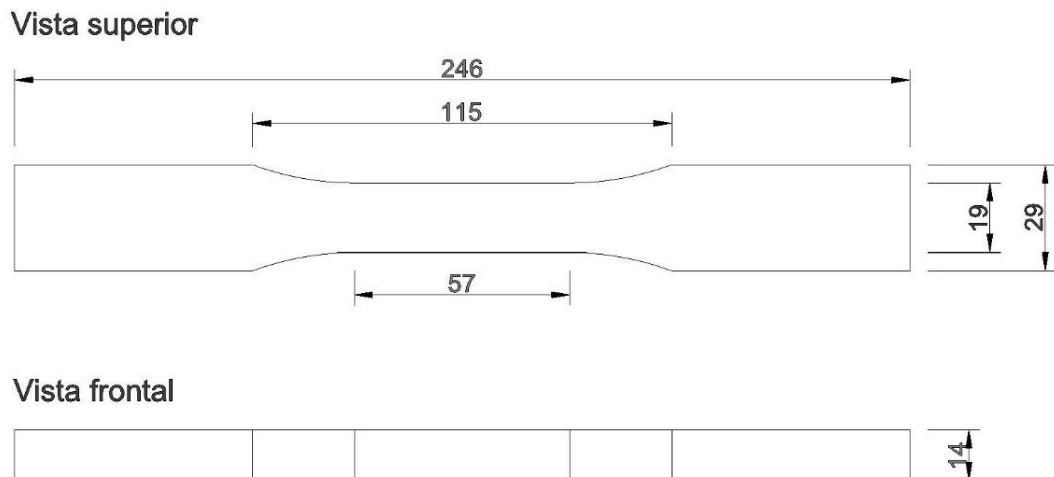
Para a criação virtual, as etapas abaixo foram seguidas:

- Utilizou-se o software AutoCAD® 2024 3D, para a modelagem virtual das peças;
- Após a modelagem concluída, o arquivo foi exportado no formato “.stl” (sendo a mesma sigla utilizada para estereolitografia - STL);
- O arquivo então é aberto no software Creality Print® para o objeto modelado ser configurado em camadas para leitura posterior da impressora.

Utilizou-se as normas aplicadas para materiais termoplásticos para os ensaios de tração e flexão, sendo elas: ASTM D638 e ASTM D790, respectivamente.

- ASTM D638 (TIPO III) com as seguintes proporções (mm):

Figura 10. desenho técnico do corpo de prova para tração



- Fonte: criado pelo autor, 2024

- ASTM D790 com as seguintes proporções (mm):

Figura 11. desenho técnico do corpo de prova para flexão



Fonte: criado pelo autor, 2024

Devido ao limite de espaço da plataforma de impressão da impressora 3D, o corpo de prova para o ensaio de tração (ASTM D638 tipo III) teve que ser reduzido proporcionalmente, passando assim a ter 68% do seu tamanho original.

3.2.4 Proporções e homogeneização do espinélio com resina

Quatro misturas de espinélio com resina foram necessárias para esta dissertação, em busca de resultados mais variados do compósito resina mais espinélio moído e resina mais espinélio não moído, com teores de 3% e 5% de espinélio a cada compósito.

A quantidade de resina em cada impressão foi de 90ml para o compósito com 3% de espinélio e 150ml para o compósito com 5% de espinélio, respeitando os limites do tanque de resina da impressora e o desperdício do material que sobra no tanque de impressão.

Segue abaixo, no quadro 3, a quantidade total de material utilizado e os corpos de prova impressos.

Quadro 3. gasto de material e unidades de corpos de prova.

Material disponível	Corpos de prova compósito espinélio-resina			Gasto total
COMPÓSITO	COM MOAGEM DO ESPINÉLIO			16 unidades de corpos de prova
Quantidade total de resina: 2,5kg	5%	tração (2 corpos de prova)	8 unidades	
		flexão (2 corpos de prova)		
Quantidade total de espinélio: 830g	3%	tração (2 corpos de prova)		
		flexão (2 corpos de prova)		
Compósito espinélio-resina (5%): 150ml de resina para 24,5g de espinélio	SEM MOAGEM DO ESPINÉLIO			
	5%	tração (2 corpos de prova)	8 unidades	
		flexão (2 corpos de prova)		
Compósito espinélio-resina (3%): 90ml de resina para 17,7g de espinélio	3%	tração (2 corpos de prova)		
		flexão (2 corpos de prova)		
				Quantidade total de resina: 1.920ml (2,11kg)
				Quantidade total de espinélio moído: 156,8g
				Quantidade total de espinélio não moído: 156,8g

Fonte: criada pelo autor, 2024

Na homogeneização, utilizou-se o misturador rotativo de marca Fisatom® (figura 12) com alta velocidade de agitação por 60 minutos. Inicialmente, a hélice do misturador ficou na metade do recipiente, o que não permitiu uma homogeneização corretamente, tendo um leve decanter do material.

Ajustando assim o eixo z do maquinário, permitiu que a hélice do misturador rotacionasse ao fundo do recipiente, obtendo uma mistura mais efetiva e, conseqüentemente, uma homogeneização mais completa.

Figura 12. imagens da mistura da resina com pó de espinélio

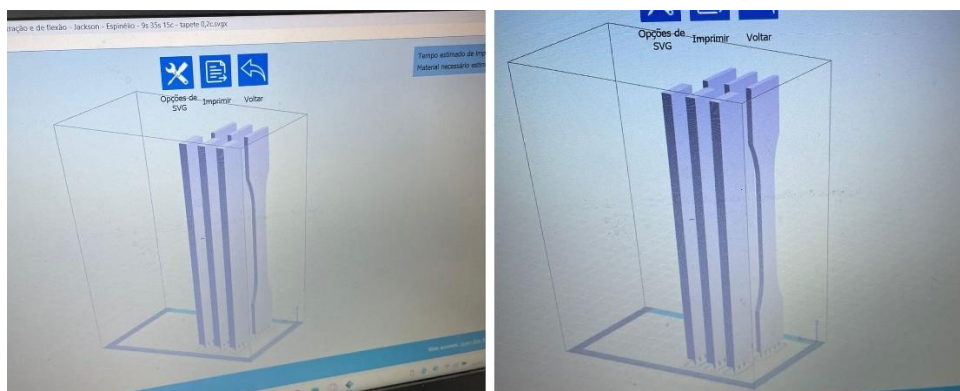
Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

3.2.5 Impressão 3D por estereolitografia

Utilizamos para este trabalho a impressora FLASHFORGE 3D PRINTER DONE 3D® estabelecida na UERJ (Resende - RJ).

