



CÂMARA DE REMOÇÃO DE ORGÂNICOS PARA PEÇAS CERÂMICAS IMPRESSAS 3D POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA: PROJETO E EXPERIMENTAÇÃO

E.J.G. Lucala, ¹ Escola de Engenharia de São Carlos, ² Faculdade de Ciências das Pescas da Universidade do Namibe, elisario426@usp.br
N. V. Silva, ¹ Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, newtinhovisilva@usp.br
M. F. de Oliveira, ¹ Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, mateusfmk023@usp.br
C. A. Fortulan, ¹ Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, fortulan@usp.br

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (impressão 3D), especificamente a técnica de fotopolimerização em cuba (VPP), é uma tecnologia revolucionária para a fabricação de componentes cerâmicos com geometrias complexas e alta precisão. O principal desafio deste processo é a etapa de pós-processamento chamada debinding, que consiste na remoção da grande quantidade de ligante polimérico (40-60% em volume) da peça "verde". Uma remoção inadequada deste polímero causa defeitos estruturais graves, como poros e fraturas, que comprometem a qualidade e a resistência da peça final sinterizada (Camargo; Fortulan; Colorado, 2022; Nurmi et al., 2024; Wang et al., 2025).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o projeto, a construção e a validação de uma câmara de processo, devidamente instrumentada, destinada à extração térmica controlada de ligantes orgânicos de peças cerâmicas “a verde” obtidas por manufatura aditiva via fotopolimerização em cuba. O desenvolvimento proposto busca assegurar a integridade dimensional e estrutural das peças ao longo de todo o processo, prevenindo a formação de defeitos. Ressalta-se que o equipamento constitui um instrumento científico de análise termogravimétrica, capaz de monitorar, em tempo real, a perda de massa das amostras, de forma simultânea ao controle rigoroso da temperatura e da atmosfera do processo. O sistema será projetado para operar com ciclos térmicos de até 950 °C, conferindo ampla versatilidade para estudos e aplicações em diferentes condições experimentais

1.2 Relevância

Este trabalho desenvolve uma câmara para a remoção controlada de ligantes de peças cerâmicas feitas por fotopolimerização. Ao controlar com precisão a temperatura e a atmosfera, o equipamento busca eliminar defeitos e garantir a integridade das peças, solucionando um gargalo tecnológico crítico no processo de fabricação antes da sinterização.

2. MATERIAIS E METODOS

O projeto foi desenvolvido utilizando a metodologia PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos), que estrutura o trabalho em oito fases sequenciais. De acordo com (Back, 2008) essa metodologia é baseada na engenharia simultânea pois o método integra equipes multidisciplinares desde o início para considerar todos os requisitos do ciclo de vida do produto, com o objetivo de reduzir retrabalho, prevenir falhas e encurtar o tempo total de desenvolvimento.



Figura 1 - Estrutura do PRODIP para o processo de desenvolvimento produto, adaptada de (Back, 2008)

O projeto foi estruturado utilizando as cinco primeiras fases da metodologia PRODIP para garantir um processo de engenharia rigoroso e com validade acadêmica. Na Fase 1, aplicou-se a Estrutura Analítica do Projeto (EAP) para decompor a câmara de debinding em subsistemas e atividades gerenciáveis, otimizando a alocação de recursos, facilitando o acompanhamento do progresso e assegurando uma abordagem sistemática para o sucesso do projeto.

