

ESTUDO DE PASTAS CERÂMICAS PARA IMPRESSÃO 3DMaria Eduarda Cristine de Oliveira¹(IC), Guilherme Oliveira Siqueira(PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave: Extrusão. Manufatura aditiva. Plasticidade. Reologia.****Introdução**

Os materiais cerâmicos são de grande importância, principalmente devido a suas propriedades, como a alta resistência a temperatura, corrosão, dureza etc, tendo sua aplicação em várias áreas como na construção civil, medicina, indústria, área biomédica, entre outras (DIAO; ZENG; CHEN, 2024).

Dentre as diversas formas de processamento dos materiais cerâmicos, podemos citar formulação de pastas, estas são obtidas através de uma mistura homogênea de partículas cerâmicas, água e aditivos. Tais pastas possuem propriedades como a plasticidade e o controle reológico, que são de grande importância para a impressão 3D por extrusão, e que possibilitam a fabricação de peças de geometria complexas com durabilidade, estabilidade térmica e resistência mecânica (DIAO; ZENG; CHEN, 2024).

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo teórico sobre a composição de pastas cerâmicas a base de óxido de alumínio, laponita/alginate e massa cerâmica com fração vermelha, e analisar as formulações que são utilizadas na impressão 3D por meio de extrusão, ressaltando qual a função e as propriedades de cada componente utilizado ao longo da mesma, além das técnicas de preparação, com o objetivo de encontrar parâmetros que assegurem um melhor desempenho reológico, estabilidade estrutural e viabilidade de uso em setores industriais, de construção e tecnológicos.

Neste trabalho foi realizado o estudo sistemático de uma pasta cerâmica, discutida em DUARTE, 2022, à base de resíduos de materiais de construção civil, com a adaptação de alguns componentes, apresentando uma massa pastosa com boa estabilidade e viscosidade como resultado, sendo ideal para a manufatura aditiva sustentável.

Além do desenvolvimento experimental, também foi realizada uma revisão bibliográfica de outras duas pastas cerâmicas PRZYBYŁA et al., 2024 e DÁVILA; D'ÁVILA, 2019 visando avaliar de forma

comparativa sua composição, comportamento reológico, técnicas de preparo e possibilidades de aplicação. Essa análise buscou compreender como diferentes combinações de matérias-primas e métodos influenciam a extrudabilidade, a estabilidade e o desempenho final das pastas destinadas à impressão 3D por extrusão.

Desta maneira, este estudo busca reforçar o potencial das pastas cerâmicas visando sua aplicação em impressões 3D, focando em soluções sustentáveis e aplicáveis em setores diversos.

Metodologia

Os artigos estudados ao longo deste trabalho foram “Optimization of Ceramic Paste Composition for 3D Printing via Robocasting” (PRZYBYŁA et al., 2024), “Rheological evaluation of Laponite/alginate inks for 3D extrusion-based printing” (DÁVILA; D'ÁVILA, 2019) e “Massa cerâmica à base de resíduo da construção civil para impressão 3d por extrusão” DUARTE, 2022.