Antes da impressão de fato, foi preciso configurar o arquivo de impressão através do programa FlashDLPint, como ilustrado na figura 13 abaixo, o qual se comunica diretamente com a impressora, estabelecendo a quantidade de corpos de prova por impressão. Inicialmente, para conseguir um maior número de corpos de prova por impressão, constatou que dispor as peças na vertical seria mais eficaz. Como mostra a imagem abaixo:

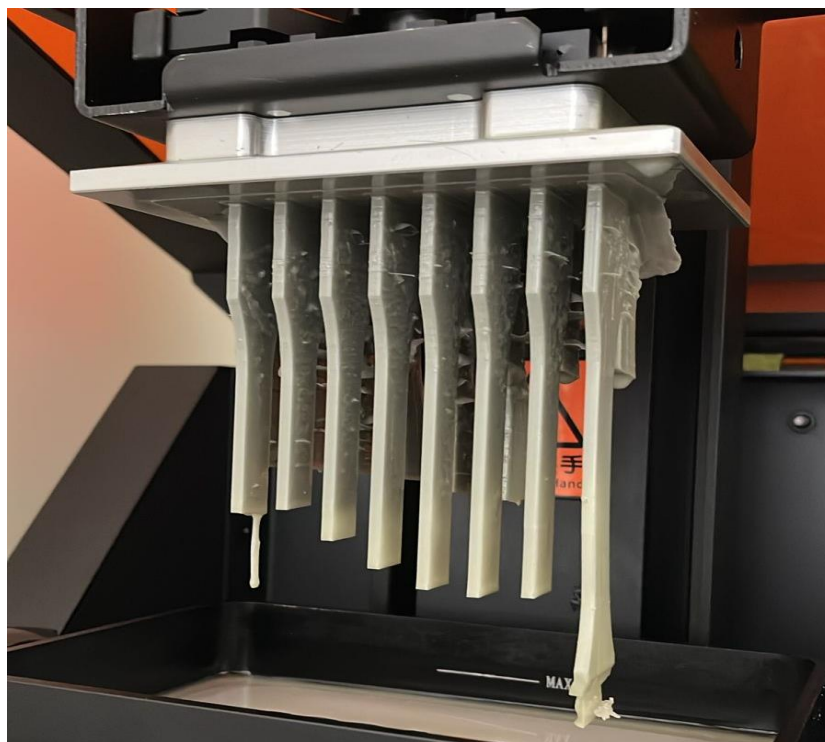
Figura 13. Imagens da disposição inicial dos corpos de prova para impressão



Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

No entanto, tendo as peças na vertical, o tempo de impressão definido pela impressora foi de pouco mais de 15 horas. Este tempo fez com que ocorresse um decante do material no tanque da impressora, ocasionando em corpos de prova onde o espínélio não se manteve na matriz polimérica por igual das peças, impossibilitando também a impressão por completo, como mostra a figura 14.

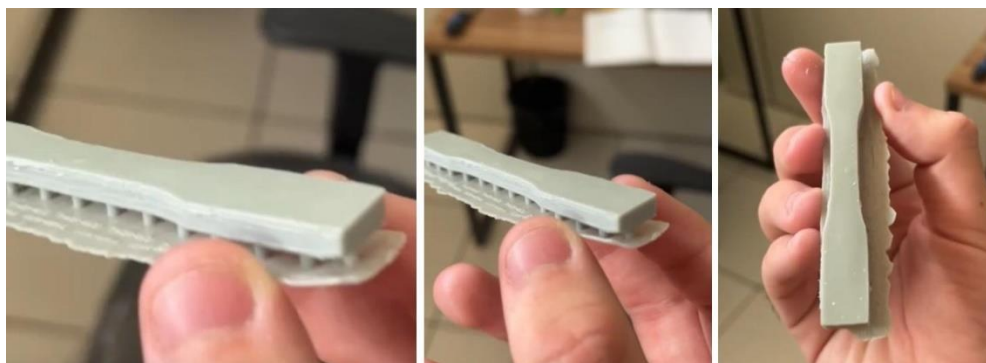
Figura 14. erro de impressão devido ao decanter do material



Fonte: fotos tiradas pelo responsável do laboratório da UERJ, 2024

Com o propósito de reduzir o tempo de impressão e evitar o decante do material, os corpos de prova foram posicionados na horizontal, o que resultou em um tempo de impressão de pouco mais de 35 minutos, prevenindo assim o decante e resultando na impressão completa (figura 15) dos corpos de prova. Como consequência, a quantidade de peças por impressão também foi reduzida.

Figura 15. imagens do corpo de prova impresso



Fonte: fotos tiradas pelo responsável do laboratório da UERJ, 2024

3.2.6 Processo de cura

Após o processo de impressão, onde os copros de prova já saem enrijecidos, é necessário submeter as peças à máquina de cura, para se obter um resultado mais eficiente na rigidez do material.

Para esta dissertação, utilizou-se a máquina de cura da marca dOne 3D ® (figura 16) estabelecida na UERJ (Resende - RJ). De uma forma simples, as configurações da máquina para o processo de cura variam de resina para resina, considerando as instruções do fabricante. Para a resina utilizada nesta dissertação, os parâmetros de configuração foram:

- Período de exposição por camada de 2s;
- Período de exposição da base de 8 a 12x o tempo de cura por camada;
- Quantidade de camadas de base de 5 a 8;
- Comprimento de onda UV de 380 à 405nm.

Figura 16. imagens do processo de cura.



Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

3.2.7 Caracterizações

3.2.7.1 Ensaio de tração

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração, utilizando uma Máquina Universal de Tração, modelo EMIC DL-10000, mostrado na figura 17 abaixo, instalada no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda - RJ – UniFOA. O ensaio foi realizado com uma célula de carga de 5kN, a uma velocidade de 3 mm/min, em temperatura ambiente.

Para o ensaio, foram utilizados 2 corpos de prova para cada compósito impresso, de acordo com a norma ASTM D638 (tipo III). Neste contexto, foram avaliadas suas propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade em tração, considerando um comprimento inicial do CP de $L_0 = 246$ mm.

Figura 17. imagens do ensaio de tração.



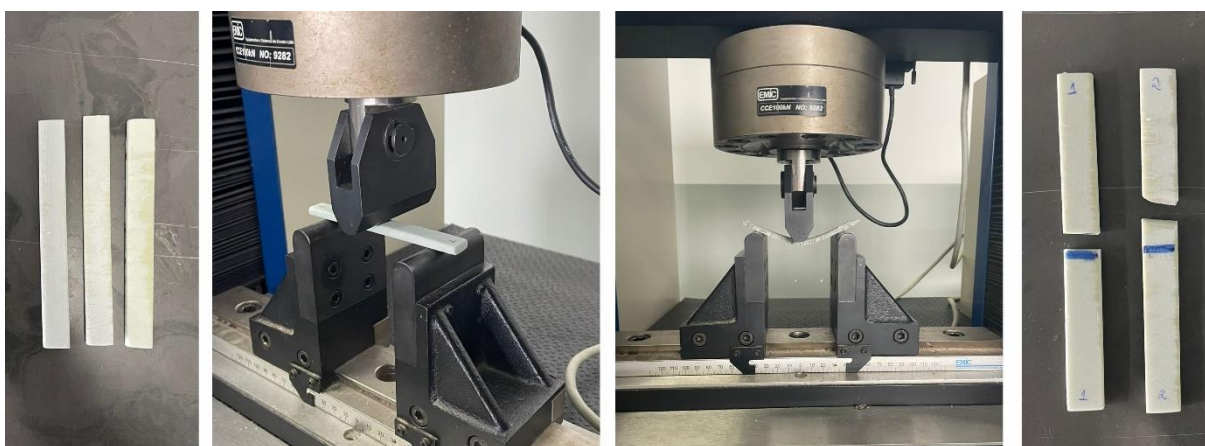
Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

3.2.7.2 Ensaio de flexão

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração, utilizando uma Máquina Universal de Tração, modelo EMIC DL-10000, instalada no laboratório do UniFOA, Volta Redonda - RJ. O ensaio foi realizado com uma célula de carga de 100kN, a uma velocidade de 3 mm/min, em temperatura ambiente.

Para o ensaio, foram utilizados 2 corpos de prova para cada compósito confeccionado, de acordo com a norma ASTM D790. Neste contexto, foram avaliadas suas propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade em tração, considerando um comprimento inicial do CP de $L_0 = 140$ mm.

Figura 18. imagens do ensaio de flexão.



Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

3.2.7.3 Ensaio de dureza shore D

Para os ensaios de dureza shore, foi utilizado o durômetro digital tipo Shore D-TH 210, portátil, no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda - RJ – UniFOA, como mostra a figura 19 abaixo.

Figura 19. imagens do ensaio de dureza shore D.