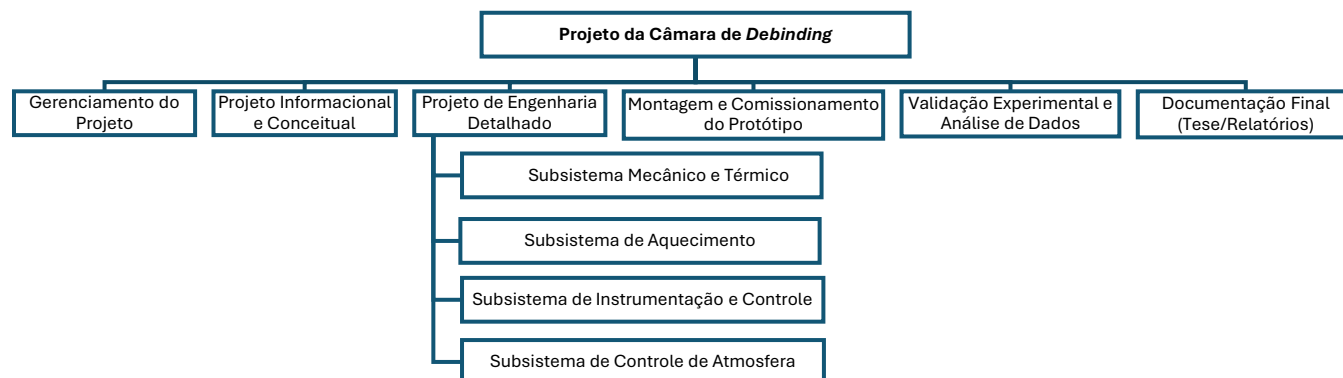


Figura 2 - Estrutura Analítica do Projeto (EAP) da Câmara de Remoção de Orgânicos, Autor (2025)



Na Fase 2 (Projeto Informacional), foram definidos os usuários-alvo (pesquisadores) e suas necessidades, como a obtenção de dados cinéticos precisos e o controle rigoroso do processo. Utilizando ferramentas como o QFD, essas necessidades foram traduzidas em especificações técnicas, como a temperatura máxima de 950 °C, uma escolha estratégica que permite o uso de materiais mais acessíveis (resistências Kanthal A-1) e simplifica o sistema de medição de massa, focando o equipamento em debinding e pré-sinterização.

Na Fase 3 (Projeto Conceitual), o problema foi decomposto em oito subfunções essenciais (como conter a amostra, fornecer calor, medir massa etc.) usando a Síntese Funcional. Essa análise, combinada com a exploração de alternativas, fundamentou a escolha de uma arquitetura modular como a solução mais adequada para o projeto. A concepção do equipamento foi definida balanceando desempenho e custo, resultando na escolha de tecnologias como aquecimento resistivo com Kanthal A-1, isolamento por fibra cerâmica e medição de massa com célula de carga. Essa abordagem resultou em uma arquitetura modular que garante robustez, facilita o desenvolvimento e permite futuras atualizações.

O projeto detalhado da câmara definiu seus subsistemas: a estrutura utiliza um tubo de alumina com isolamento de fibra cerâmica e vedação para vácuo; o aquecimento é feito por uma resistência Kanthal A-1, gerenciada por um DAQ USB-6009, com medição de temperatura através de um termopar tipo K, controlador proporcional e relé de estado sólido (SSR). A medição de massa é realizada por uma célula de carga, cuja medida é processada e trabalhada em LabVIEW.

3. RESULTADOS

Este trabalho detalhou o desenvolvimento de um instrumento científico para estudar a remoção de ligantes em cerâmicas, aplicando rigorosamente a metodologia PRODIP. O projeto foi sistematicamente guiado desde a tradução das necessidades de pesquisa em especificações técnicas (fase Informacional), passando pela seleção de uma arquitetura modular otimizada (fase Conceitual), até a consolidação de um projeto de engenharia completo (fases Preliminar e Detalhada). O uso do PRODIP garantiu um design final coeso e inovador, com todas as decisões técnicas rastreáveis e justificadas.

4. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A análise crítica do desenvolvimento da câmara de remoção de orgânicos aponta que o principal desafio e risco do projeto é a precisão do subsistema de medição de massa *in situ*. A célula de carga utilizada pode sofrer com deriva térmica e ruído, afetando a medição de massas pequenas. Os próximos passos, seguindo a metodologia PRODIP, envolvem a validação rigorosa do sistema para quantificar esses erros e desenvolver algoritmos de compensação em LabVIEW. Caso a precisão não seja alcançada, sensores alternativos como LVDT ou piezoelétricos serão considerados, apesar do custo mais elevado.

5. REFERÊNCIAS

- BACK, Nelson. Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Manole, 2008.
- CAMARGO, I. L. De; FORTULAN, C. A.; COLORADO, H. A. A review on the ceramic additive manufacturing technologies and availability of equipment and materials. *Cerâmica*, v. 68, n. 387, p. 329–347, set. 2022.
- NURMI, Nonna *et al.* Enabling fast debinding of ceramic vat photopolymerization prints with supercritical carbon dioxide as a solvent. *Additive Manufacturing*, v. 84, p. 104143, mar. 2024.
- WANG, Zi-Heng *et al.* Vat Photopolymerization-Based Additive Manufacturing of Si₃N₄ Ceramic Structures: Printing Optimization, Debinding/Sintering, and Applications. *Materials*, v. 18, n. 7, p. 1556, 29 mar. 2025.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Projeto de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia (PDCT–Angola), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e institucional que viabilizou este trabalho.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores é são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.