Em PRZYBYŁA et al., 2024 a pasta cerâmica utilizada foi desenvolvida para impressão 3D através da técnica de robocasting, esta consiste na impressão 3D por extrusão, onde são utilizadas pastas ou tintas feitas de partículas cerâmicas altamente concentradas (LAMNINI et al., 2022). Esta pasta foi desenvolvida a partir de testes utilizando um misturador planetário de alta velocidade, servindo para homogeneizar e dar consistência à composição, em seguida foram feitos testes de extrusão com uma seringa, a fim de identificar quais as formulações de pastas cerâmicas são mais adequadas para passar pelo processo de impressão 3D. Dentre os materiais utilizados estão: Al_2O_3 em pó, metilcelulose, dispersante, água deionizada, microesferas cerâmicas e cascas de nozes. Esta formulação possui uma viscosidade que permite a extrusão de maneira uniforme e manutenção do formato após a deposição, podendo ser aplicada em peças para altas temperaturas, filtros cerâmicos, suportes de catalisadores e estruturas porosas para uso biomédico.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Em DÁVILA; D'ÁVILA, 2019, foi elaborada uma tinta composta por alginato de sódio de média viscosidade, acrilamida (AAm), N,N-metilenobisacrilamida (MBAA), fotoiniciador Irgacure D-2959, Laponita XLG, e cloreto de cálcio anidro (CaCl_2), com o objetivo de avaliar as propriedades reológicas da mesma para a impressão 3D por meio da extrusão. A sua viscosidade diminui sob pressão, o que facilita a sua extrusão e recupera rapidamente a firmeza, assegurando a estabilidade e a precisão das peças impressas. Esta formulação é indicada para a fabricação de scaffolds para engenharia de tecido, suportes de catalisadores, sistemas de liberação controlada de medicamentos e peças que demandam precisão geométrica na manufatura aditiva.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma massa cerâmica, baseada na formulação utilizada no trabalho original DUARTE, 2022, produzida a partir de fração vermelha, termo utilizado para referenciar o pó de bloco cerâmico, cal hidratada dolomítica CH-III, silicato de sódio C-112 (em forma líquida) e argila. Para reproduzir a formulação proposta por DUARTE, 2022, foram realizados ajustes na composição: o silicato de sódio C-112 foi substituído por silicato de sódio em pó e o pó de bloco cerâmico foi substituído por alumina, sendo necessário adicionar água para ajustar a consistência da massa. Os componentes sólidos foram todos inseridos em um moinho de bolas para serem homogêneos e posteriormente foram adicionados em um becker sendo misturados com água, até apresentarem uma consistência pastosa atingindo a plasticidade e a fluidez necessária para a extrusão.

Durante os ensaios preliminares, a consistência da pasta foi avaliada qualitativamente, considerando sua plasticidade e capacidade de extrudabilidade. Foram estabelecidos três parâmetros de análise: (I) Pouco plástica, quando a pasta apresentava baixa coesão e não mantinha forma após a extrusão; (II) Fluidez alta, quando apresentava rigidez excessiva, dificultando o processo de extrusão; e (III) Consistência ideal, quando havia equilíbrio entre fluidez e plasticidade, possibilitando extrusão contínua e manutenção da forma depositada. A partir desses critérios, diferentes proporções de água foram testadas até se identificar a quantidade mais adequada para a formulação, garantindo melhor desempenho da pasta em processos de manufatura aditiva.

Antes da aplicação em equipamento de impressão 3D, a extrudabilidade da mistura foi verificada por meio de pré-testes realizados com seringa,

simulando um processo de deposição. Durante o preparo e o teste, características como viscosidade, plasticidade e estabilidade dimensional foram avaliadas de forma qualitativa, a partir da homogeneidade da mistura, da facilidade de moldagem manual, do fluxo ao ser extrudada e da capacidade de manter o formato após a deposição. Essa avaliação indicou que a formulação atingiu consistência adequada para aplicação em peças cerâmicas mais sustentáveis, blocos e elementos de alvenaria por manufatura aditiva, incentivando a reutilização de materiais.

Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados uma análise detalhada sobre as formulações das pastas desenvolvidas em cada trabalho, ressaltando suas propriedades, composição e aplicações de cada material. Além da descrição dos componentes, busca-se compreender como essas características impactam diretamente o desempenho das pastas durante a impressão 3D, em especial na extrudabilidade, na estabilidade estrutural e na viabilidade de aplicação industrial. A discussão é baseada em dados teóricos, com foco na caracterização das formulações descritas na literatura e na avaliação de seu potencial para aplicação em processos de impressão 3D.

A composição química utilizada em PRZYBYŁA et al., 2024, tem como base BM1, chamado de material básico, com cerca de 78,50% de Al_2O_3 , 21,16% de água destilada, 0,9% de dispersante (Darvan-7ns), 0,25% de ligante (metilcelulose), além da inclusão de pequenas partículas de microesferas cerâmicas e cascas de nozes.