Fonte: fotos tiradas pelo autor, 2024

Para os ensaios, foram utilizados 2 corpos de prova para cada compósito impresso, dentro dos parâmetros baseados na norma NBR 7456.

A fórmula utilizada para os cálculos dos resultados foi:

$$(1) S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2) S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Onde:

S^2 = variância amostral (medida de dispersão dos dados).

x_i = valor de cada observação individual no conjunto de dados.

\bar{x} = média aritmética das observações.

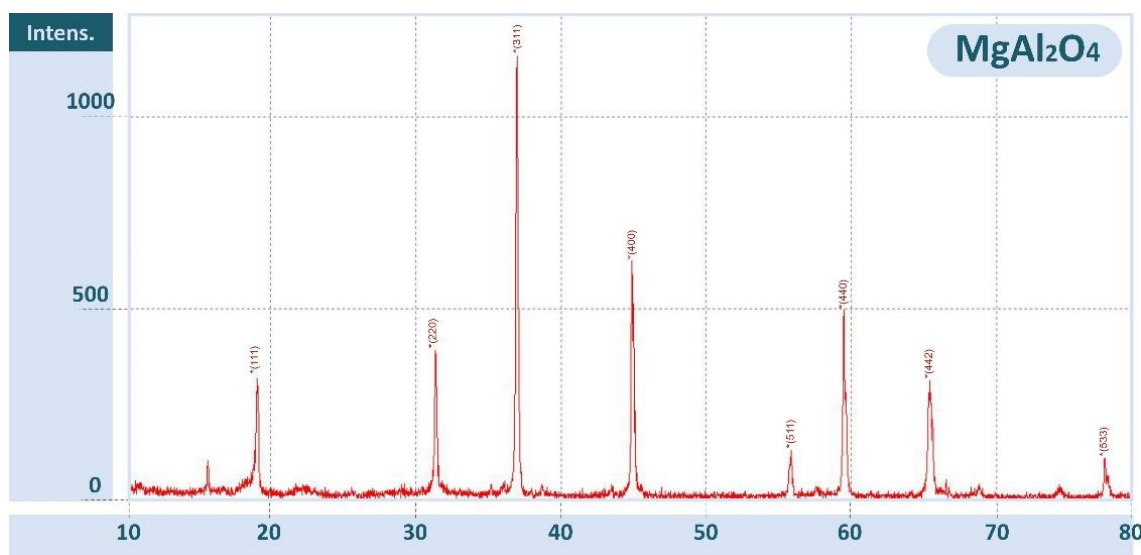
n = número total de observações na amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA DRX e MEV

O gráfico 1 abaixo apresenta o resultado cristalográfico do pó de espinélio examinado nesta dissertação:

Gráfico 1. Resultado DRX do pó de espinélio (MgAl_2O_4).

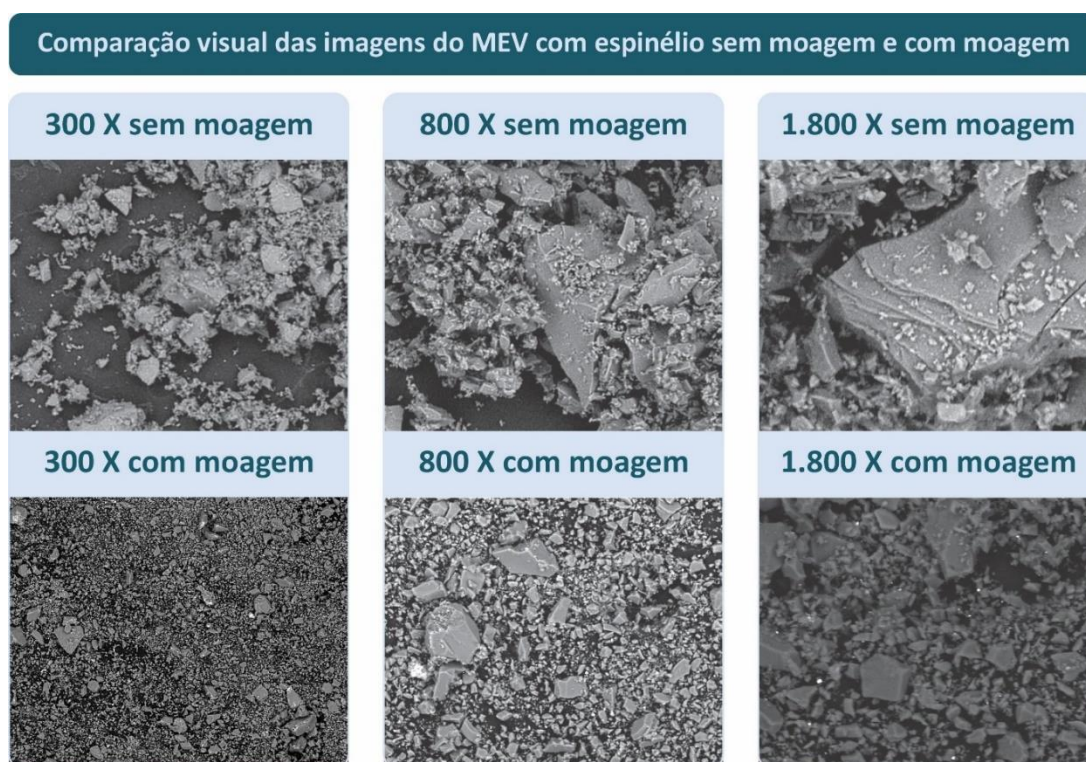


Fonte: criada pelo autor, 2024

Com a análise cristalográfica do pó de espinélio, identificou-se a matéria prima com alta cristalinidade em picos especificadamente de MgAl_2O_4 , como mostra o gráfico 1 acima.

A morfologia das partículas da matéria-prima foi gerada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o microscópio eletrônico HITACHI® TM-3000. Abaixo, temos as imagens (figura 20) do espinélio não moído e moído, a nível de comparação.

Figura 20. imagens geradas pelo MEV antes e depois da moagem



Fonte: imagens geradas pelo autor e o técnico de laboratório do UniFOA, 2024

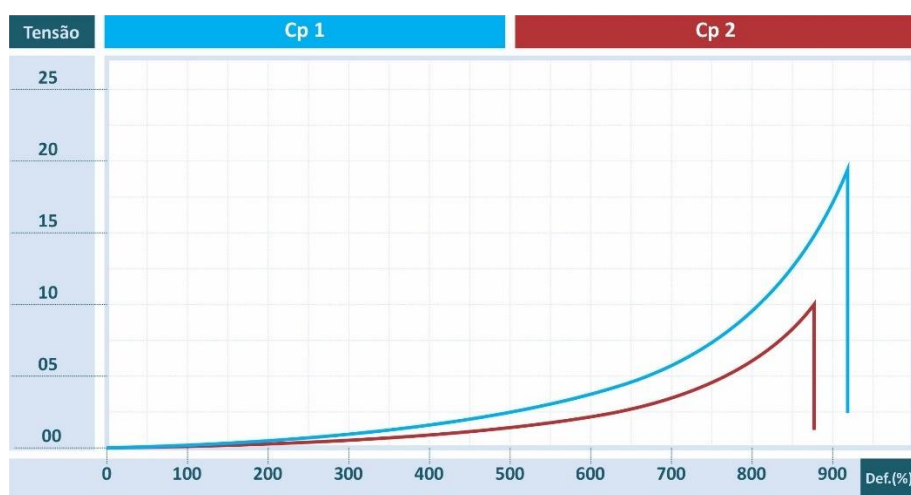
As imagens da figura 20 acima foram tratadas utilizando o programa ImageJ®, onde somente o contraste foi modificado, com a finalidade de melhorar a percepção dimensional dos grãos.

