

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

LÍVIA TAVARES OLIVEIRA

**PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D DE MATERIAIS CERÂMICOS POR DEPOSIÇÃO
DE BARBOTINA COM RESINA DE CURA POR LUZ ULTRAVIOLETA**

Revisão Bibliográfica

Guaratinguetá

2024



LÍVIA TAVARES OLIVEIRA

**PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D DE MATERIAIS CERÂMICOS POR DEPOSIÇÃO
DE BARBOTINA COM RESINA DE CURA POR LUZ ULTRAVIOLETA**

Revisão Bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia e Ciências, Guaratinguetá,
para obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador(a): Prof. Dr. Luis Rogério de
Oliveira Hein

Guaratinguetá

2024

O48p

Oliveira, Livia Tavares

Processo de impressão 3D de materiais cerâmicos por deposição de barbotina com resina de cura por luz ultravioleta: revisão bibliográfica / Livia Tavares Oliveira - Guaratinguetá, 2024.

40 f : il.

Bibliografia: f. 37-40

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão tridimensional.
3. Materiais cerâmicos. 4. Polimento eletrolítico.
I. Título.

CDU 620.1

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

LÍVIA TAVARES OLIVEIRA

**PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D DE MATERIAIS CERÂMICOS POR DEPOSIÇÃO
DE BARBOTINA COM RESINA DE CURA POR LUZ ULTRAVIOLETA**

Revisão Bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharelado em Engenharia de Materiais.

Data da defesa: 22/11/2024

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
Data: 04/02/2025 21:04:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá



Documento assinado digitalmente
KELLY CRISTINA COELHO DE CARVALHO BENINI
Data: 17/02/2025 10:56:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá



Documento assinado digitalmente
LUIS FELIPE BARBOSA MARQUES
Data: 05/02/2025 10:30:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luíz Felipe Barbosa Marques
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá



Documento assinado digitalmente
TUANE STEFANIA REIS DOS SANTOS
Data: 13/02/2025 11:22:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tuane Stefania Reis dos Santos
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus;

ao meu orientador Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein, pela orientação, apoio e ensinamentos, não somente sobre o trabalho, mas também sobre a vida;

à Prof.^a Dr.^a Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini, ao Luíz Felipe Barbosa Marques e à Tuane Stefania Reis dos Santos, por participarem da banca e pelos conselhos;

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de pesquisa (processo 123580 / 2023-4);

aos meus pais Márcia e Moacir, por sempre apoiarem meus estudos e minhas escolhas;

ao meu namorado Lucas, pelo incentivo, companheirismo, carinho, paciência e amor;

aos meus amigos e amigas da faculdade, pelo constante apoio e amizade.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”

(Martin Luther king).

RESUMO

O trabalho concentra-se em uma revisão bibliográfica sobre os processos de impressão 3D de cerâmicas, as técnicas de fotopolimerização, o comportamento reológico, os desafios na obtenção de peças porosas, peças densas e sem defeitos, e as estratégias para otimização das propriedades mecânicas e geométricas das peças produzidas. Além disso, traz estudos que investigam diferentes combinações de partículas cerâmicas para reduzir a contração e melhorar a densidade, bem como métodos de cura mais controlados para evitar defeitos estruturais. Também apresenta uma tentativa de desenvolvimento de uma impressora de baixo custo para impressão de cerâmicas por deposição de barbotinas, embora o projeto tenha avançado apenas até a construção da estrutura da impressora. Este trabalho é uma revisão bibliográfica sobre os processos de impressão 3D de cerâmicas, as técnicas de fotopolimerização, o comportamento reológico, os desafios na obtenção de peças porosas, peças densas e sem defeitos, as estratégias para otimização das propriedades mecânicas e geométricas das peças produzidas. Além disso, traz estudos que investigam diferentes combinações de partículas cerâmicas para reduzir a contração e melhorar a densidade, bem como métodos de cura mais controlados para evitar defeitos estruturais. A impressão 3D de materiais cerâmicos é uma alternativa promissora aos processos convencionais, permitindo a fabricação de peças com geometrias complexas e personalizadas. Por mais que o objetivo do trabalho seja estudar formas de obter peças porosas para a produção de scaffolds, as informações que as pesquisas em busca de peças densas nos trazem podem ser muito vantajosas no entendimento do processo. Na literatura, há muitos estudos sobre a fabricação de peças cerâmicas totalmente densas e sem defeitos devido à presença de poros e rachaduras, com propriedades comparáveis às dos materiais processados por tecnologias convencionais. Isso requer o controle de várias etapas do processo: desde a preparação da suspensão até a otimização dos parâmetros de impressão e o ajuste de ciclos térmicos adequados de eliminação de ligantes e sinterização. (Coppola et al, 2022; Chaudhary et al, 2022; Wu et al, 2016) A interação de uma fonte de luz UV, como um feixe de laser, com o sistema curável contendo partículas cerâmicas submicrométricas e micrométricas leva ao fenômeno de dispersão, que interrompe o processo de polimerização e é o principal fator de impacto na cura do material (Tarabeux, 2018; Yu et al, 2022; Chaudhary et al, 2022). Em contrapartida, as

propriedades mecânicas e funcionais das cerâmicas fabricadas por esse método acabam não sendo as ideais devido ao conteúdo limitado de sólidos dos pós cerâmicos. Em processamento coloidal, um baixo conteúdo de sólidos geralmente resulta em uma baixa densidade das cerâmicas produzidas. Portanto, a sinterabilidade e a formabilidade das cerâmicas preparadas por cura UV estão inversamente correlacionadas. (Wu et al, 2016) A impressão 3D com resinas de cura UV apresenta enorme potencial como uma alternativa viável e eficiente para a fabricação de cerâmicas em diversas aplicações comerciais e científicas. No final do trabalho, é apresentada uma tentativa de desenvolvimento de uma impressora de baixo custo para impressão de cerâmicas por deposição de barbotinas, embora o projeto tenha avançado apenas até a construção da estrutura da impressora.

Palavras-chave: manufatura aditiva; fotopolimerização; cerâmica; resina fotopolimerizável.

ABSTRACT

The document focuses on a literature review of ceramic 3D printing processes, photopolymerization techniques, rheological behaviour, the challenges of obtaining porous, dense and defect-free parts, and strategies for optimizing the mechanical and geometric properties of the parts produced. It also includes studies investigating different combinations of ceramic particles to reduce shrinkage and improve density, as well as more controlled curing methods to avoid structural defects. It also presents an attempt to develop a low-cost printer for printing ceramics by barbotine deposition, although the project has only progressed as far as the construction of the printer structure. This work is a bibliographical review of ceramic 3D printing processes, photopolymerization techniques, rheological behaviour, the challenges of obtaining porous, dense and defect-free parts, and strategies for optimizing the mechanical and geometric properties of the parts produced. It also includes studies investigating different combinations of ceramic particles to reduce shrinkage and improve density, as well as more controlled curing methods to avoid structural defects. 3D printing of ceramic materials is a promising alternative to conventional processes, allowing the manufacture of parts with complex and customized geometries. Although the aim of this work is to study ways of obtaining porous parts for the production of scaffolds, the information provided by research into dense parts can be very useful in understanding the process. In the literature, there are many studies on the manufacture of totally dense ceramic parts without defects due to the presence of pores and cracks, with properties comparable to those of materials processed by conventional technologies. This requires the control of various stages of the process: from the preparation of the suspension to the optimization of the printing parameters and the adjustment of suitable thermal cycles of binder elimination and sintering (Coppola et al, 2022; Chaudhary et al, 2022; Wu et al, 2016). The interaction of a UV light source, such as a laser beam, with the curable system containing submicrometric and micrometric ceramic particles leads to the phenomenon of dispersion, which interrupts the polymerization process and is the main factor impacting the curing of the material (Tarabeux, 2018; Yu et al, 2022; Chaudhary et al, 2022). On the other hand, the mechanical and functional properties of ceramics manufactured by this method are not ideal due to the limited solids content of the ceramic powders. In colloidal processing, a low solids content generally results in a low density of the ceramics produced.

Therefore, the sinterability and formability of ceramics prepared by UV curing are inversely correlated. (Wu et al, 2016) 3D printing with UV curing resins has enormous potential as a viable and efficient alternative for manufacturing ceramics in various commercial and scientific applications. At the end of the paper, an attempt is made to develop a low-cost printer for printing ceramics by barbotine deposition, although the project has only progressed as far as the construction of the printer structure.

Keywords: additive manufacturing; light-curing; ceramics; light-curing resin.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	12
2.2	FOTOPOLIMERIZAÇÃO	17
2.3	REOLOGIA.....	18
2.3.1	Fluidos não newtonianos dependentes do tempo	19
2.3.2	Fluidos não newtonianos independentes do tempo.....	20
2.3.3	Reologia de cerâmicas para impressão 3D	21
2.3.4	Parâmetros influentes nas propriedades reológicas.....	22
2.4	CERÂMICA COM RESINA DE CURA UV PARA IMPRESSÃO 3D	22
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	29
4	ATIVIDADES REALIZADAS	30
4.1	DESENHO E CONFECÇÃO DE PEÇAS.....	30
4.2	ESTRUTURA DA IMPRESSORA.....	33
5	CONCLUSÃO.....	35
	PROPOSTAS DE PROJETOS FUTUROS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de manufatura aditiva vêm ganhando grande interesse no meio industrial por conta de uma série de vantagens em relação aos processos convencionais, como baixa geração de resíduos, possibilidade de personalização de produtos, menor restrição na produção de peças com geometrias complexas, dentre outras. Em materiais cerâmicos, processos de manufatura aditiva por impressão 3D têm surgido como alternativas interessantes para a solução de problemas de fabricação de estruturas complexas encontrados em processos convencionais.

A impressão 3D de cerâmicas com o uso de resinas fotopolimerizáveis é mais comum em métodos como estereolitografia, embora sejam observados efeitos colaterais indesejáveis, como contração severa, trincas, etc., mas várias alternativas estão em estudo (Chaudhary et al, 2022). Por exemplo, Shen et al (2022) conseguiram reduzir a contração em moldes de alumina estudando a adição controlada de partículas finas às suspensões, em combinação com partículas maiores, para impressão 3D por estereolitografia, de certo modo reproduzindo resultados anteriores de Wu et al (2016). Também por estereolitografia, Yu et al (2022) desenvolveram modelos matemáticos para otimização de parâmetros para o controle da cura de corpos verdes e avaliaram que a definição da espessura de camadas tem importância central no controle da contração. Zhao et al (2022) estudaram o mecanismo de formação de lamelas e as estratégias de controle na impressão 3D de alumina por DLP (digital light processing) para ajuste da anisotropia na resistência mecânica.

