

Fabricação digital de protótipos de corte para confecção de escamas cerâmicas

Digital fabrication of cutting prototypes for ceramic scales production

Marcelo Cássio Lima Santos
Ivana Marcia Oliveira Maia
William Glaydson Lemos da Conceição
Bruno Serviliano Santos Farias

Resumo: As tecnologias de fabricação digital, por meio de método aditivo, tornam-se tema central deste artigo ao possibilitar a criação de módulos de corte destinados à produção de placas cerâmicas do tipo “escama”. O problema central reside na falta de inovação dos métodos tradicionais de produção cerâmica. Objetivou-se desenvolver protótipos de corte viáveis para produção industrial, explorando novas possibilidades de design e eficiência produtiva. A pesquisa, estruturada pelo método Design Science Research, seguiu etapas de compreensão do problema, desenvolvimento e avaliação de protótipos. Foram produzidos três artefatos de corte: os protótipos 1 e 2 apresentaram deformações e limitações estruturais, enquanto o protótipo 3 demonstrou maior eficiência, com alta resistência, preservação das placas e capacidade produtiva de 96 peças. Os resultados indicam que a fabricação digital é uma alternativa viável e sustentável, embora sejam necessários estudos futuros para avaliar a vida útil do Filamento de Ácido Polilático (PLA) e a ergonomia dos módulos.

Palavras-chaves: fabricação digital; impressão 3D; placas cerâmicas.

Abstract: Digital manufacturing technologies, using additive methods, are the central theme of this article, as they enable the creation of cutting modules for the production of “scale” type ceramic tiles. The central problem is based on the deficit of innovation in traditional ceramic production methods. The objective was to develop viable cutting prototypes for industrial production, exploring new possibilities for design and production efficiency. The research, structured by the Design Science Research method, followed stages of understanding the problem, developing and evaluating prototypes. Three cutting artifacts were produced: prototypes 1 and 2 presented deformations and structural limitations, while prototype 3 demonstrated a more efficient design, with high resistance, preservation of the plates, and a production capacity of 96 pieces. The results indicate that digital manufacturing is a viable and sustainable alternative, although further studies are needed to evaluate the useful life of Poly lactic Acid Filament (PLA) and the ergonomics of the modules.

Keywords: digital fabrication; 3D printing; ceramic tiles.

Introdução

A fabricação digital, como um dos temas centrais desta pesquisa, consiste na utilização de técnicas de produção de produtos, objetos e protótipos a partir de modelos virtuais. Entre as vantagens desse processo destacam-se a rapidez e precisão na geração das propriedades físicas e geométricas de modelos virtuais, além de possibilitar a produção em massa de produtos personalizados (Volpato, 2006). De maneira geral, a obtenção de produtos ou protótipos baseados em processos de fabricação digital utilizam sistemas de manufatura aditiva (impressão 3D) ou manufatura subtrativa (usinagem CNC¹ por corte a *laser*). Os sistemas de manufatura aditiva baseiam-se na adição de camadas de um ou mais materiais para obtenção do produto ou objeto final. Enquanto na manufatura subtrativa o produto final é obtido por meio da remoção progressiva de material. Em ambos os processos, a primeira etapa prevista é a criação de um modelo virtual desenvolvido por meio de *softwares* CAD (*Computer Aided Design*), que permitem a geração e manipulação de formas. Nesses *softwares* é possível atribuir às peças diferentes tipos de materiais, superfícies, texturas, volumes e formas, para estudar aspectos como encaixes das peças, montagem e desmontagem do produto (Bruscatto, Alvarado, 2010).

Existem diversos sistemas de manufatura aditiva no mercado que, apesar de usarem diferentes tecnologias de adição de material, estão baseadas no mesmo princípio de manufatura por camadas planas. Esse tipo de tecnologia utiliza filamentos termoplásticos aquecidos que ao serem extrudados permitem que um objeto tridimensional se forme ao longo dos planos XYZ. Da mesma maneira que um confeitador enfeita um bolo usando um saco de confeitar, o bico extrusor da impressora 3D deposita filetes de material bem finos sobre a plataforma de construção, formando as camadas do componente. A plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material termoplástico, de forma que ele solidifica rapidamente (Volpato, 2006).