É facilmente notado, em suas partículas irregulares, a diminuição dos grãos em sua escala micrométrica do pó de espinélio sem moagem para o espinélio com moagem. Essa etapa da dissertação buscou a redução dos grãos, com o objetivo de facilitar a homogeneização com a resina, o que possibilitou o entrelace de forma mais efetiva do pó de espinélio na matriz polimérica.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

No gráfico 2 abaixo, estão os resultados dos ensaios de tração dos Cp's 1 e 2 de resina fotocurável pura, servindo de base comparativa com os Cp's reforçados com pó de espinélio. A linha azul representa o Cp com melhor resultado, tendo limite de tração de 20,01 MPa e o menor, linha vermelha, de 10,05 MPa.

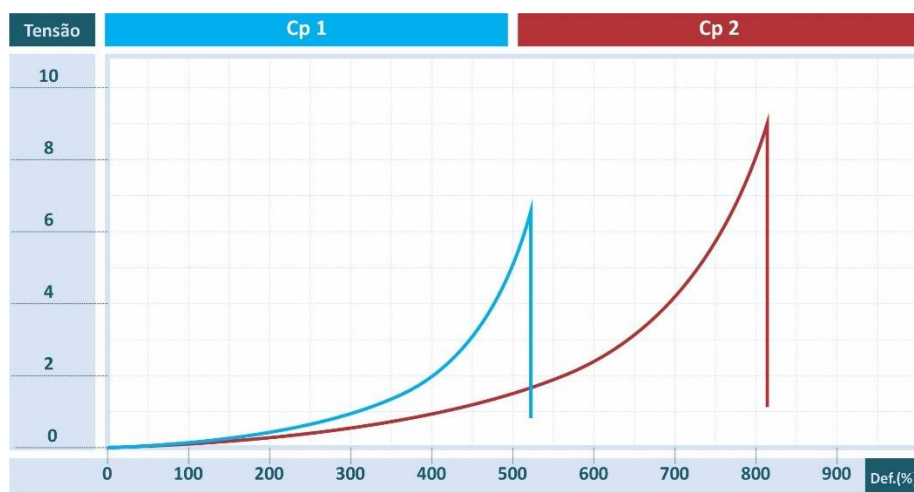
Gráfico 2. Curva de tensão por deformação Cp's resina pura



Fonte: criada pelo autor, 2024

Seguindo com os resultados, abaixo no gráfico 3 estão os ensaios dos Cp's 1 e 2 do compósito resina mais espinélio não moído em teor de 3%.

Gráfico 3. Curva de tensão por deformação Cp's 3% não moído

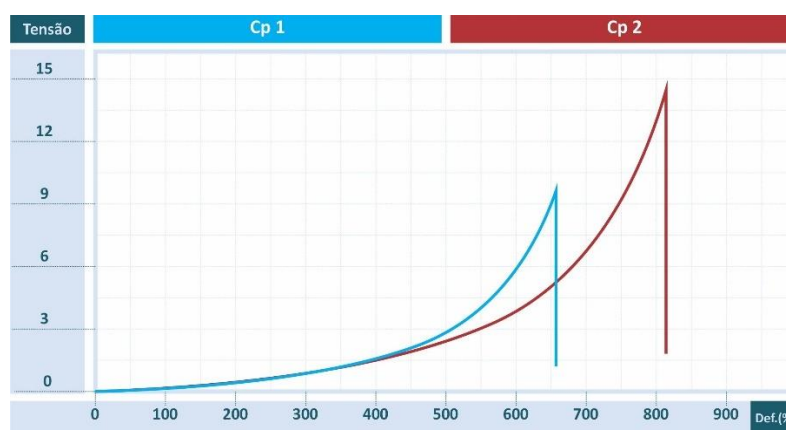


Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com 3 % de espinélio não moído que obteve a melhor eficiência ao limite de resistência à tração foi de 8,97MPa, onde o menor valor encontrado para o desempenho à tração foi de 6,38MPa, resultando em uma média de 7,67MPa.

O gráfico 4 segue abaixo com os ensaios de tração dos Cp's 1 e 2 com teor de 3% de pó de espinélio moído:

Gráfico 4. Curva de tensão por deformação Cp's 3% moído

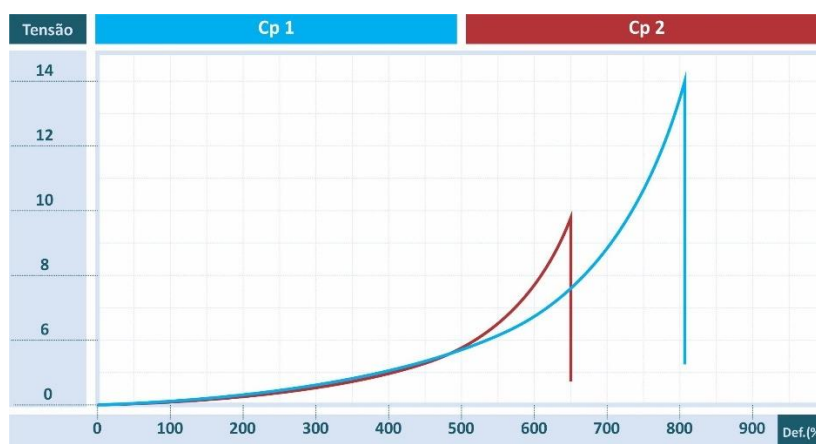


Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com 3 % de espinélio moído que obteve a melhor eficiência ao limite de resistência à tração foi de 14,41MPa, onde o menor valor encontrado para o desempenho à tração foi de 9,53MPa, resultando em uma média de 11,97MPa.

Abaixo, no gráfico 5, estão apresentados os ensaios de tração dos Cp's 1 e 2 com teor de 5% de pó de espinélio não moído:

Gráfico 5. Curva de tensão por deformação Cp's 5% não moído

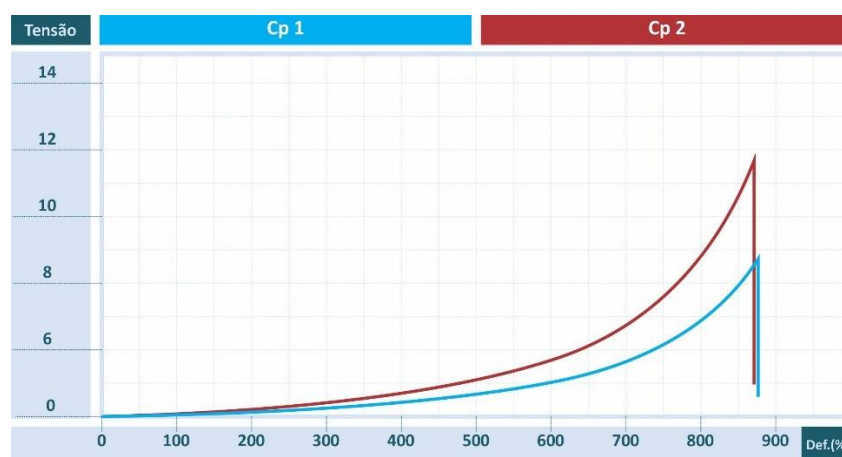


Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com 5% de espinélio não moído que obteve a melhor eficiência ao limite de resistência à tração foi de 14,17MPa, onde o menor valor encontrado para o desempenho à tração foi de 9,76MPa, resultando em uma média de 11,96MPa.

Abaixo, no gráfico 6, tem-se os resultados aos ensaios de tração do compósito com 5% de pó de espinélio moído.

Gráfico 6. Curva de tração por deformação Cp's 5% moído



Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com 5 % de espinélio moído que obteve a melhor eficiência ao limite de resistência à tração foi de 12,48MPa, onde o menor valor encontrado para o desempenho à tração foi de 8,45MPa, resultando em uma média de 10,46MPa.