Outro processo que utiliza resinas fotossensíveis é o da fotopolimerização em tanques (vat photopolimerization, VPP). A estratégia é a mesma, obter o corpo verde a partir da cura de uma suspensão de pós cerâmicos em resina fotossensível, utilizando uma tela de cristal líquido para iluminar a resina com luz ultravioleta. Este foi o método adotado por Su et al (2022) para obter compostos porosos livres de trincas pela associação entre os efeitos da fotopolimerização e das reações do processo de sinterização entre pós cerâmicos de baixo custo de Li_2CO_3 e SiO_2 . Já Wu et al (2020) usaram uma variante do processo masked stereolithography apparatus (MSLA), ou estereolitografia com máscara, de baixo custo e muito comum na impressão de polímeros, denominada ceramic mask projection stereolithography (CMSL), mas se depararam com heterogeneidades na cura dos corpos verdes, levando a trincas entre as camadas impressas (delaminações).

A priori, a estratégia deste projeto era obter peças cerâmicas porosas por impressão 3-D por deposição de barbotinas usando resinas fotossensíveis como agente aglomerante para a obtenção dos corpos verdes. Ao mesmo tempo, criar uma impressora de baixos custos de aquisição e manutenção, com projeto open-hardware. Contudo, conseguimos avançar apenas até a construção da estrutura da impressora devido à falta de recursos financeiros. A pesquisa então foi realizada por meio de uma revisão da literatura, na qual informações relevantes foram coletadas sobre o tema proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Uma alternativa à moldagem convencional é a utilização da impressora 3D, que é um tipo de tecnologia de fabricação ativa, que possibilita a produção de produtos desenhados em softwares CAD, com diferentes tipos de materiais, formando um modelo tridimensional por sucessivas camadas de materiais. A impressão 3D possui muitas vantagens, como a possibilidade de automação, redução de mão de obra, liberdade de customização no projeto, produção no local, redução de custos e tempo de construção, redução de desperdícios e menor efeito de contaminação no meio ambiente. (Paul et al, 2023; Chaudhary et al, 2022; Coppola et al, 2022)

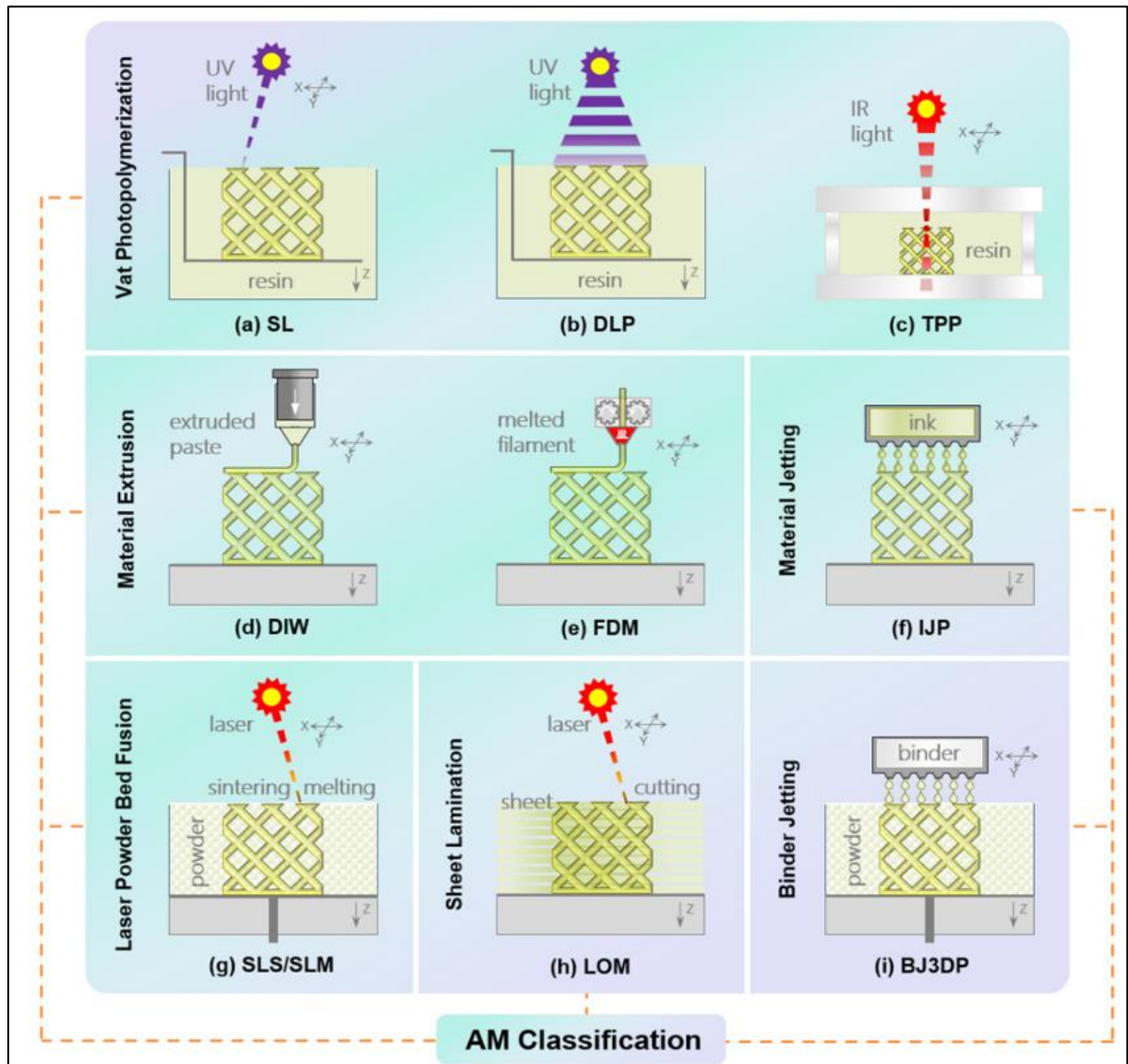
De forma geral, os processos de impressão 3D ocorrem em 8 etapas: primeiramente, é desenvolvida ou obtida uma representação 3D sólida em software da peça a ser fabricada; esse modelo é então convertido para o formato STL; o arquivo STL é transferido para uma máquina de manufatura aditiva; sucedendo, devem ser configurados os parâmetros de impressão; então as peças são impressas e podem precisar de um pós-processamento antes de estarem prontas para uso. (Amaral, 2019; Pires, 2022)

Há diferentes métodos de impressão 3D para as mais diversas finalidades. As tecnologias podem ser classificadas segundo seu princípio físico/químico de funcionamento; sendo elas: (Amaral, 2019)

- a) Fotopolimerização em cuba (SL, DLP e TPP): emprega polímero fotossensível líquido sendo curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por radiação;
- b) Extrusão de material (FDM): o material fundido é extrudado através de um bico ou orifício e depositado formando a camada;
- c) Jateamento de material (IJP): ocorre com o material sendo depositado em pequenas gotas;
- d) Jateamento de aglutinante (BJ3DP): um agente aglutinante líquido é depositado para unir materiais em pó;
- e) Fusão de leito de pó (SLS/SLM): é usado um feixe de energia térmica para fundir seletivamente regiões de um leito de pó;
- f) Adição de lâminas (LOM): são recortadas lâminas de material para serem unidas (aderidas) formando um objeto;

- g) Deposição com energia direcionada: usa energia térmica para fundir materiais à medida que estes são depositados.

Figura 1 – Classificação e diagramas esquemáticos das diferentes técnicas de manufatura aditiva mais relevantes para o processamento e fabricação de cerâmicas derivadas de polímeros.



Fonte: Chaudhary (2022).

Um método de impressão que pode ser realizado é baseado na cura de uma resina fotoreativa com luz UV ou outra fonte de energia similar. Partes cerâmicas com formas complexas em 3D podem ser fabricadas por este método, misturando o pó cerâmico com a resina curável por UV (Tarabeux, 2018; Wua et al, 2016).

A impressão 3D possui uma exigência distinta da reologia, onde o material deve ser fluido o suficiente para que possa ser bombeado e extrudado, mas também exibir boa resistência inicial, que o permita suportar o peso das camadas que serão depositadas (Duan,2022). Esse é um dos desafios a serem enfrentados em relação à formulação do material usado, pois sua viscosidade e propriedade elástica devem ser precisamente controladas para a retenção das formas. (Chaudhary et al, 2022)

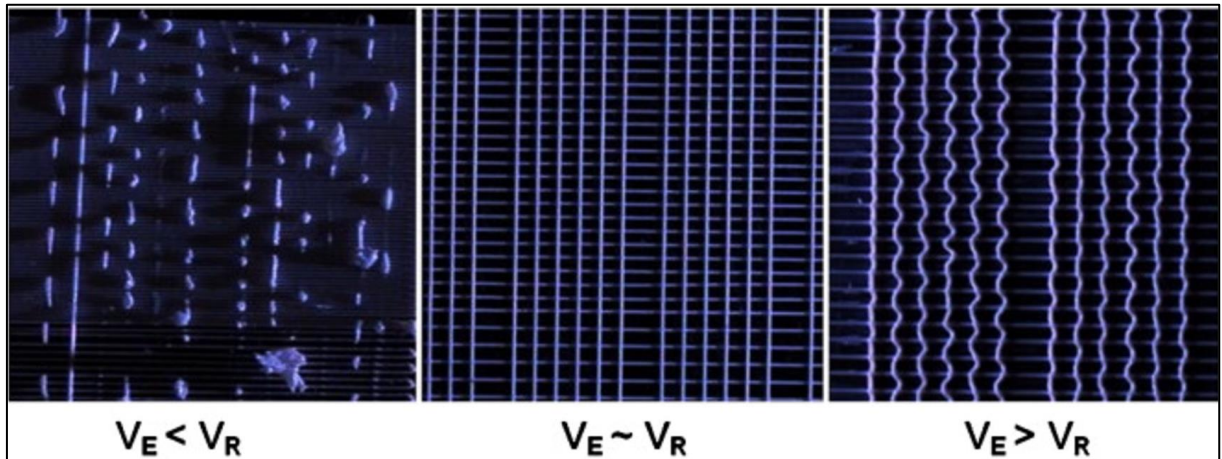
No método de manufatura aditiva por modelação, os materiais são extrudados através de uma extrusora, que pode ser acoplada a um sistema robótico ou pórtico, sem qualquer cofragem. Sendo assim, descobriu-se que a resistência das amostras imprimíveis era diferente em três direções de impressão (Paul et al, 2023). Os fatores de impressão são muito importantes nas propriedades finais do corpo de prova impresso, como a velocidade do bocal e a vazão do material (Paul et al, 2023; Zhang, 2022).

Os objetos impressos em 3D são produzidos no plano XY e, em seguida, colocados em camadas na direção Z camada por camada. Isso pode resultar em baixo desempenho de aderência interlamelar, impactando no valor da resistência à compressão (Duan,2022). De acordo com Paul et al, os corpos de prova impressos apresentam maior resistência nos sentidos perpendicular e longitudinal de impressão. Os materiais na direção perpendicular experimentam maior compactação do que em outras direções. Igualmente, materiais longitudinais ao sentido de impressão também se tornam compactados devido à pressão induzida pela bomba, forma e tamanho do bico.