Conforme Volpato (2006), a prototipagem rápida pode ser considerada como um marco em termos de tecnologias de manufatura devido às potencialidades, que lhe conferem grande economia de tempo de fabricação e mesmo em geometrias complexas, quando comparadas a outros processos. Vale ressaltar que a impressão 3D em relação aos métodos industriais tradicionais, apresenta baixo custo de produção para reproduções em baixa escala, além da possibilidade de utilizar materiais oriundos de fontes renováveis, como por exemplo, o Filamento de Ácido Polilático (PLA). Segundo Brito *et al.* (2011), o PLA é um poliéster termoplástico, semicristalino ou amorfo, biocompatível e biodegradável, sintetizado a partir do ácido lático. Conforme os autores, o PLA apresenta elevado módulo de elasticidade, boa rigidez, transparência, comportamento termoplástico, biocompatibilidade e boa capacidade de moldagem.

A técnica das placas cerâmicas do tipo “escama” tem se destacado no campo do design e da arquitetura por sua funcionalidade estética e estrutural. Inspiradas na morfologia sobreposta das escamas de peixe. Essas placas são frequentemente utilizadas em revestimentos modulares, tanto em fachadas quanto em coberturas, possibilitando soluções com escoamento eficiente de água, ventilação e sombreamento passivo. Sua configuração permite a criação de padrões formais orgânicos e repetitivos, o que as torna especialmente atrativas em projetos de design

¹ Usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) é um processo de fabricação que utiliza máquinas controladas por computadores para cortar, moldar e criar peças com alta precisão (Santos, 2016).

bioinspirado (Coupková *et al.*, 2021). Além disso, por serem encaixáveis e modulares, oferecem vantagens relacionadas à montagem, manutenção, variação compositiva e cromática.

Apesar de suas qualidades visuais e funcionais, a produção dessas placas ainda depende, em muitos casos, de métodos manuais ou pouco precisos, que dificultam a repetibilidade formal e aumentam o risco de perdas por deformações durante o corte ou a secagem da argila. Tal contexto aponta para uma lacuna de inovação técnica, especialmente no desenvolvimento de ferramentas que auxiliem o corte padronizado da argila fresca.

A escolha do objeto de estudo neste artigo justifica-se por seu potencial para receber aprimoramentos técnicos com o uso de tecnologias de fabricação digital, particularmente na etapa de conformação das peças a partir de módulos de corte. O presente estudo propõe-se, assim, a desenvolver soluções mais precisas e replicáveis, alinhadas às demandas contemporâneas de personalização e eficiência produtiva. Portanto, a necessidade de desenvolver uma solução eficiente para a produção de módulos de corte para placas cerâmicas do tipo “escama” utilizando Tecnologias de Fabricação Digital Aditiva (TFDA) é o ponto de partida deste artigo. Buscou-se explorar as tecnologias de fabricação digital, como a impressão 3D, que oferecem várias vantagens, incluindo liberdade geométrica, eficiência no uso de materiais e possibilidade de personalização em escala industrial. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo a produção de protótipos de corte para argila utilizando as técnicas de impressão 3D para analisar os resultados obtidos e tecer uma discussão comparativa entre os mesmos.

Para compreensão do contexto da pesquisa, será apresentada uma abordagem teórica dos temas centrais e do objeto de pesquisa, como as TFDA, especialmente a impressão 3D, e sua aplicação na produção de módulos de corte para placas cerâmicas.

Tecnologias de fabricação digital aditiva

A concepção da fabricação digital, segundo Sheeren (2021), não tem uma origem ou definição única, mas se desdobra a partir dos avanços da capacidade de criação e controle dos processos por meio de dispositivos digitais. Segundo o autor, essas tecnologias reconhecidas desde os anos de 1990, usam ferramentas computacionais e técnicas de modelagem, como meios para formulação de projetos. São métodos que utilizam dados digitais para direcionar um processo de fabricação. Segundo Torreblanca-Díaz e Mazo (2021), nessa década, foram se integrando paulatinamente ao desenho de produtos. Entre esses *softwares* estão o *Computer Aided Design* (CAD) para desenho assistido por computador; o *Computer Aided Engineer* (CAE) para engenharia assistida por computador e o *Computer Aided Manufacturing* (CAM) voltado para simulação e análise do comportamento mecânico. Os *softwares* de manufatura assistida por computador possibilitaram fabricar partes e peças diretamente de um arquivo digital (denominado modelo CAD 3D) utilizando máquinas de controle numérico computacional (CNC).