O quadro 4 abaixo apresenta as médias de tensão máxima (MPa) suportadas nos ensaios de tração dos Cp's de resina pura e com teores de 3% e 5% de espinélio moído e não moído.

Quadro 4. 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

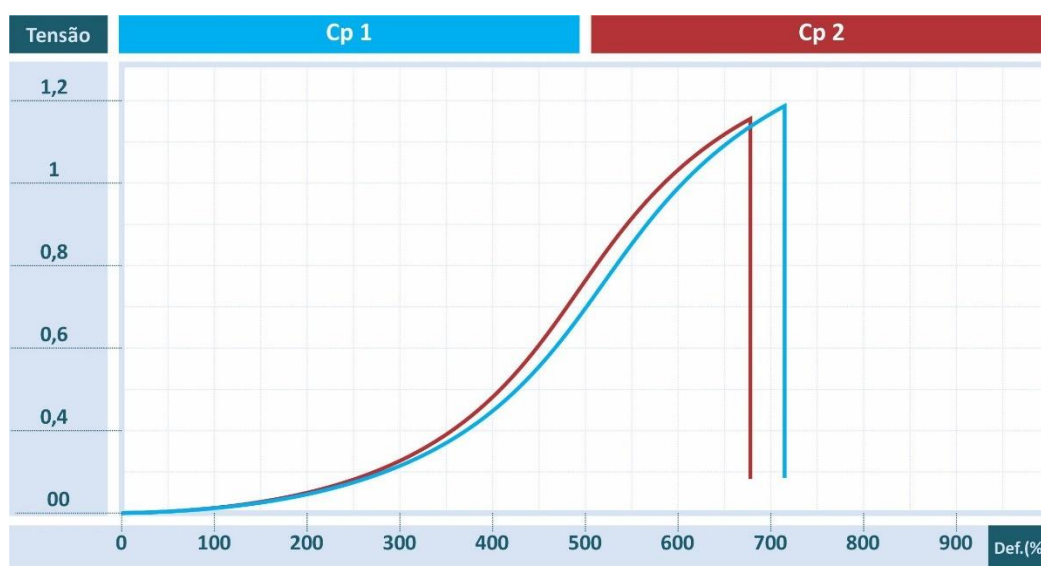
Fonte: criada pelo autor, 2024

Pode-se observar no quadro 4, que conforme a porcentagem de espinélio aumenta na matriz polimérica, ocorre uma diminuição na sua resistência a tração.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

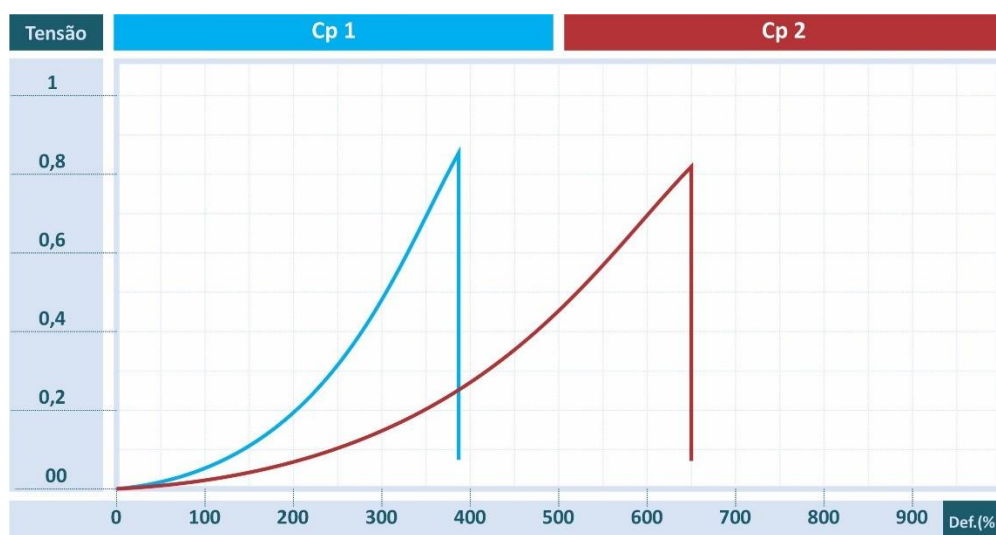
No gráfico 7 abaixo, estão os resultados dos ensaios de flexão dos Cp's 1 e 2 de resina fotocurável pura, sendo a base comparativa com os Cp's reforçados com pó de espinélio. A linha azul representa o Cp com melhor resultado, tendo limite de flexão de 1,17 MPa e o menor, linha vermelha, de 1,06 MPa.

Gráfico 7. Curva de tensão deformação Cp's resina pura (2)



Fonte: criada pelo autor, 2024

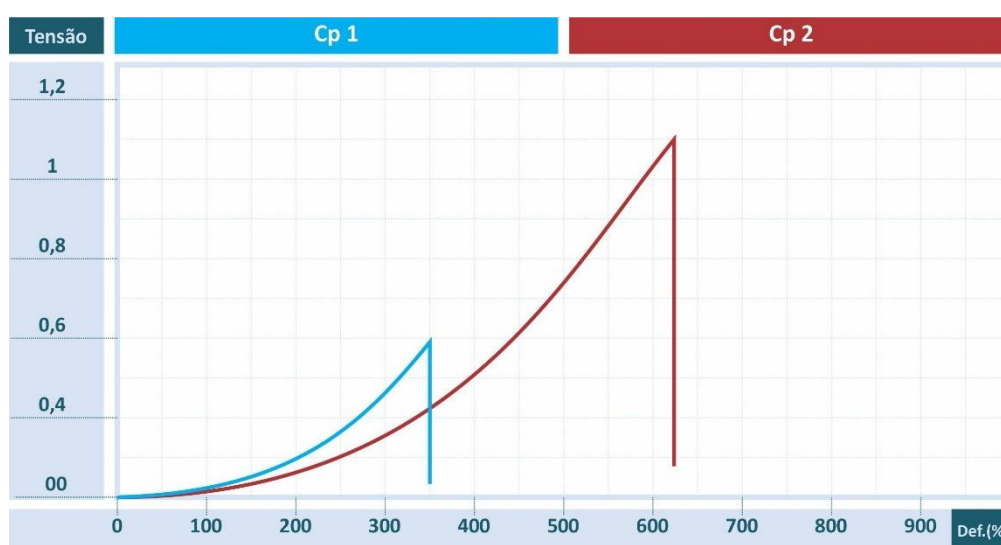
Seguindo com os resultados (gráfico 8) estão os ensaios dos Cp's 1 e 2 do compósito resina mais espinélio não moído em teor de 3%.

Gráfico 8. Curva de tensão por deformação Cp's 3% não moído (2)

Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com 3% de espínélio que obteve a melhor eficiência ao limite de resisténcia à flexão foi de 0,84MPa, onde o menor valor encontrado para o desempenho à flexão foi de 0,82MPa, resultando em uma média de 0,83MPa.