A velocidade do bocal afeta significativamente a precisão dimensional das camadas impressas e na resistência de ligação entre elas, sendo a velocidade de impressão 3D de 50 mm/s para materiais à base de cimento (Paul et al, 2023; Zhang, 2022). Em teoria a largura de impressão diminui com o aumento da velocidade de impressão. Na prática, quando a velocidade de impressão é inferior a 50 mm/s, a largura da linha de impressão diminui mais rapidamente e é irregular. Isso ocorre porque, em velocidades de impressão mais lentas, há a necessidade de reduzir a vazão. Quando a velocidade de impressão é superior a 50 mm/s, a diminuição da largura da linha de impressão é mais estável e a vazão pode ser facilmente controlada aumentando a precisão dimensional (Zhang, 2022). Hazan et al (2012) imprimiram tintas coloidais curáveis por UV com partículas cerâmicas com velocidade de extrusão

de filamento linear (V_E) e velocidades de translação do robô (V_R) de 8,3 mm/s, obtendo um diâmetro médio das fibras de 154 μm .

Figura 2 – Efeito da vazão (V_E) e da velocidade do cabeçote (V_R).



Fonte: Hazan (2012).

Outro ponto interessante é o tipo de impressão, contínua ou descontínua. A impressão contínua sem juntas leva à impressão ininterrupta o que gera forças irregulares na superfície de impressão e leva a diferentes graus de deformação na superfície de impressão, deformação na parte inferior, aumento da rugosidade da superfície de impressão e reduz a qualidade de impressão. Já na impressão descontínua evitamos os defeitos descritos e conseguimos melhorar a qualidade de impressão. Embora haja a formação de grande deformação das primeiras camadas, isso ocorre devido à carga de peso das camadas superiores, as quais geram uma deformação uniforme e têm menor impacto na qualidade de impressão. Contudo, esse tipo de impressão causa uma concentração de tensões na descontinuidade criada. Dessa forma, se faz necessária a realização de um tratamento de nivelamento durante a extrusão, o qual também aumenta a pressão normal e o poder de ligação entre as camadas. (Zhang, 2022)

Figura 3 – Efeito da impressão contínua e descontínua.



Fonte: Zhang (2021).

A resolução da impressão também é significativamente influenciada pelo diâmetro do bico, que pode variar de dezenas a centenas de micrômetros, resultando no efeito de escada, causando baixa resolução, acabamento superficial ruim e alta anisotropia nas propriedades geométricas e mecânicas das peças impressas. Nos processos de manufatura aditiva baseados em suspensões, são necessários múltiplos processos de formulação, proporcionando alta carga de sólidos para a fabricação de estruturas cerâmicas densas, o que, por sua vez, leva ao aumento da viscosidade, heterogeneidade e instabilidade (por exemplo, sedimentação). (Chaudhary et al, 2022)

O desenvolvimento do texto é a parte principal do trabalho, onde o tema será amplamente desenvolvido e apresentado. A exposição do assunto deve ser ordenada e pormenorizada, dividida em seções e subseções, que vão variar em função da abordagem do tema e da metodologia adotada. Em geral, é composto pelos seguintes tópicos/divisões: Proposição; Revisão da literatura; Material e Método; Resultado e Discussão. Recomenda-se consultar seu/sua orientador/a para definir o formato e apresentação do texto no desenvolvimento do seu trabalho.

2.2 FOTOPOLIMERIZAÇÃO

As resinas utilizadas na impressão 3D por fotopolimerização são compostas principalmente por materiais monoméricos ou oligoméricos, sejam eles naturais ou sintéticos, além de um fotoiniciador. Esses materiais também podem conter solventes, cargas, corantes absorvedores de luz e inibidores de cura. Os monômeros e oligômeros usados em resinas fotopolimerizáveis são geralmente funcionalizados por acrilatos ou metacrilatos, sendo esse um método eficiente de conversão do estado líquido para objetos poliméricos sólidos, mediante a exposição à luz UV-Vis e na presença de um fotoiniciador específico. (Lara, 2019; Palhares, 2023; Amaral, 2019)

O processo de fotopolimerização inicia-se com a absorção de luz pelo fotoiniciador, geralmente no espectro UV-Vis. A energia luminosa absorvida excita as moléculas do fotoiniciador, que, após essa excitação, reagem e formam radicais livres. Esses radicais livres são fundamentais para a quebra das ligações duplas dos monômeros presentes na resina. À medida que as ligações duplas dos monômeros são quebradas, esses monômeros se ligam entre si, iniciando um processo em cadeia que resulta na formação de longas cadeias poliméricas ou macromoléculas, transformando assim a resina líquida em um sólido polimérico. (Lara, 2019; Palhares, 2023)

Existem dois principais tipos de reações de fotopolimerização: a radicalar e a catiônica. Na fotopolimerização radicalar, a luz absorvida gera radicais livres, que se ligam às moléculas de monômeros, desencadeando a polimerização. Já na fotopolimerização catiônica, a luz gera espécies catiônicas que se adicionam aos monômeros, promovendo o crescimento da cadeia polimérica. (Amaral, 2019)

Atualmente a maioria das resinas consiste em monômeros multifuncionais e oligômeros telecíclicos, que possuem uma dupla ligação de alta reatividade devido ao grupo acrilato. A tecnologia de cura por radicais livres baseada na química de acrilato/metacrilato compreende mais de 90% de materiais de cura por radiação. (Amaral, 2019)

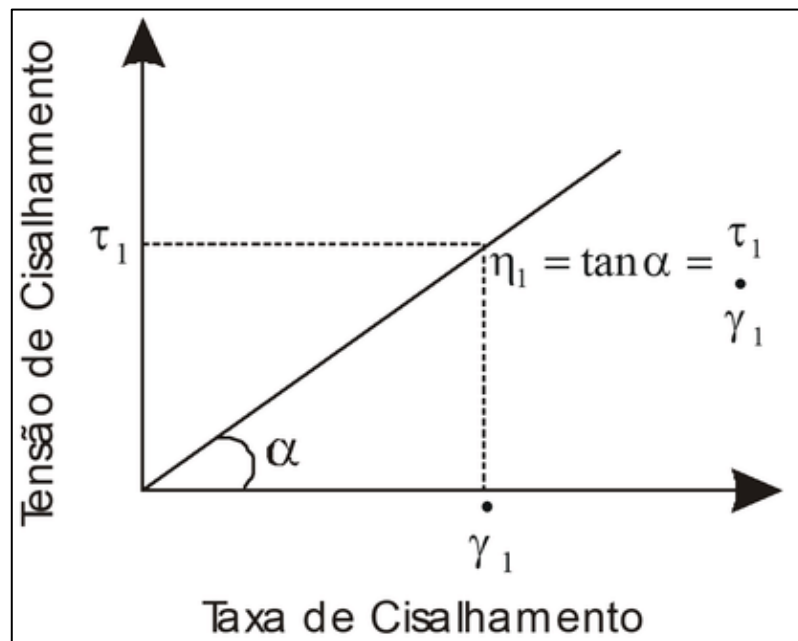
2.3 REOLOGIA

A reologia estuda o fluxo e a deformação dos materiais, ou seja, o quanto um material flui e se deforma sob a aplicação de um esforço durante um intervalo de tempo. Isaac Newton foi o primeiro a expressar a lei básica da viscosimetria, descrevendo o comportamento de fluxo de um líquido ideal:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Newton assumiu que o gráfico equivalente dessa equação para um líquido ideal seria uma linha reta, onde a viscosidade não é afetada por mudanças na taxa de cisalhamento (Figura 1).

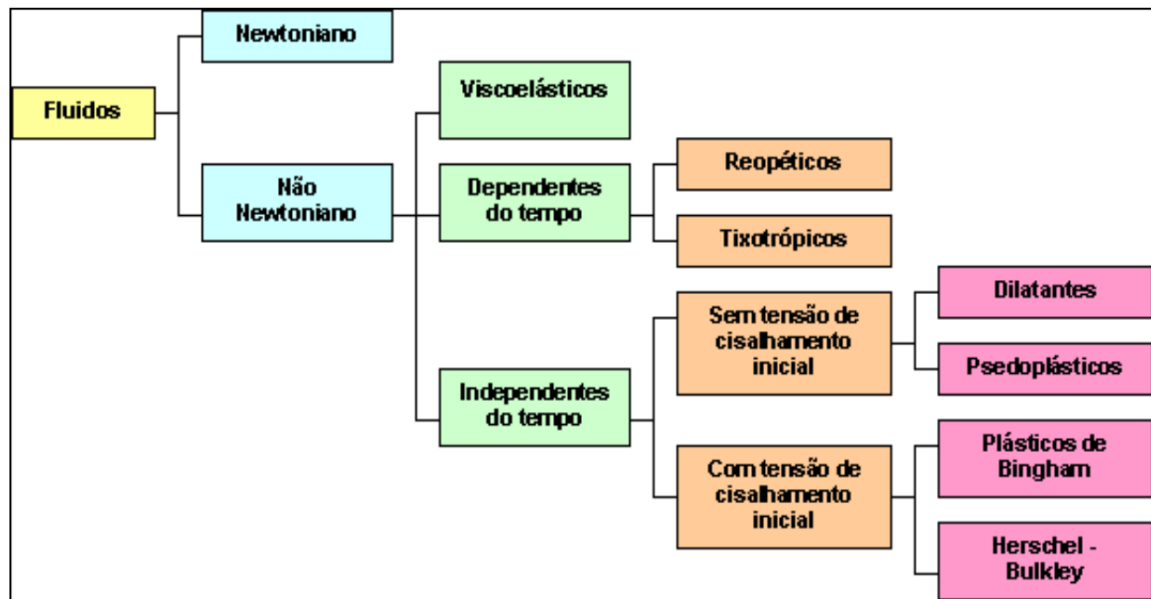
Figura 4 – Curva de fluxo de um líquido Newtoniano.



Fonte: Schramm (2006).

A partir desse princípio, os líquidos foram separados em Newtonianos e não Newtonianos, sendo este último dividido em outros três grupos (Figura 2). (Schramm, 2006)

Figura 5 – Divisão entre tipos de fluidos de acordo com seu comportamento.



Fonte: Gonçalves et al (2017).