A elevada concentração de óxido de alumínio apresenta diversas propriedades físico-químicas como resistência mecânica, alta dureza e estabilidade térmica, que são de extrema importância para aplicações industriais (FONSECA, S. T, 2007), sendo fatores cruciais para peças sujeitas a altas temperaturas ou ambientes agressivos. A metilcelulose e o dispersante irão garantir a homogeneidade da pasta, controlando a dispersão e a viscosidade das partículas, mantendo um fluxo estável e influenciando nas propriedades viscoelásticas da pasta (ROMANCZUK-RUSZUK et al., 2023). A água destilada atua como um meio dispersante, ajustando a fluidez e favorecendo o comportamento reológico pseudoplástico, promovendo um fluxo contínuo ao longo da extrusão. A utilização de microesferas cerâmicas e cascas de nozes contribuem

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

para a redução do peso, aumentam a estabilidade e melhoram propriedades térmicas e químicas PRZYBYŁA et al., 2024.

Desta maneira, esta formulação baseada em BM1, apresentou bom equilíbrio entre propriedades como a resistência, fluidez e estabilidade, podendo ser apropriada para a impressão 3D por meio do robocasting, permitindo fabricações de peças cerâmicas complexas que necessitam de alto desempenho.

A formulação de DÁVILA; D’ÁVILA, 2019 utiliza alginato de sódio de média viscosidade proveniente de algas marrons, acrilamida (AAM), o agente de reticulação N,N'-metilenobisacrilamida (MBAA), o fotoiniciador 2-hidroxi-4-(2-hidroxietoxi)-2-metilpropiofenona (Irgacure D-2959), laponita XLG e cloreto de cálcio anidro (CaCl_2), todos em meio aquoso. O alginato irá atuar como uma matriz polimérica fornecendo viscosidade e gelificação iônica ao reagir com Ca^{2+} , o que promove certa estabilidade a tinta após a extrusão. A laponita altera a reologia da tinta, conferindo um comportamento de pseudoplástico, o fluido fica menos viscoso e mais fluido sob pressão, facilitando seu fluxo, gerando uma recuperação estrutural rápida, o que é de extrema importância para manter a forma da peça após a extrusão. A acrilamida e o MBAA irão permitir a formação de redes poliméricas, o que confere um aumento de resistência mecânica à tinta DÁVILA; D’ÁVILA, 2019. O Irgacure D-2959 atua na ativação da polimerização por meio da luz UV, possibilitando uma cura controlada da estrutura (ROMANCZUK-RUSZUK et al., 2023). O CaCl_2 irá melhorar a coesão e estabilidade da tinta impressa.

Dessa forma, a formulação combina controle reológico, gelificação iônica e reticulação química, resultando em uma tinta com excelente extrudabilidade, rápida recuperação e resistência mecânica, ideal para a impressão 3D de peças complexas em usos biomédicos como os scaffolds em engenharia de tecidos, farmacêuticos e catalíticos.

A formulação da pasta desenvolvida em laboratório, adaptada a partir de DUARTE, 2022, foi preparada com cerca de 10g, foram utilizados em sua composição 6,5g de alumina, 2,9g de cal hidratada, 0,7g de argila, 0,05g de silicato de sódio em pó e água com adição gradual de aproximadamente 6,5mL, até atingir uma consistência pastosa. A técnica descrita na metodologia, foi essencial para a homogeneização da pasta, garantindo uma boa extrudabilidade. A alumina é fundamental para garantir boa resistência mecânica,

conferir estabilidade térmica no material e resistência ao desgaste (FONSECA, S. T., 2007). A cal hidratada contribui para que ocorra a ligação entre as partículas, permitindo maior estabilidade térmica após a extrusão. A argila irá proporcionar uma maior plasticidade e trabalhabilidade, sendo fundamental para o processamento e a modelagem, facilitando o processo de extrusão. O silicato de sódio em pó, irá atuar como um agente defloculante e endurecedor, melhorando a homogeneidade e coesão da massa.

Ao longo do processo de preparação da pasta, vários ensaios com diferentes quantidades de água foram realizados, até atingir a consistência ideal, com cerca de 6,5mL, para avaliar melhor sua extrudabilidade, demonstrando qual seria o ponto correto para conciliar fluidez e plasticidade, permitindo extrusão contínua e manutenção de forma.