O gráfico 9 abaixo apresenta os ensaios de flexão por deformação dos Cp's com 3% de pó de espínélio moído:

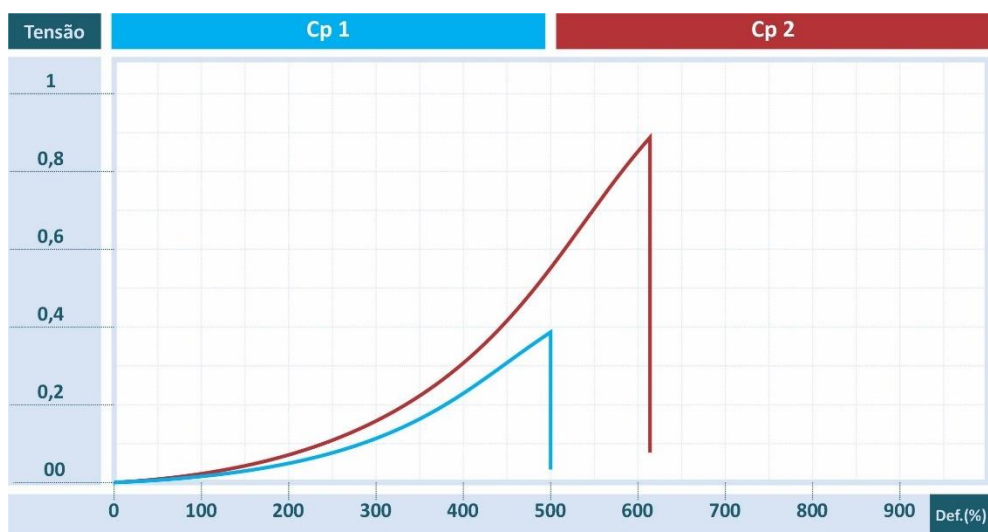
Gráfico 9. Curva de tensão por deformação Cp's 3% moído (2)

Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com a melhor eficiência ao limite de resisténcia à flexão foi de 1,15MPa, e o menor valor encontrado foi de 0,57MPa, obtendo-se a média de 0,86MPa.

Seguimos para os ensaios de flexão com os corpos de prova com 5% de pó de espinélio não moído, como mostra o gráfico 10 abaixo:

Gráfico 10. Curva de tensão por deformação Cp's 5% não moído (2)

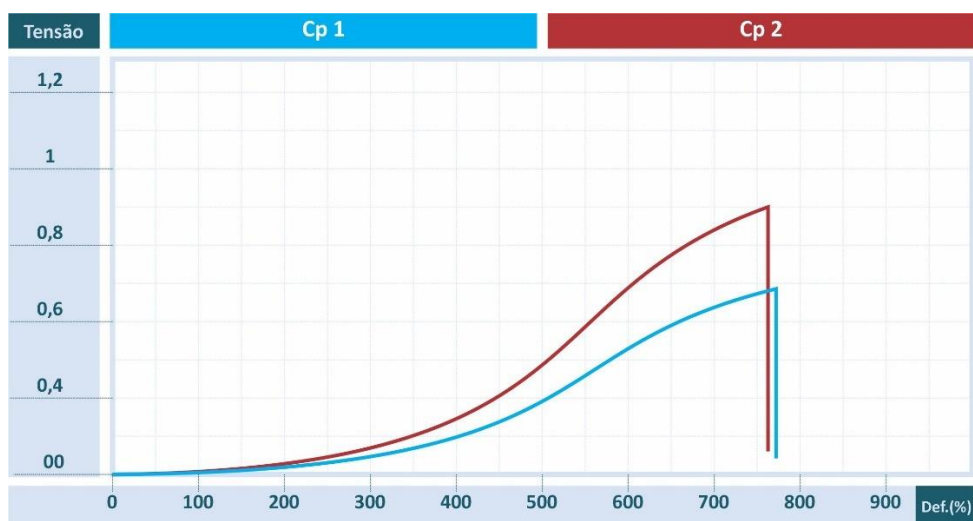


Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com a melhor eficiência ao limite de resistência à flexão foi de 0,90MPa, e o menor valor encontrado foi de 0,33MPa, obtendo-se a média de 0,61MPa.

Por fim, os últimos ensaios de flexão, o gráfico 11 abaixo apresenta os corpos de prova com 5% de pó de espinélio moído:

Gráfico 11. Curva de tensão por deformação Cp's 5% moído (2)



Fonte: criada pelo autor, 2024

O corpo de prova com a melhor eficiência ao limite de resistência à flexão foi de 0,93MPa, e o menor valor encontrado foi de 0,68MPa, obtendo-se a média de 0,80MPa.

O quadro 5 abaixo apresenta as médias de tensão máxima (MPa) suportadas nos ensaios de flexão dos Cp's com resina pura, com 3% de espínélio moído e não moído e com 5% de espínélio moído e não moído:

Quadro 5. Média dos resultados de flexão

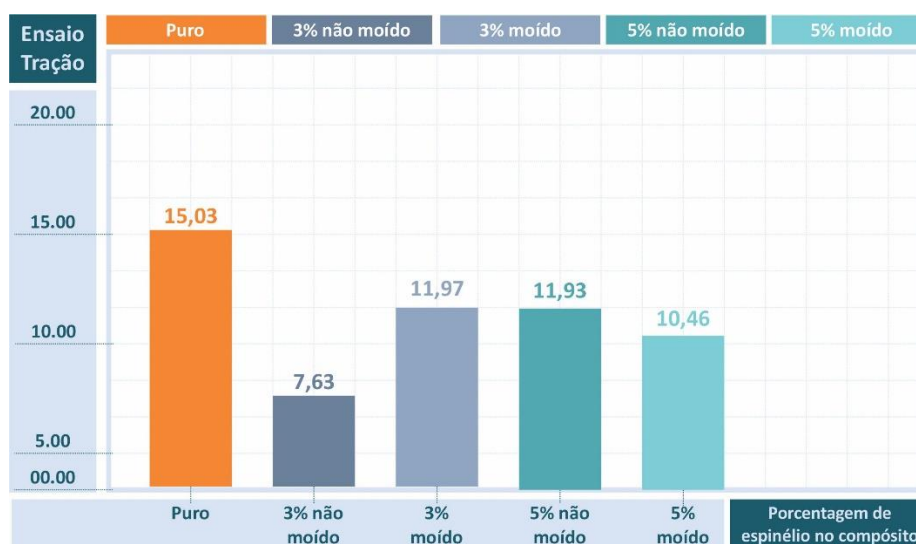
Ensaio de Flexão (MPa)				
Porcentagem de espínélio nocompósito	Cp 1	Cp 2	Média	Desvio padrão
0%	1,17	1,06	1,11	0,05
3% não moído	0,84	0,82	0,83	0,01
3% moído	0,57	1,15	0,86	0,29
5% não moído	0,33	0,90	0,61	0,28
5% moído	0,68	0,93	0,80	0,12

Fonte: criada pelo autor, 2024

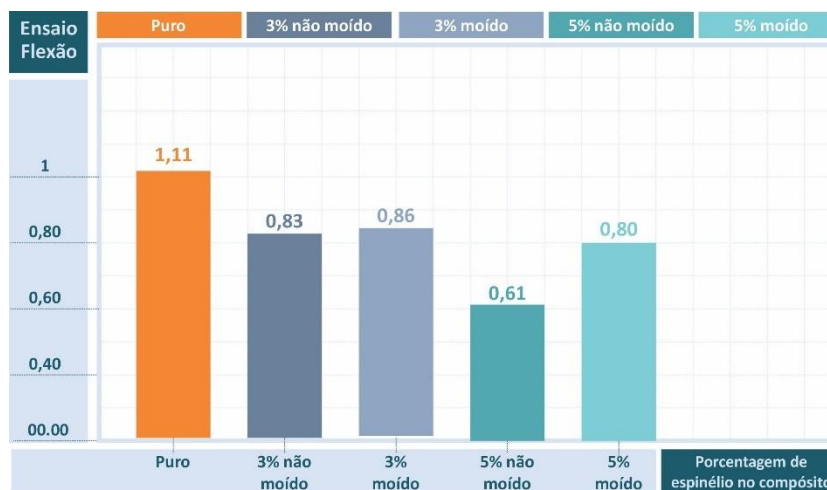
Pode-se observar no quadro 5, que conforme a porcentagem de espínélio aumenta na matriz polimérica, ocorre uma diminuição na sua resistência a flexão.