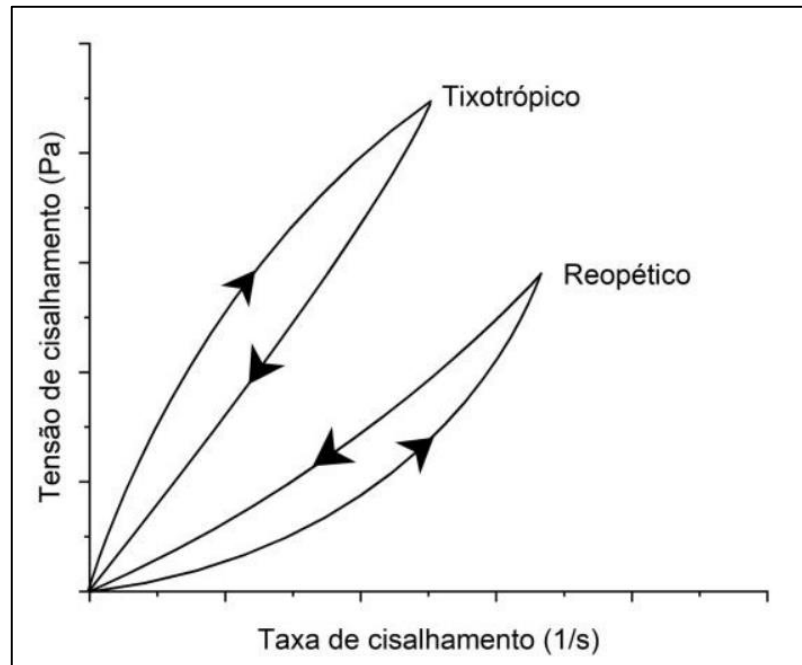
2.3.1 Fluidos não newtonianos dependentes do tempo

Existem fluidos que ao sofrer a ação de tensões tem o seu perfil de deformação alterado em função do tempo de ação da força e do histórico de cisalhamento sofrida anteriormente (histerese). Esses fluidos são divididos em duas categorias:

- Fluidos tixotrópicos (afinantes):** fluidos que possuem uma estrutura que é quebrada em função do tempo e da taxa de deformação. Apresentam um decréscimo reversível no tempo da força tangencial necessária para manter uma taxa de deformação constante, a uma temperatura constante (Gonçalves et al, 2017). Quando a estrutura é rompida, a viscosidade cai com o tempo de cisalhamento até que assintomaticamente atinja o nível mais baixo possível para uma determinada taxa de cisalhamento (Schramm, 2006). As tintas são um exemplo de fluidos que exibem comportamento tixotrópico.
- Fluidos reopéticos (espessantes):** tendo comportamento oposto ao tixotrópico, os fluidos reopéticos são capazes de desenvolver ou rearranjar uma estrutura enquanto são submetidos a uma tensão de cisalhamento. Apresentam um acréscimo reversível no tempo da força tangencial necessária para manter uma taxa de deformação constante, a uma temperatura constante. Se mantiver o tempo de aplicação, a

deformação será cada vez menor, e o fluido torna-se mais espesso. (Gonçalves et al, 2017)

Figura 6 – Comportamento dos fluidos dependentes do tempo.



Fonte: Machado et al (2022).

2.3.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo

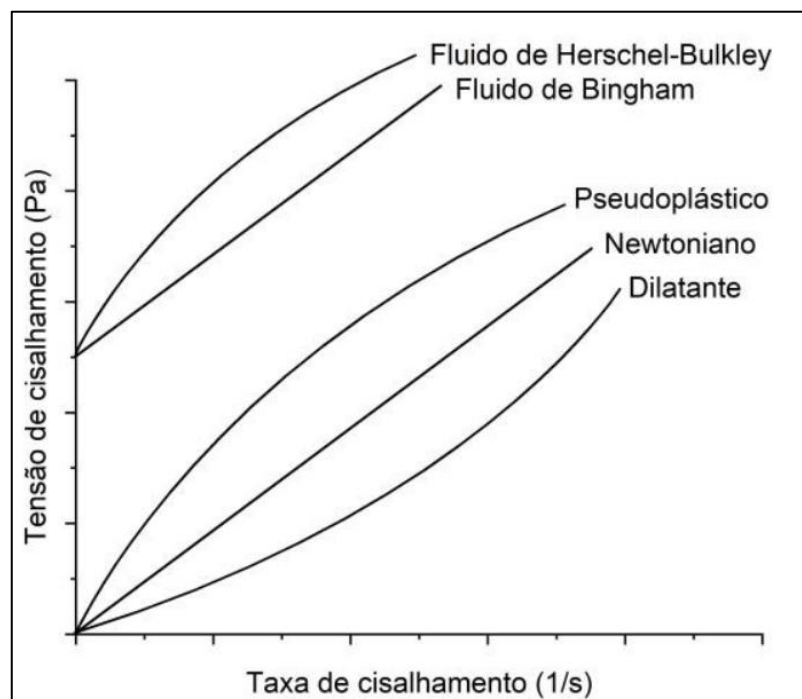
Ao contrário dos comportamentos descritos no tópico anterior, serão apresentados os fluidos nos quais o tempo não possui influência no seu comportamento. Esses são divididos entre os fluidos que exigem uma tensão inicial para que se inicie o escoamento (fluido de Herschel-Bulkley e fluido de Bingham) e aqueles que escoam sem qualquer tensão inicial aplicada (fluidos pseudoplásticos e dilatantes). Segue uma breve explicação sobre cada um deles:

- a) Fluidos de Herschel-Bulkley: fluidos que precisam de um determinado valor de tensão para que o escoamento ocorra. Com o início do escoamento há um aumento na viscosidade, seja devido à cura do material, perda de solvente, entre outros. Ao contrário dos fluidos reopéticos, não retornam à viscosidade original. (Schramm, 2006; Gonçalves et al, 2017)
- b) Fluidos de Bingham: fluidos que precisam de um determinado valor de tensão para que o escoamento ocorra. Contudo, uma vez que essa tensão seja alcançada, apresentam comportamento linear, de maneira

análoga a um fluido newtoniano. (Schramm, 2006; Gonçalves et al, 2017)

- c) Fluidos pseudoplásticos: Fluidos pseudoplásticos apresentam uma relação inversamente proporcional entre a viscosidade e a tensão de escoamento, à medida que há o aumento da taxa de cisalhamento o fluido sofre uma diminuição de sua viscosidade. (Souza, 2016)
- d) Fluidos dilatantes: Os fluidos dilatantes sofrem um aumento da viscosidade mediante o aumento da taxa de cisalhamento, característica inversa ao comportamento dos fluidos pseudoplásticos. Tal comportamento é encontrado principalmente em suspensões que possuem grande concentração de partículas sólidas. (Souza, 2016)

Figura 7 – Comportamento dos fluidos independentes do tempo.



Fonte: Machado et al (2022).

2.3.3 Reologia de cerâmicas para impressão 3D

Panda et al. (2018) afirmaram que um dos maiores desafios na impressão é a compreensão sobre como o material poderá escoar por um duto sem causar entupimento, ao mesmo tempo em que ele apresenta um comportamento reológico adequado para mantê-lo em sua forma após depositado sobre a superfície, ou seja, é desejável que se tenha um comportamento tixotrópico.

Idealmente, um bom material capaz de ser aplicado em impressão por extrusão deve apresentar baixa tensão de escoamento estática, o que permite o início do fluxo, além de baixa viscosidade dinâmica, para garantir um transporte suave ao longo do duto. Após extrudado, o material deve aumentar rapidamente sua tensão de escoamento, de tal forma que possa sustentar a carga das camadas subsequentes sem deformação excessiva. (Gonçalves, 2023)

A quantidade de informações a respeito da reologia de suspensões cerâmicas em resinas é limitada. Como a aplicação desse material na manufatura aditiva é mais comum ao método de estereografia, na literatura encontramos fluidos pouco viscosos, com reologia inadequada para o método de extrusão. Portanto, esse é um ponto crucial que deve ser estudado.

2.3.4 Parâmetros influentes nas propriedades reológicas

Como a reologia é um fator crucial na manufatura aditiva, os possíveis parâmetros que podem influenciar nessa propriedade devem ser considerados. Além de fatores como composição dos materiais e formulação da suspensão, a taxa de cura da resina também deve ser considerada. Um exemplo disso, resinas de cura rápida, ao serem expostas ao ambiente iluminado, podem curar na seringa e entupi-la, mas também podem ter rápido ganho de resistência e facilmente suportar o peso das próximas camadas. Portanto, é de enorme importância buscar compreender com profundidade o comportamento do material durante o processo perante às variáveis.

2.4 CERÂMICA COM RESINA DE CURA UV PARA IMPRESSÃO 3D

A impressão 3-D de cerâmicas com o uso de resinas fotopolimerizáveis possui infinitas variáveis e comportamentos que devem ser estudados e considerados a fim de obter peças que atendam os objetivos do pesquisador com o melhor desempenho possível.

Algumas das vantagens da manufatura aditiva na produção de andaimes são a possibilidade de controlar a sua estrutura interna e reduzir os custos e tempo de produção. No método de DPL, o processo é limitado pela preparação da pasta cerâmica e pela remoção de pasta não polimerizada nos poros. Pasta cerâmica com alto teor de sólidos, baixa viscosidade e boa fluidez é a condição necessária para preparar andaimes cerâmicos de alta precisão e qualidade. Portanto, a chave para

resolver esse problema é equilibrar o teor de sólidos e a viscosidade. (Liu et al, 2021; Guo, 2023)

Liu et al (2021) desenvolveram uma pasta cerâmica β -TCP, uma mistura de resina fotossensível acrílica com ligação dupla, fotoiniciador TPO e pó β -TCP (tamanho de partícula: 600–1200 nm). Eles conseguiram obter pastas com baixa viscosidade com alto teor de sólidos de β -TCP, 60% em peso, garantindo baixa porcentagem de encolhimento. O andaime cerâmico cilíndrico com estrutura de poros quadrados obtido apresentou uma porosidade de 40% e uma resistência à compressão média de 9,89 MPa; enquanto a resistência à compressão do andaime de poros redondos impresso atingiu 4,11 MPa e a porosidade se manteve em cerca de 44%. Células-tronco mesenquimais da medula óssea de camundongo foram co-cultivadas com o extrato do andaime e a taxa de sobrevivência foi mantida acima de 90% em 3 dias, provando que o andaime tinha baixa citotoxicidade.

Sungkhaphan et al (2024) fabricaram scaffolds bifásicos compostos por resinas fotossensíveis à base de água e carregadas com hidroxiapatita (HAp, tamanho médio de 7,87 μ m) por meio de fotopolimerização em cuba. Foram testados dois teores de cerâmica (10 e 20% em peso), sendo que, ambas concentrações se mostraram imprimíveis. A porosidade dos andaimes carregados com biocerâmica obtidos por meio da análise gravimétrica, revelou cerca de 48%–62%. A tensão compressiva dos andaimes bifásicos resultantes caiu na faixa de 88–92 MPa, enquanto os módulos compressivos estavam na faixa de 2,2–3,5 MPa.