Tabela 1: "Composição da pasta cerâmica (10 g) com diferentes proporções de água"

Componentes	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Alumina	6,5g	6,5g	6,5g
Cal Hidratada	2,9g	2,9g	2,9g
Argila	0,7g	0,7g	0,7g
Silicato de Sódio	0,05g	0,05g	0,05g
Água	3 mL	5 mL	6,5 mL
Resultados:	Pouco plástica	Fluidez alta	Consistência ideal

Após as tentativas realizadas, foi possível identificar qual seria a quantidade adequada de água para que a pasta obtivesse a consistência ideal para garantir uma boa extrusão. Foi observado que, conforme era ajustado o volume de água, a massa variava de um estado pouco plástico, com certa dificuldade para manter sua forma, até alcançar o equilíbrio entre a estabilidade e fluidez. Tal alteração, foi de extrema importância para compreender como pequenas variações de umidade influenciam na trabalhabilidade e no comportamento reológico da pasta. A Figura 1 demonstra o resultado final alcançado.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Figura 1 – Massa cerâmica obtida em laboratório

O resultado final da pasta desenvolvida, evidencia que a mesma apresenta boa consistência, plasticidade e estabilidade necessárias para seu uso em processos de extrusão em manufaturas aditivas.

Conclusões

Os três estudos avaliados, colocaram em evidência o grande avanço nas composições desenvolvidas para o mercado de impressão 3D através da extrusão, demonstrando como diferentes aditivos e matrizes podem ser combinados para atender a finalidades variadas, desde aplicações estruturais em escala industrial até usos em engenharia de tecidos e sistemas de liberação controlada de fármacos. As formulações à base de óxido de alumínio, laponita/alginate e massa cerâmica com fração vermelha, reforçam que a definição criteriosa dos componentes e de suas proporções permite adequar a reologia e o comportamento mecânico de pastas às exigências do processo, garantindo um desempenho adequado durante o processo de deposição. Além disso, os resultados obtidos através do desenvolvimento experimental, demonstrou que simples ajustes, como a quantidade correta de água ou até mesmo o tipo de ligante utilizado, podem melhorar a extrudabilidade e a estabilidade dimensional sem comprometer a integridade final da peça. Em conjunto, essas evidências confirmam a versatilidade e o potencial

tecnológico das pastas cerâmicas na manufatura aditiva, consolidando-as como uma alternativa promissora para processos sustentáveis e de alto valor agregado em diferentes setores industriais e biomédicos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Itajubá pela infraestrutura disponibilizada, e ao órgão financiador CNPq pelo suporte financeiro. Estendo meus agradecimentos ao Professor João Paulo Roquim Romanelli cuja contribuição foi fundamental para a conclusão deste projeto.

Referências

Insira aqui as referências de acordo com a norma ABNT NBR 6023:2018. Fonte Times New Roman 10, cor preta, justificado, espaço simples.

DIAO, Q.; ZENG, Y.; CHEN, J. The applications and latest progress of ceramic 3D printing. *Additive Manufacturing Frontiers*, v. 3, n. 1, p. 200113, 2024.

DUARTE, A. D. Engenharia civil: Demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais 2. [s.l.] Atena Editora, 2022.

PRZYBYŁA, S. et al. Optimization of Ceramic Paste Composition for 3D Printing via Robocasting. *Materials*, v. 17, n. 18, p. 4560, 17 set. 2024.

DÁVILA, J. L.; D'ÁVILA, M. A. Rheological evaluation of Laponite/alginate inks for 3D extrusion-based printing. *The international journal of advanced manufacturing technology*, v. 101, n. 1–4, p. 675–686, 2018.

LAMNINI, S. et al. Robocasting of advanced ceramics: ink optimization and protocol to predict the printing parameters - A review. *Heliyon*, v. 8, n. 9, p. e10651, 2022.

FONSECA, S. T. Processamento e caracterização de pós e de cerâmicas de alumina total e parcialmente nanoestruturadas / Solange Tamara da Fonseca. - São José dos Campos: INPE, 2007. 89 p. ; (INPE-15153-TDI/1285)

ROMANCZUK-RUSZUK, E. et al. 3D printing ceramics—materials for direct extrusion process. *Ceramics*, v. 6, n. 1, p. 364–385, 2023.