Os gráficos 12 e 13 nos apresentam os resultados aos ensaios de tração e flexão de forma mais clara:

Gráfico 12. Média dos resultados de tração (2)



Fonte: criada pelo autor, 2024

Gráfico 13. Média dos resultados de flexão (2)

Fonte: criada pelo autor, 2024

Os resultados dos ensaios de flexão e tração (3% e 5%, moído e não moído) apresentaram resistência inferior aos resultados dos corpos de prova com resina pura.

Ao analisar os resultados dos ensaios de tração, a média de tensão da resina pura foi de 15,03MPa, enquanto com 3% de espínélio não moído foi de 7,67MPa e com 3% de pó de espínélio moído foi de 11,97MPa. Para os com 5% de pó de espínélio moído e não moído, tivemos 10,46MPa e 11,93MPa respectivamente, como mostra no gráfico 12 na página anterior.

Com os resultados dos ensaios de flexão, a média de tensão para resina pura foi de 1,11Mpa, enquanto com 3% de espínélio não moído foi de 0,83MPa e com 3% de pó de espínélio moído foi de 0,86MPa. Para os com 5% de pó de espínélio moído e não moído, tivemos 0,80MPa e 0,61MPa respectivamente, como mostra no gráfico 13 na página anterior.

Deste modo, o material com maior concentração de pó de espínélio tende a se romper mais facilmente quando submetidos aos esforços de tração e flexão, chegando a conclusão que o espínélio pode interferir na matriz polimérica da resina, criando áreas de fraqueza que não resistiram bem aos ensaios feitos, quando comparados com a resina pura.

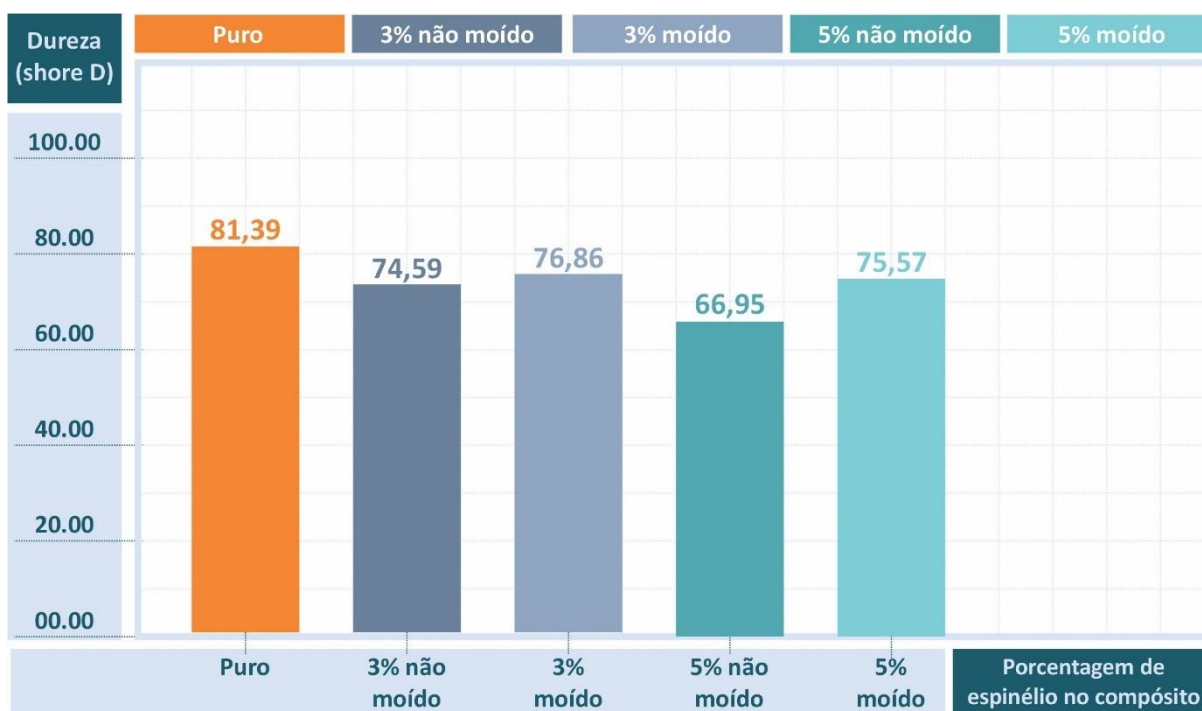
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA SHORE D

Quadro 6. Resultados dos ensaios de dureza shore D e suas médias

Ensaio de Dureza (Shore D)											
Resina Pura							3% de espínélio não moído				
quant. de ensaios	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Cp 4	média	desvio padrão	quant. de ensaios	Cp 1	Cp 2	média	desvio padrão
1	83,0	79,7	81,8	81,4	81,5	1,21	1	74,6	74,6	74,6	0
2	82,7	78,2	83,0	80,9	81,2	2,04	2	74,0	74,8	74,4	0,70
3	82,8	79,7	82,2	81,1	81,2	1,28	3	74,8	74,6	74,7	0,44
4	82,4	77,5	82,8	82,0	81,2	2,20	4	74,4	74,8	74,7	0,31
5	82,2	79,0	83,2	81,3	81,4	1,74	5	74,8	74,4	74,7	0,31
6	82,0	78,8	83,6	81,8	81,5	1,84	6	74,6	74,6	74,6	0
7	82,2	80,5	83,2	82,0	81,9	1,10	7	74,6	74,2	74,4	0,28
8	82,4	77,5	83,6	81,6	81,2	2,47	8	74,4	74,8	74,6	0,31
9	81,8	78,4	83,4	81,3	81,2	2,05	9	74,8	74,8	74,8	0
10	81,8	79,5	83,2	82,0	81,6	1,45	10	74,6	74,2	74,4	0,28

3% de espínélio moído					5% de espínélio não moído					5% de espínélio moído				
quant. de ensaios	Cp 1	Cp 2	média	desvio padrão	quant. de ensaios	Cp 1	Cp 2	média	desvio padrão	quant. de ensaios	Cp 1	Cp 2	média	desvio padrão
1	71,8	77,9	74,5	3,07	1	67,6	66,6	67,1	0,71	1	74,8	74,2	74,5	0,42
2	72,0	77,7	74,9	2,85	2	67,6	67,9	67,7	0,21	2	76,8	74,8	75,0	1,85
3	74,4	79,7	74,5	3,71	3	66,4	66,1	66,2	0,21	3	74,0	73,8	73,9	0,44
4	73,2	79,2	76,2	4,00	4	67,0	67,5	67,2	0,35	4	77,2	74,8	76,0	1,69
5	78,6	76,6	77,6	1,41	5	67,0	67,5	67,2	0,35	5	76,6	75,1	75,8	1,06
6	76,6	79,2	77,9	1,83	6	66,8	68,1	67,4	0,92	6	76,0	76,0	76,0	0
7	79,0	79,5	79,2	0,35	7	66,4	67,3	66,8	0,92	7	76,8	76,2	76,5	0,42
8	79,7	77,2	78,4	1,77	8	66,8	65,1	65,9	1,19	8	76,4	76,4	76,4	0
9	76,4	76,6	76,5	0,14	9	66,8	67,7	67,2	0,63	9	76,0	75,1	75,5	0,64
10	78,1	79,7	78,9	1,13	10	67,6	66,0	66,8	1,13	10	76,8	75,3	76,1	1,06

Fonte: criada pelo autor, 2024

Gráfico 14. Média dos resultados dos ensaios de dureza shore D

Fonte: criada pelo autor, 2024

Os resultados dos ensaios de dureza shore confirmam a queda de resistência do material compósito quando comparado com a resina pura, como ilustra o gráfico 14. Apresentando 81,39MPa para a resina pura, 74,59MPa e 76,86MPa para o compósito com 3% moído e não moído respectivamente e 66,95MPa e 75MPa para o compósito com 5% moído e não moído, respectivamente.