Por mais que o objetivo do trabalho seja obter peças porosas para a produção de scaffolds, as informações que as pesquisas em busca de peças densas nos trazem podem ser muito vantajosas no entendimento do processo. Na literatura, há muitos estudos sobre a fabricação de peças cerâmicas totalmente densas e sem defeitos devido à presença de poros e rachaduras, com propriedades comparáveis às dos materiais processados por tecnologias convencionais, é um dos desafios a serem superados. Isso requer o controle de várias etapas do processo: desde a preparação da suspensão até a otimização dos parâmetros de impressão e o ajuste de ciclos térmicos adequados de eliminação de ligantes e sinterização. (Coppola et al, 2022; Chaudhary et al, 2022; Wu et al, 2016)

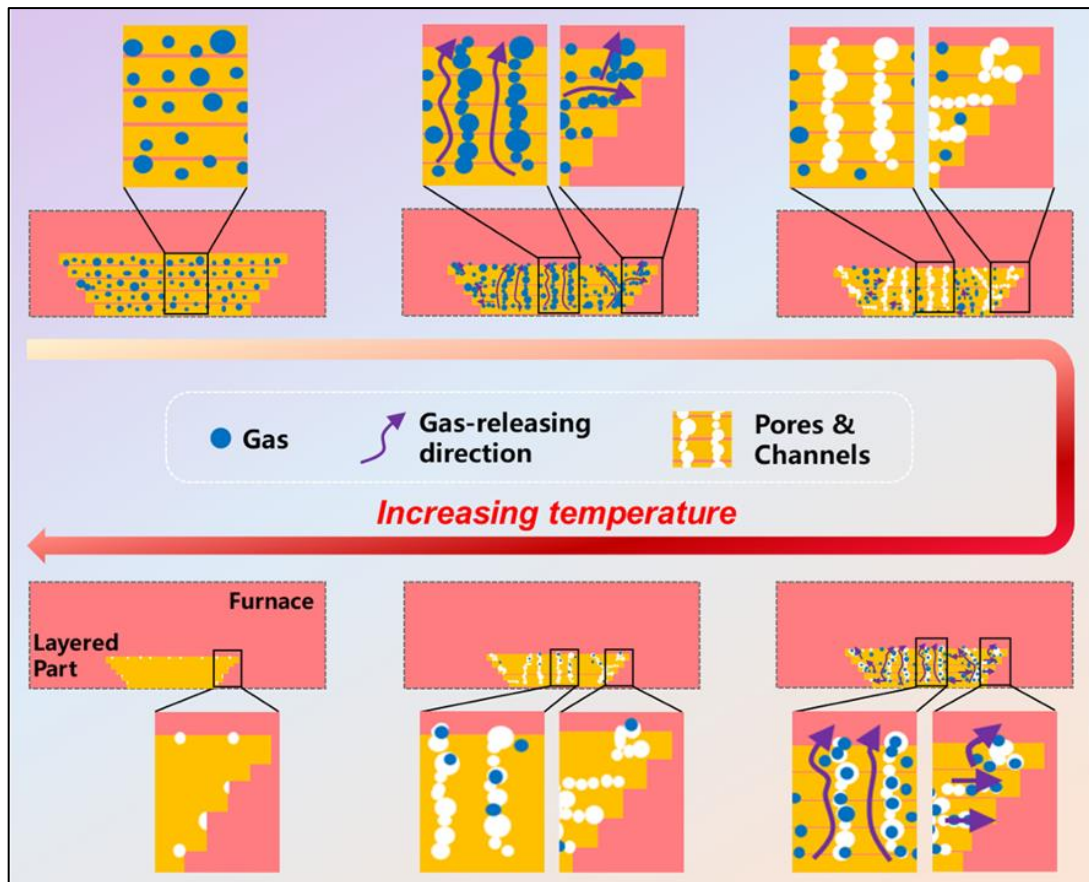
Para obter peças densas, Coppola et al (2022) estudou suspensões curáveis por UV de policristais tetragonais de zircônia estabilizados com 3% mol de ítria (Y-TZP), as quais foram impressas via Processamento de Luz Digital (DLP). As

amostras de zircônia foram sinterizadas a 1550°C por 1 hora, alcançando uma densidade relativa muito alta (99,2% TD), independentemente da carga sólida e da direção de impressão. A composição com maior carga sólida (ou seja, 43,6% em volume ou 81% em peso) apresentou a maior resistência à flexão em três pontos, tanto quando testada perpendicularmente ao plano de impressão (751 ± 83 MPa), quanto na paralelamente (675 ± 87 MPa).

Durante o processo de desaglomeração de materiais cerâmicos impressos por DLP, podem surgir trincas entre as camadas devido à expansão dos gases no precursor. Isso acontece quando o tamanho dos canais interconectados não corresponde à taxa de formação de gás. Para controlar esse processo, as temperaturas de pico da curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC) são escolhidas como a temperatura de desaglomeração, permitindo que as reações exotérmicas ocorram separadamente, desacelerando a formação de gás e prevenindo trincas. Zhao et al. (2022) utilizaram uma taxa de aquecimento extremamente baixa de 0,1 °C/min para promover a formação de canais e garantir uma liberação gradual dos gases, minimizando o dano à estrutura lamelar durante o processo. A evolução da microestrutura é crucial para determinar o ponto ideal de sinterização, equilibrando a densidade máxima com a integridade estrutural do material (Sua et al, 2022).

Xiong et al (2022) introduziu resina fenólica (RF) como aditivo e usou de uma estratégia controlada de pirólise para cerâmicas SiOC fabricadas por fotopolimerização em cuba a fim de obter peças densas e evitar trincas durante a pirólise. Foi constatado que a introdução da RF permitiu um processo de liberação de gás altamente suave, devido à geração de canais ordenados de liberação de gás nos corpos das amostras durante a pirólise. Como resultado, cerâmicas densas e livres de trincas foram obtidas com 15% em peso de RF, apesar do grande encolhimento linear de 50% após a pirólise. Comparadas a materiais similares relatados, as cerâmicas preparadas neste estudo exibiram desempenho estrutural e mecânico aprimorado.

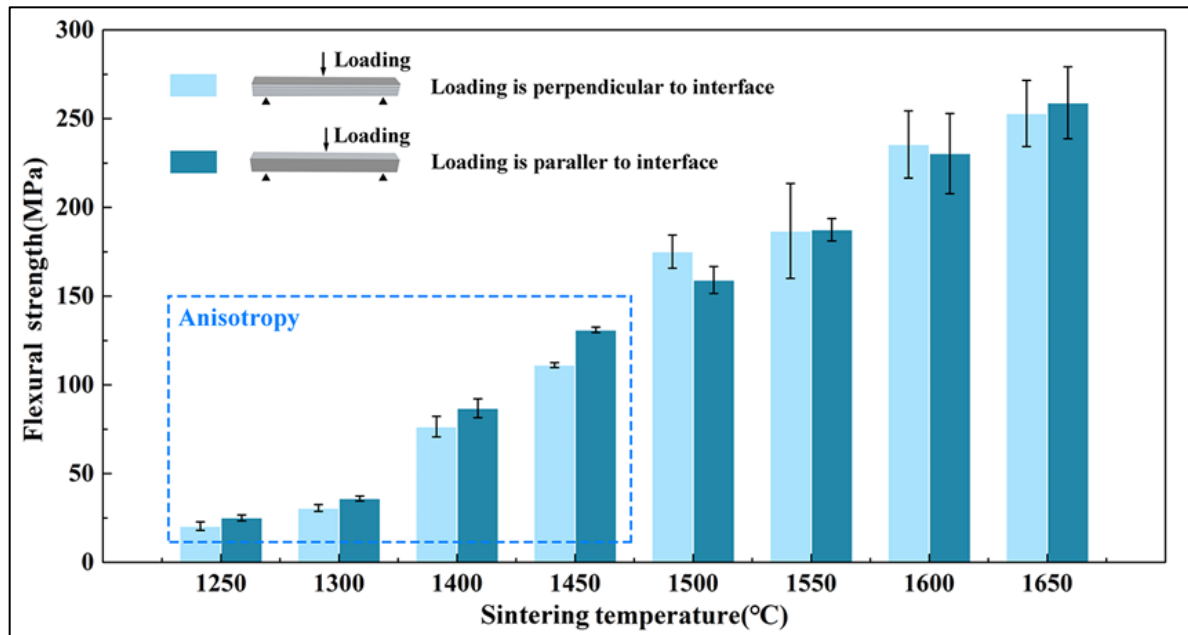
Figura 8 – Processo de liberação de gases com a adição de resina fenólica.



Fonte: Xiong et al (2022).

Zhao et al. (2022) descreveram em seu estudo a evolução da estrutura lamelar em corpos de prova de alumina impressos, analisando diferentes temperaturas de sinterização. A 1350 °C, os corpos de prova apresentaram uma estrutura lamelar devido aos grandes poros formados pela resina nas interfaces. A 1500 °C, predominam os poros fechados e a estrutura lamelar desaparece. A 1650 °C, a estrutura lamelar é totalmente eliminada e a distribuição dos poros se torna homogênea. Segundo o estudo, os poros entre as camadas são interconectados e as camadas são ligadas por partículas cerâmicas discretas. Durante a sinterização, essas partículas crescem, reduzindo o tamanho dos poros interconectados e formando poros fechados, o que contribui para a eliminação da estrutura lamelar. A anisotropia desaparece a temperaturas mais altas e as resistências máximas nas direções paralela ($253,0 \pm 18,6$ MPa) e perpendicular ($259,0 \pm 20,3$ MPa) foram alcançadas a 1650 °C. Esse comportamento sugere que a estrutura lamelar tem menor resistência comparada à estrutura homogênea, apesar do aumento do tamanho dos grãos que normalmente reduz a resistência.

Figura 9 – Resistência à flexão nas direções perpendicular e paralela com o aumento da temperatura de sinterização.



Fonte: Zhao et al (2022).

Sua et al (2022) estudaram o processo de sinterização de uma mistura de pó cerâmico de Li_2CO_3 e SiO_2 com o objetivo de aumentar a resistência da estrutura e a fração de empacotamento. Os resultados obtidos foram que, a densidade relativa aumentou gradualmente com a elevação da temperatura de sinterização, atingindo um máximo de 92,72% a 1050°C, enquanto a porosidade diminuiu. Com esse estudo, foi produzido um lote de estruturas cerâmicas densas e em grade de Li_4SiO_4 com alta pureza de fase (>95%) e sem defeitos aparentes foi preparado por meio da abordagem de moldagem generativa e formação de material (GSM), com base na impressão 3D por fotopolimerização e sinterização por reação. Além disso, foi identificado que o processo de sinterização por reação permite um aprimoramento das propriedades mecânicas. O aumento da fração de empacotamento levou a uma melhoria significativa tanto na resistência à compressão quanto no módulo de elasticidade efetivo das estruturas de Li_4SiO_4 , atingindo $(186,49 \pm 0,04)$ MPa e $(16,47 \pm 0,03)$ GPa, respectivamente.

A interação de uma fonte de luz UV, como um feixe de laser, com o sistema curável contendo partículas cerâmicas submicrométricas e micrométricas leva ao fenômeno de dispersão, que interrompe o processo de polimerização e é o principal fator de impacto na cura do material (Tarabeux, 2018; Yu et al, 2022; Chaudhary et al,

2022). Em contrapartida, as propriedades mecânicas e funcionais das cerâmicas fabricadas por esse método acabam não sendo as ideais devido ao conteúdo limitado de sólidos dos pós cerâmicos. Em processamento coloidal, um baixo conteúdo de sólidos geralmente resulta em uma baixa densidade das cerâmicas produzidas. Portanto, a sinterabilidade e a formabilidade das cerâmicas preparadas por cura UV estão inversamente correlacionadas. (Wu et al, 2016)

Além disso, a distribuição do tamanho das partículas influencia a contração do material. Embora partículas finas ofereçam melhor sinterabilidade, o uso de partículas maiores pode reduzir a contração. No entanto, partículas muito grandes (acima de 50 μm) causam sedimentação e problemas de recobrimento. (Chen et al, 2022)

No trabalho de Wua et al (2016), usar o processo de remoção por vácuo para eliminar o ligante e misturar alumina micrométrica e nanopartículas, se mostrou uma maneira eficaz de imprimir cerâmicas 3D com bom desempenho por meio da estereolitografia. Eles destacam que, selecionar um caminho de sinterização ótimo e controlar a distribuição do tamanho das partículas garante uma alta densidade do corpo verde.

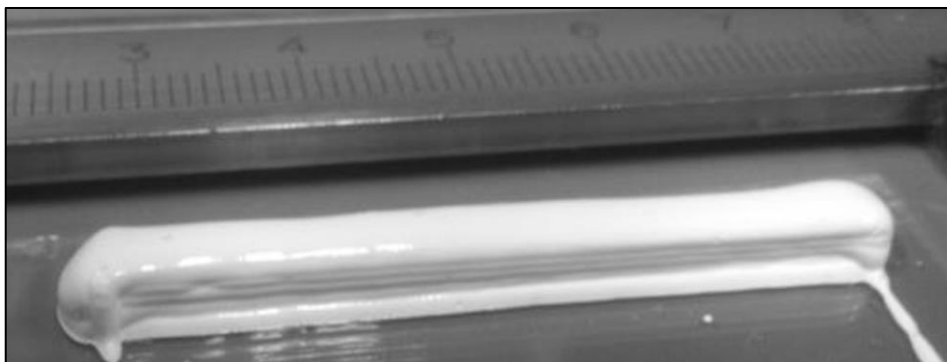
Chen et al (2022) buscou reduzir a contração de sinterização de materiais de moldagem de alumina ao ajustar a distribuição do tamanho das partículas e a temperatura de sinterização. Ao adicionarem uma fração de 0,1 de pó fino ($D_{50} = 1,14 \mu\text{m}$) ao pó grosso, conseguiram amostras com contração linear de 6,36% nas direções X/Y e 11,39% na direção Z após sinterização a 1550°C , além de resistência à flexão de $(78,15 \pm 3,50) \text{ MPa}$ e porosidade de $(30,12 \pm 0,08) \%$. Destacam em seu trabalho que a viscosidade das suspensões diminui à medida que a fração de pó fino aumenta, e a distribuição do tamanho das partículas afeta ligeiramente os comportamentos de cura.

Um dos problemas da estereografia é a necessidade de um tanque preenchido de material para a realização da impressão. Isso representa um desafio em termos de custo e eficiência material. (Faes et al, 2015)

Faes et al (2015) imprimiram peças cerâmicas com nanopartículas de Zircônia estabilizada com ítrio de tamanho médio de partícula de $0,6 \mu\text{m}$. O método escolhido foi a modelação por deposição usando para impressão um bico de $0,5 \text{ mm}$. A dispersão mais homogênea e imprimível foi a solução de 30%vol de zircônia na resina UV XC11122. Infelizmente, devido à alta contração, as peças impressas se

partiram em partes menores após a sinterização. Faes et al (2015) ressaltam que isso pode ser resolvido aumentando o volume de pó cerâmico, o que acarretaria na necessidade de induzir forças repulsivas para manter a reologia adequada.

Figura 10 – Amostra impressa utilizando a dispersão de zircônio a 30% vol.



Fonte: Faes et al (2015).

Chaudhary et al (2022) apresentou um trabalho onde usaram soluções de precursor cerâmico polimérico sem aditivos para impressas usando a modelagem por deposição. Para o projeto, foram usados dois feixes de laser de mesma intensidade montados em ambos os lados do bico de impressão. Os resultados obtidos foram retração de largura e altura de $(26,6 \pm 1,3) \%$ e $(28,9 \pm 2,4) \%$, com porosidade controlada de $(51,12 \pm 2,8) \text{ vol}\%$. Para melhorar ainda mais o intervalo de absorção e a reatividade da luz UV, foi usada uma mistura de fotoiniciadores. Após a pirólise, foram obtidas estruturas cerâmicas SiOC com apenas 25% de retração linear e 30% de perda de massa. Esse estudo mostra que é possível usar esse método de impressão para imprimir peças cerâmicas com resina de cura UV.

Hazan et al (2012) usaram suspensões de Al_2O_3 e hidroxiapatita (HA) com carga sólida entre 34 a 49%, as quais apresentaram comportamento tixotrópico, reologia ideal para impressão por deposição. A cura UV foi feita a cada duas camadas depositadas com uma lâmpada UV portátil de 100 W por 2 min (dose de $14,4 \text{ J cm}^{-2}$). As peças curadas foram desvinculadas ao ar por aquecimento a $1 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma imersão de 1 h a $600 \text{ }^\circ\text{C}$. A densificação parcial foi realizada entre 1200 e $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h e $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h, para HA e Al_2O_3 , respectivamente, seguido por 15 h de resfriamento à temperatura ambiente. Com isso, eles produziram filmes e redes por deposição robótica 3D por meio de tintas coloidais curáveis por UV livres de solventes e altamente carregadas.

3 MATERIAS E MÉTODOS

A metodologia planejada para o desenvolvimento do trabalho consistia no projeto e construção de uma impressora cerâmica por deposição de barbotina, com estrutura baseada em perfis extrudados em liga de alumínio, com dinâmica cartesiana e concepção do tipo cantilever, usando guias lineares em todos os eixos. O objetivo era que a máquina fosse compacta, de baixo custo e com alimentação por seringa, controlada por motor de passo NEMA 17 sincronizada a uma fonte de luz ultravioleta. O firmware da impressora seria adaptado do freeware Marlin 2 e a impressora controlada por comandos GCODE. Toda a documentação da impressora seria criada com base em programas open-source, para favorecer seu patenteamento livre junto à OSHWA - Open Source Hardware Association e garantir a continuidade e evolução do projeto com a participação da sociedade.

As peças seriam impressas usando barbotinas (suspensões) de pós de dióxido de titânio com estrutura de rutilo (selecionado pela disponibilidade atual no laboratório) em resina de cura por fotopolimerização UV (comprimento de onda de 405 nm) usada em impressoras 3D de baixo custo do tipo Masked Stereolithography Apparatus (MSLA), ou estereolitografia com máscara. O desenvolvimento das suspensões seria feito por análise reológica usando reômetro capilar, análises térmicas e ensaios de cura por fotopolimerização. Os ensaios seguiriam roteiro definido por projeto de experimentos, para a determinação das condições ótimas para obtenção das suspensões. Os parâmetros de impressão seriam ajustados com base nesses testes de caracterização. Também seriam testadas as condições para as etapas de pré-sinterização e sinterização dos materiais impressos.

Os corpos de prova seriam produzidos para ensaios mecânicos (flexão de 3 pontos e de compressão), além de amostras para análise da porosidade por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, densitometria e picnometria. Os produtos obtidos também seriam avaliados por difratometria de raios-X.

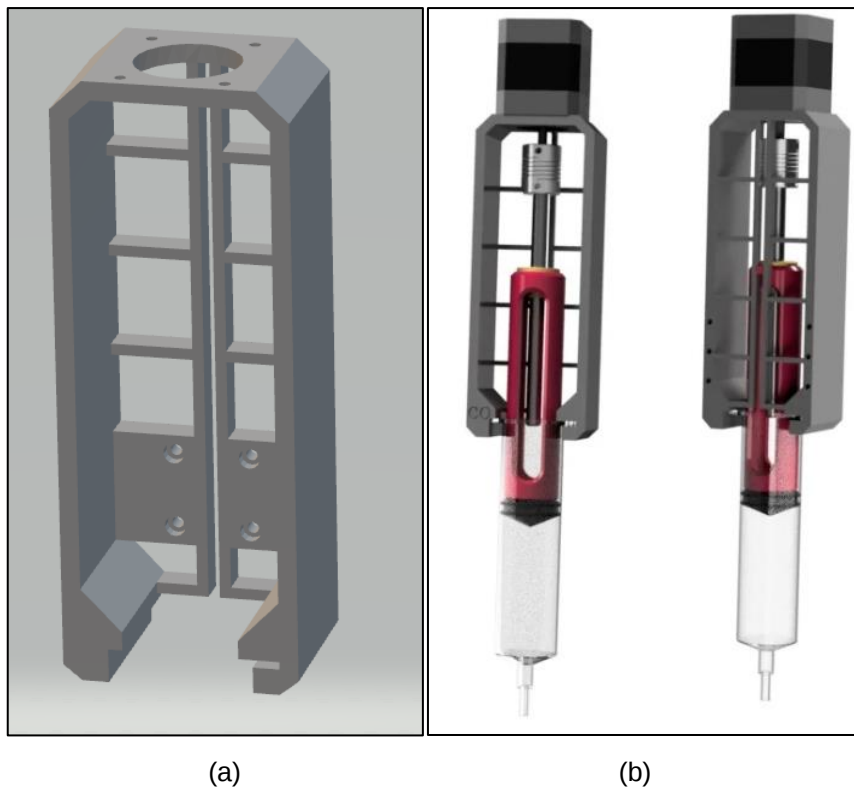
Os resultados obtidos seriam analisados qualitativa e quantitativamente, confrontando-se porosidade, condições de impressão e processamento cerâmico, aspectos fractográficos e propriedades mecânicas, em conformidade com os métodos estatísticos indicados no projeto de experimentos. Há a intenção de se tentar publicações em periódicos como Additive Manufacturing, Ceramics International ou Materials & Design.

4 ATIVIDADES REALIZADAS

4.1 DESENHO E CONFECÇÃO DE PEÇAS

O software Solid Edge foi usado para o desenho das peças que foram impressas e usadas na montagem da parte estrutural da impressora. A primeira peça a ser produzida (peça 1) foi o suporte para a seringa e o motor, os quais juntos iriam compor o cabeçote de impressão. Esse desenho é uma adaptação de uma das peças do projeto “Easiest Clay/Paste Extruder” encontrado no site Thingiverse.