5 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.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver novos compósitos com diferentes teores de espinélio;
- Utilizar outros modelos de resina fotocurável, a nível de comparação com este trabalho.
- Aprimorar o método de moagem do espinélio, buscando uma homogeneização mais eficaz na matriz polimérica da resina e, conseqüentemente, evitar o decante do material.
- Confeccionar mais corpos de prova para cada teor de espinélio, obtendo mais resultados comparativos.

REFERÊNCIAS

A. L. Heck, S. R. Taffarel, R. Hoffmann, U. L. Portugal Jr., S. L. Jahn, E. L. Foletto
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Campus Universitário, Camobi, km 9, Santa Maria, RS 97015-190

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.

ALVES, E. R. **Nanocompósitos de cerâmicas bioativas para aplicações biomédicas: síntese, caracterização e propriedades**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais)–Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ARAÚJO, Gabriel G. de. **FABRICAÇÃO ADITIVA: TECNOLOGIAS E PARÂMETROS**. REGRAD, UNIVEM/Marília-SP, v. 10, n. 1, p 417 - 432, outubro de 2017.

ARAÚJO, F. A. D. **Elaboração de protocolo de cimentação de duas cerâmicas odontológicas, a partir da análise morfológica e resistência adesiva**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – UniFOA, Volta Redonda, Rio de Janeiro.

ARAÚJO, . V. dos S.; CLEMENTINO, . O.; TORRES, . M. de A. **Manufatura aditiva/impressão 3d direcionada à sustentabilidade: panorama bibliográfico brasileiro e diretrizes de aplicação: SYSTEMATIC BIBLIOGRAPHICAL REVIEW AND GUIDELINES ON ADDITIVE MANUFACTURING/3D PRINTING ORIENTED TO SUSTAINABILITY**. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 81–90, 2024.

ASHBY, Michael F.; JOHNSON, Kara. **Materiais e design: a arte e a ciência da seleção de materiais no design de produto** . 3.ed. São Paulo: Blucher, 2014.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. **Artiber editora, São Paulo**, v. 24, 2002.

CUNICO, Marlon Wesley Machado. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. Concep3D Pesquisas Científicas Ltda; Curitiba, 2014.

DA SILVA, João Maurício FERRAZ et al. **Resinas compostas: estágio atual e perspectivas**. Rev Odonto, v. 16, n. 32, p. 98-104, 2008.

E. Y. Sako; D. H. Milanez; M. A. L. Braulio; L. R. M. Bittencourt¹; V. C. Pandolfelli, **Formação in-situ ou adição de espinélio pré-formado: o que é melhor para concretos refratários aluminosos?**, Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais - GEMM, Departamento de Engenharia de Materiais Universidade Federal de S. Carlos, Rod. Washington Luiz, km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP 13565-905

ESPINÉLIO – MgAl₂O₄, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Instituição de ensino superior em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2021.

Fantozzi G. **Welcome to Ceramics: A New Open Access Scientific Journal on Ceramics Science and Engineering.** *Ceramics*. 2018; 1(1):1-2.

<https://doi.org/10.3390/ceramics1010001>

Ferry P.W. Melchels, Jan Feijen, Dirk W. Grijpma, **A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering,** *Biomaterials*, Volume 31, Issue 24, 2010 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961210005661>)

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 .

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.

LOIOLA, Marlos et al. **Impressão 3D: materializando o virtual.** *OrtodontiaSPO*, v. 51, n. 3, p. 344-9, 2018.

Mateus V. Pereira , Reverso F. Queroa , Dosil P. de Jesusa, e Juliano A. Bonacina, **Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas**, 13083-970 Campinas – SP, Brasil;

Max Pereira Pinheiro, Cristiano; Ehlers Mota, Gabriela; Steinhaus, Camilla; de Souza, Mikaela **Impressoras 3d: uma mudança na dinâmica do consumo** *Signos do Consumo*, vol. 10, núm. 1, 2018, Janeiro-Junho, pp. 15-22 Universidade de São Paulo.

MORANDINI, Moisés Miranda; DEL VECHIO, Gustavo Henrique. **IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências.** *Interface Tecnológica*, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 52-66, jul./dez. 2020. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/866/52>. Acesso em: 1 de setembro de 2024.

NEVES, E. S. ALMEIDA, B. V. CARRERI F. D. C. VERNILLI F. **Síntese do espinelho MgAl₂O₄ a partir de soluções aquosas salinas de alumínio e magnésio.** *Cadernos UniFOA Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais, Volta Redonda – RJ.* Junho, 2012.

NUNES, D. S. S. MELLO I. L. **Principais Aspectos da Polimerização do 1,3-Butadieno.** Instituto de Química, UERJ, 2005.

OKUSO, L. H. **Escolhendo uma impressora 3d de filamentos: O que você precisa saber para tomar sua decisão** (Guia da impressão 3D Livro 1), 1ª edição, São Paulo, 2019.

PAGGI, R. A. **Sinterização seletiva a laser de compósitos com gradiente funcional entre poliamida 12 e nanotubos de carbono aplicáveis no setor aeroespacial.** Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, Outubro de 2008.

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>.

PAULO VITOR NUNES DA SILVA; MARIA PAULA DE C. F. FONTES; VINICIUS DOS SANTOS ANDRADE; RENATA MARTINS PARREIRA; ROBERTO DE OLIVEIRA MAGNAGO. Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico com matriz PEAD reforçado com resíduo de impressora a laser. . **Tudo é Ciência: Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares**, [S. l.], n. 1, p. 1–8, 2022. DOI: 10.47385/tudoeciencia.64.2022. Disponível em: <https://conferenciasunifoa.emnuvens.com.br/tc/article/view/64>. Acesso em: 19 nov. 2024.

PAIXÃO, J. F. D. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – ipea – Brasília, 2012.

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

Raimundo, Gabriela de Abreu Guilherme. **Projeto e Fabricação de Componentes Poliméricos por Manufatura Aditiva, Impressão 3D, Extrusão e Moldagem por Injeção**, UFSC, adosgo de 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/212275>

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos estruturais: Tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

ROBOTICS & AUTOMATION NEWS. **3D Printing: Reducing Material Costs and Waste**. 2023. Disponível em: [Robotics & Automation News](https://roboticsandautomationnews.com/).

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>

SANTOS, M. A. Dos. OLIVEIRA, A. P. OLIVEIRA, A. M. **Um estudo da perspectiva do uso de resíduo industrial de silício como adição mineral em matrizes cimentícias: origem, processamento e propriedades**. REUCP, Petrópolis, Volume 15, nº 1 (2021), P. 103-119 ISSN 2318-0692

SILVA, Ebele Adaobi. **Caracterização microestrutural e determinação das propriedades mecânicas e ópticas de um novo material cerâmico infiltrado com polímero**. 2020. Tese (Doutorado em Reabilitação Oral) - Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, University of São Paulo, Ribeirão Preto, 2021. doi:10.11606/T.58.2021.tde-21102022-153549. Acesso em: 2024-10-23.

SILVA, R. D. S. D. **Síntese Do Espinélio MgAl₂O₄ Em Sais Fundidos**. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2016.

Tulio Matencio Subeditor de **Advanced Ceramic Materials. Laboratório de Materiais e Pilha a Combustível** - LaMPaC, Universidade Federal de Minas Gerais

/ Departamento de Química, Av. Antonio Carlos, 6627 - Pampulha, Caixa Postal Química: 702 - CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil.

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.

VOLPATO, N. (Editor), **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**, São Paulo, Blücher, 2007.

YANG, Shuguang; DU, Peng. **The Application of 3D Printing Technology in Furniture Design. 2022**. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/1960038>. Acesso em: 15 de agosto de 202