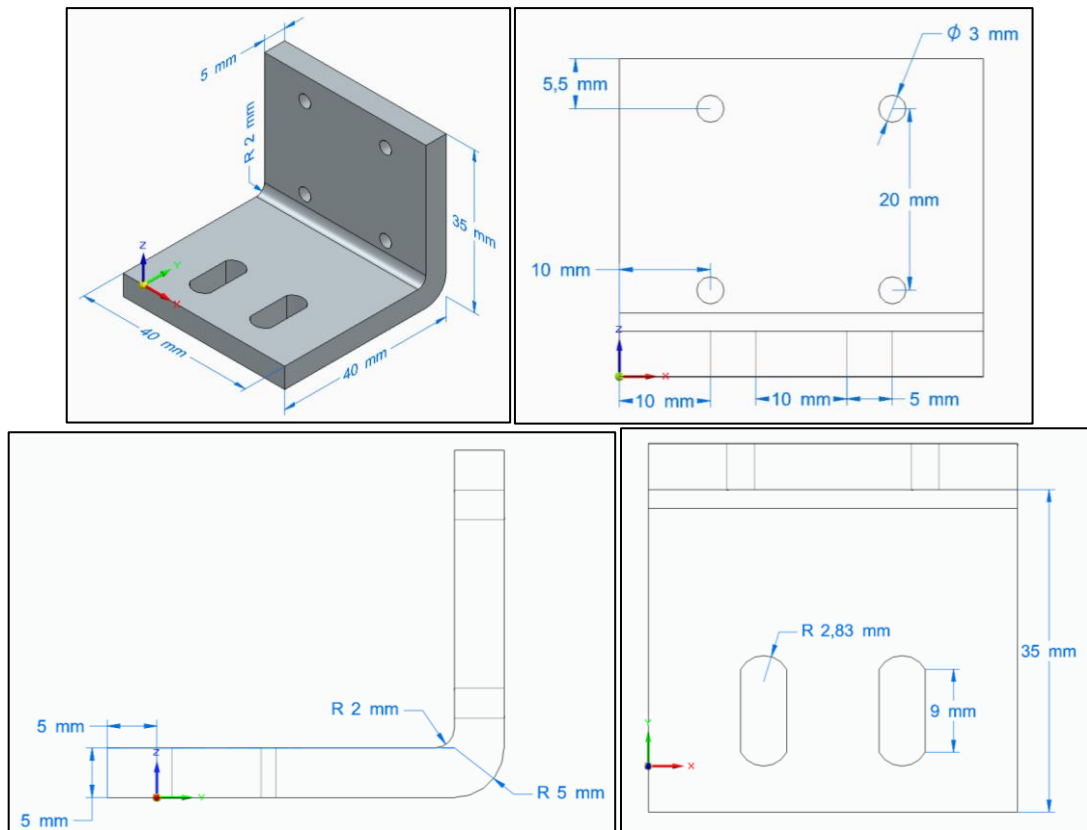
Figura 11 – (a) Peça 1 desenhada no Solid Edge e (b) modelo do site.



Fonte: (a) Autoria própria e (b) der_coco (2019).

A peça 2 foi feita devido a necessidade de prender as correias responsáveis pela movimentação do cabeçote. Então, a peça 1 será parafusada no perfil com a peça 2 entre os dois. Esses dois rasgos observados na figura 6 são para prender a correia.

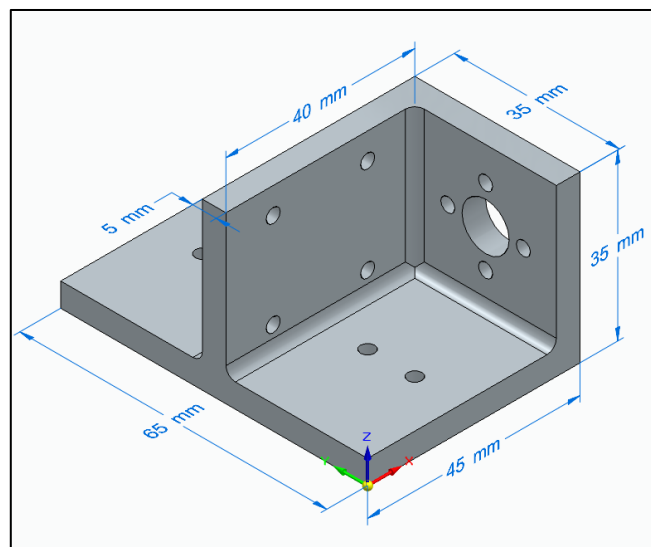
Figura 12 – Peça 2 em 3D e suas três vistas em 2D com medidas.



Fonte: Autoria própria.

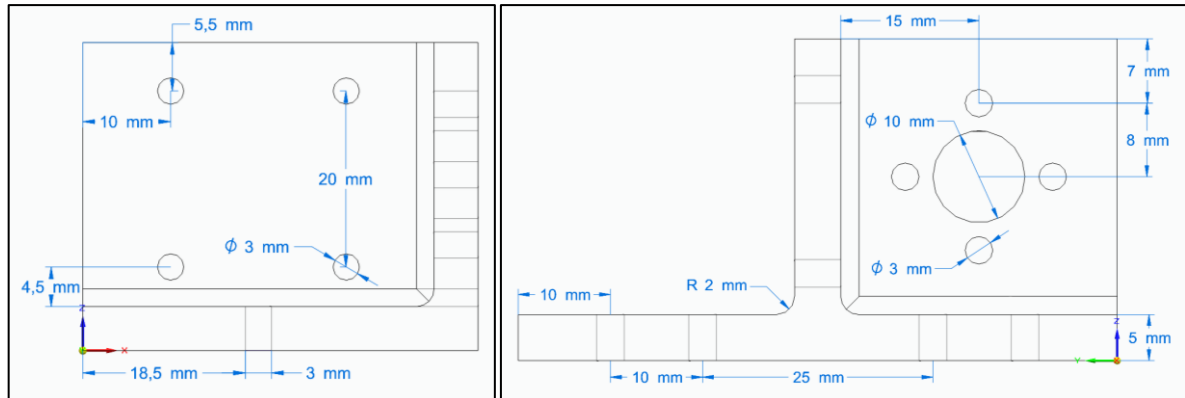
A peça 3 tem a finalidade de fixar o fuso nos perfis. Esse será responsável por elevar e abaixar o cabeçote durante a impressão.

Figura 13 – Peça 3 em 3D com medidas.



Fonte: Autoria própria.

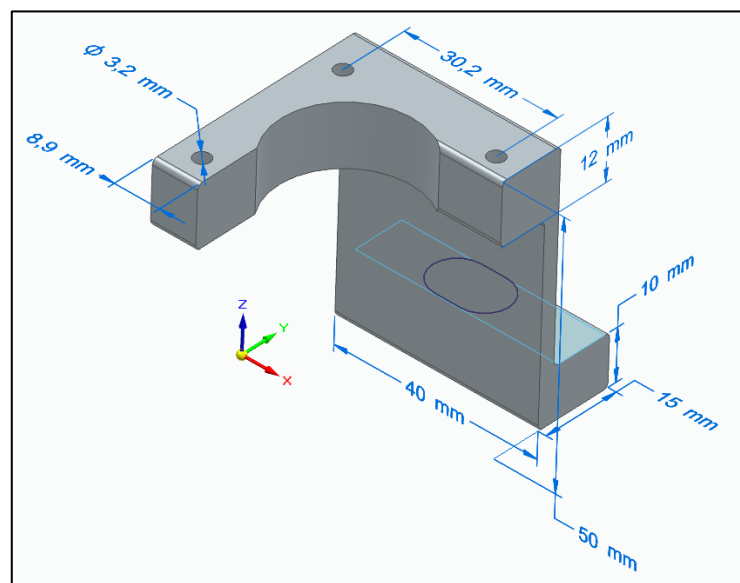
Figura 14 – Vistas da peça 3 em 2D com medidas.



Fonte: Autoria própria.

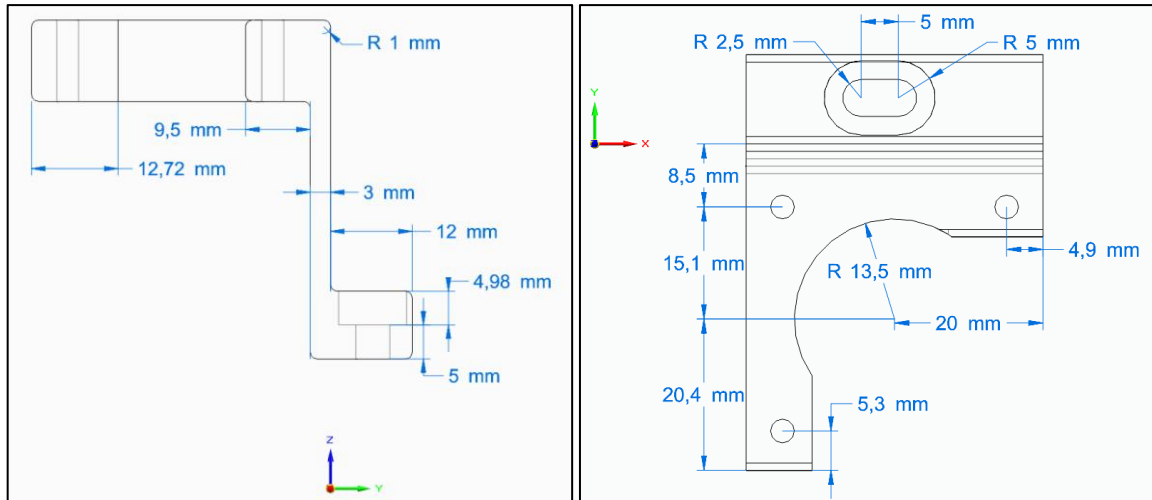
A peça 4 é um suporte para o motor do fuso. Esse desenho é uma adaptação de outro projeto encontrado no site Thingiverse (Icarus1uk, 2018).

Figura 15 – Peça 4 em 3D com medidas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Vistas da peça 4 em 2D com medidas.

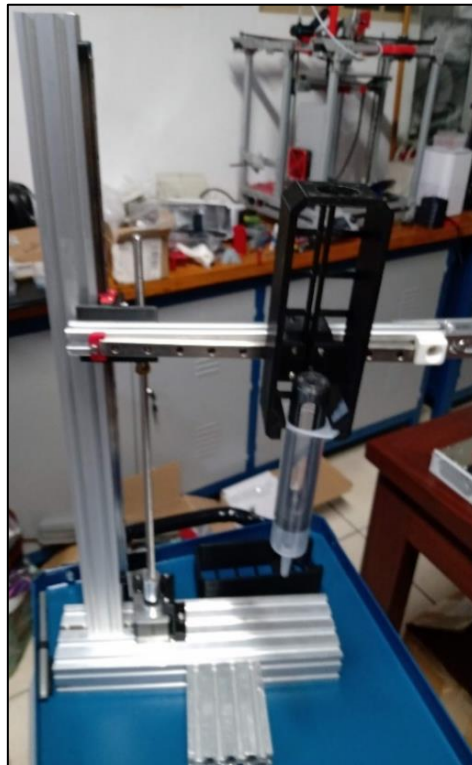


Fonte: Autoria própria.

4.2 ESTRUTURA DA IMPRESSORA

Na figura 12 temos fotos da impressora montada com as peças e os componentes citados no tópico anterior.

Figura 17 – Impressora com a parte estrutural montada.



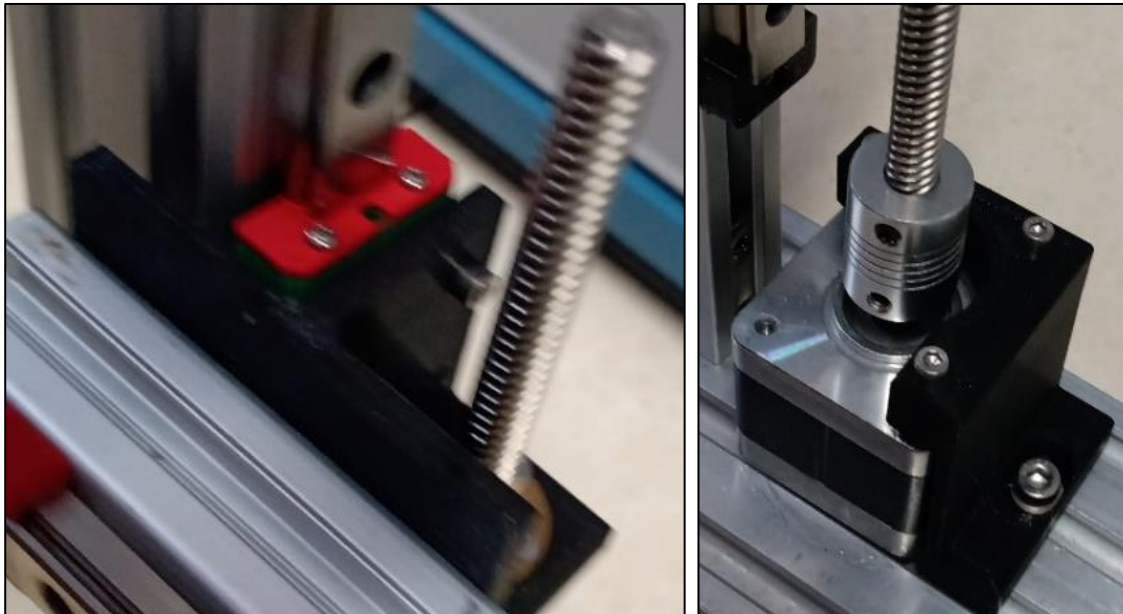
Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Peça 1 com a seringa e peça 2 montada conforme explicado no tópico anterior.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Peça 3 fixando o fuso e peça 4 fixando o motor do fuso na estrutura.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

A produção de cerâmicas com resinas fotopolimerizáveis pelo método da manufatura aditiva apresenta desafios técnicos relacionados à formulação do material, à otimização dos parâmetros de impressão e aos processos subsequentes de sinterização. Os estudos apresentados destacam avanços na obtenção de peças densas, com boas propriedades mecânicas e redução de defeitos, principalmente por meio do controle da distribuição de partículas e ajustes nas etapas de cura e sinterização. A tecnologia oferece um grande potencial para o desenvolvimento de peças complexas com alta precisão, mas ainda requer estudos mais aprofundados para otimizar os processos e reduzir limitações, como a alta contração durante a sinterização e o impacto na reologia das suspensões. Além disso, estudos sobre os parâmetros de impressão para esse método são extremamente escassos. Fatores que possuem impacto direto nas características da estrutura lamelar e resistência da peça impressa. Com aperfeiçoamentos contínuos, a impressão 3D com resinas de cura UV pode se tornar uma alternativa viável e eficiente para a fabricação de cerâmicas em diversas aplicações comerciais e científicas.

PROPOSTAS DE PROJETOS FUTUROS

Além da finalização desse projeto, ainda há muitos pontos que podem ser estudados. Chaudhary et al (2022) trouxe em sua revisão várias pesquisas envolvendo cerâmicas derivadas de polímeros (Polymer-derived ceramic (PDC)) reforçadas com fibras para estereografia, o que pode ser facilmente implementado nessa pesquisa. Além disso, um trabalho que acompanhei durante o meu curso de graduação foi a caracterização de pastas geopoliméricas obtidas por impressão 3D. O geopolímero é um material de comportamento muito interessante e muito rico, o qual pode ser obtido de diferentes fontes de aluminossilicatos e abre muitas oportunidades de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, L. B. **Manufatura aditiva de cerâmicas por projeção**: projeto de máquina, formulação de suspensões e processo. 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Projeto Mecânico) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- ARCHEZ, J. *et al.* Adaptation of the geopolymer composite formulation binder to the shaping process. **Materials Today Communications**, Netherlands, v. 25, p. 101501, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101501>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- CHAUDHARY, R. P. *et al.* Additive manufacturing of polymer-derived ceramics: materials, technologies, properties and potential applications. **Progress in Materials Science**, England, v. 128, n. 100969, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100969>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- CHEN, S. *et al.* Effects of particle size distribution and sintering temperature on properties of alumina mold material prepared by stereolithography. **Ceramics International**, England, v. 48, n. 5, p. 6069-6077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.145>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- COPPOLA, B. *et al.* Digital light processing stereolithography of zirconia ceramics: slurry elaboration and orientation-reliant mechanical properties. **Journal of the European Ceramic Society**, England, v. 42, p. 2974–2982, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.052>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- CRIJNEN, C. **Easiest Clay/Paste Extruder**. Thingiverse, 2019. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:3487917>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- DUAN, Z. *et al.* Effect of metakaolin on the fresh and hardened properties of 3D printed cementitious composite. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 350, p. 128808, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128808>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- FAES, M. *et al.* Extrusion-based 3D printing of ceramic componentes. **Procedia CIRP**, Netherlands, v. 28, p. 76 – 81, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.028>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- GONÇALVES, C. E. C. **Estudo da reologia de geopolímero para processo de extrusão aplicado em impressora 3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/251563>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- GONÇALVES, J. R. S.; NEVES, V. C. P. S.; PAROVSKY, Y. G. **Fluidos não newtonianos na indústria**: aplicação prática e desenvolvimento de interface de cálculo de perda de carga. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/20765/1/JRSGon%C3%A7alves.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2023.

GUO, W. *et al.* Review on vat photopolymerization additive manufacturing of bioactive ceramic bone scaffolds. **Journal of Materials Chemistry B**, England, v. 11, p. 9572-9596, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3TB01236K>. Acesso em: 06 jul. 2024.

HAZAN, Y. *et al.* Robotic deposition of 3D nanocomposite and ceramic fiber architectures via UV curable colloidal inks. **Journal of the European Ceramic Society**, Netherlands, v. 32, p. 1187-1198, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.12.007>. Acesso em: 06 jul. 2024.

DAVIES, H. CR-10 Adjustable Z-axis stepper + damper bracket. Thingiverse, 2018. Disponível em: www.thingiverse.com/thing:2766334. Acesso em: 06 jul. 2024.

LARA, L. M. **Efeito da combinação de fotoiniciadores na eficiência de polimerização de resinas odontológicas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Odontologia) - Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba, 2019.

LIU, S. *et al.* DLP 3D printing porous β -tricalcium phosphate scaffold by the use of acrylate/ceramic composite slurry. **Ceramics International**, England, v. 47, p. 21108-21116, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.114>. Acesso em: 06 jul. 2024.

MACHADO, A. M. L. *et al.* Estudo comparativo entre os parâmetros reológicos de tintas acrílicas arquitetônicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 223-240. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100589>. Acesso em: 06 jul. 2024.

PALHARES, T. N. **Desenvolvimento de resinas compósito para impressão 3D por fotopolimerização aplicada à engenharia tecidual**. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2023.

PAUL, S. C. *et al.* 3D printing of geopolymer mortar: Overview of the effect of mix design and printing parameters on the strength. **Materials Today: Proceeding**, Sitges, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.292>. Acesso em: 06 jul. 2024.

PIRES, A. C. B. **Desenvolvimento de suspensão fotossensível de vidro soda-cal-sílica para impressão 3D por processamento digital de luz (DLP)**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

SOUAYFAN, F. *et al.* Comprehensive study on the reactivity and mechanical properties of alkali-activated metakaolin at high H₂O/Na₂O ratios. **Applied Clay**

Science, Netherlands, v. 231, p. 106758, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106758>. Acesso em: 06 jul. 2024.

SOUZA, B. D. F. **Reologia de pastas cimentícias contendo microssílica e superplastificante utilizando ensaio de fluxo**. Trabalho de Conclusão (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/2015.2/reologia-de-pastas-cimenticias-contendo-microssilica-e-superplastificante-utilizando-ensaio-de-fluxo.pdf>. Acesso em: 06 agos. 2024.

SU, F. *et al.* Photopolymerization and reaction sintering enabled generative shaping and material-forming of complex ceramic structures with high performance. **Additive Manufacturing**, New York, v. 51, p. 102651, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102651>. Acesso em: 06 agos. 2024.

SUNGKHAPHAN, P.; *et al.* Fabrication of biphasic scaffold composed of bioceramic-loaded and water-based photosensitive resins through vat photopolymerization. **Journal of Applied Polymer Science**, United States, v. 141, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.55944>. Acesso em: 06 agos. 2024.

TARABEUX, J. *et al.* Development of a numerical simulation model for predicting the curing of ceramic systems in the stereolithography process. **Journal of the European Ceramic Society**, England, v. 38, p. 4089-4098, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.052>. Acesso em: 06 agos. 2024.

WU, H. *et al.* Effect of the particle size and the debinding process on the density of alumina ceramics fabricated by 3D printing based on stereolithography. **Ceramics International**, England, v. 42, n. 15, p. 17290-17294, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.024>. Acesso em: 06 agos. 2024.

WU, X. *et al.* Modeling and visualization of layered curing conversion profile in ceramic mask projection stereolithography process. **Ceramics International**, England, v. 46, n. 16, Part A, p. 25750-25757, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.053>. Acesso em: 06 agos. 2024.

XIONGA, S. *et al.* 3D printing of crack-free dense polymer-derived ceramic monoliths and lattice skeletons with improved thickness and mechanical performance. **Additive Manufacturing**, [S.l.], v. 57, p. 102964, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102964>. Acesso em: 06 agos. 2024.

YU; X. *et al.* Spatial curing growth mechanism and defect control of alumina green bodies manufactured by stereo-lithography. **Journal of European Ceramic Society**, Moons, v. 42, n. 6, p. 2931-2945, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.030>. Acesso em: 06 agos. 2024.

ZHANG, H. *et al.* Effect of processing parameters on the printing quality of 3D printed composite cement-based materials. **Materials Letters**, Hong Kong, v. 308, p. 131271, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131271>. Acesso em: 06 agos. 2024.

ZHAO, D. *et al.* Formation mechanism and controlling strategy of lamellar structure in 3D printed alumina ceramics by digital light processing. **Additive Manufacturing**, [S.l.] v. 52, p. 102650, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102650>. Acesso em: 06 agos. 2024.