Em 1983 foi criada a técnica de estereolitografia pelo norte-americano Charles Hull, feito altamente relevante, pois representa um marco histórico em que a primeira TFDA fundamentou as bases deste novo método de fabricação, permitindo gerar objetos físicos diretamente de um arquivo digital. Dessa forma, foi possível, dentre outras vantagens, construir geometrias complexas, fabricar peças poliméricas sem a necessidade de moldes (Torreblanca-Díaz; Mazo, 2021). Nas últimas décadas emergiram novas TFDA como, por exemplo, o PolyJet, jato aglutinante, sinterização seletiva

por , deposição por filamento fundido, entre outras. Estas tecnologias têm sido popularmente conhecidas com impressão 3D. Este artigo delimita sua base teórica na TFDA via deposição de filamento fundido, denominada *Fused Deposition Modeling* (FDM), apresentando suas características e particularidades no decorrer da descrição do processo.

No processo de fabricação digital utilizando tecnologia FDM, um arquivo digital é enviado de um *software* CAD para o *software* da máquina de impressão 3D. Em seguida, um filamento de polímero termoplástico, que está em um suporte, passa por uma boquilha metálica, que se encontra em uma temperatura superior à temperatura de fusão do polímero. O polímero derrete e forma camadas sucessivas de material, que vão se aderindo umas com as outras até formar tridimensionalmente o objeto físico desejado (Torreblanca-Díaz; Mazo, 2021).

A Figura 1 mostra o processo de TFDA a partir da deposição de filamento fundido FDM. Guias rotativas conduzem o filamento que passa por um bico extrusor aquecido. Com a alta temperatura de fusão o FDM amolece, e então o objeto vai sendo formado a partir da tradução dos dados do modelo em dados numéricos que norteiam a movimentação tanto da plataforma quanto do bico extrusor.

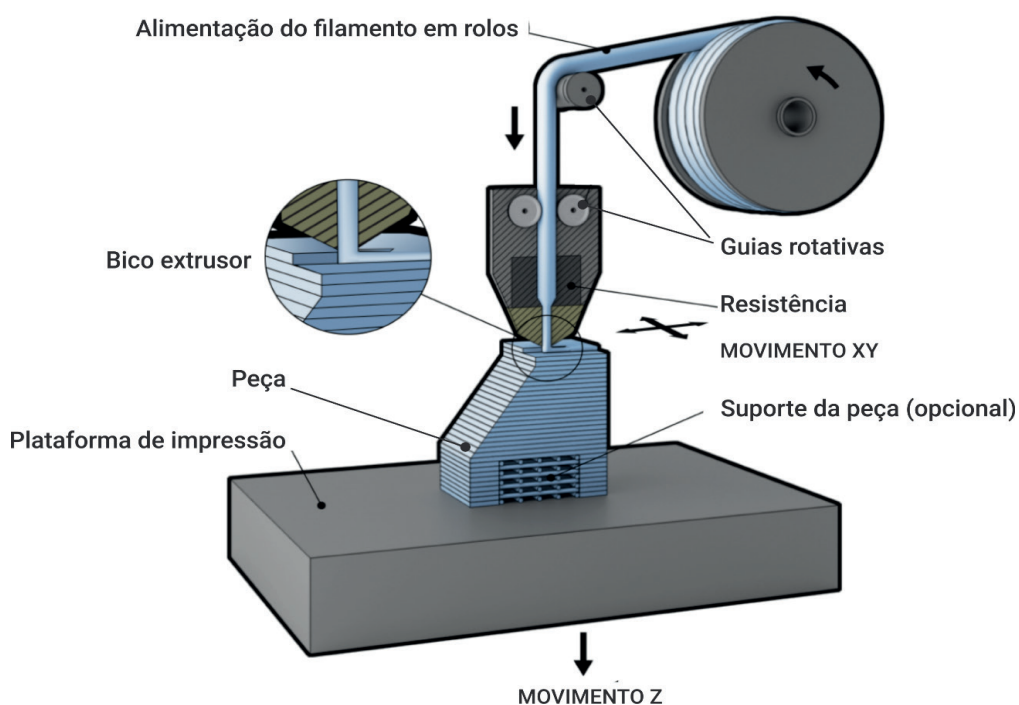


Figura 1: Processo de manufatura aditiva. Fonte: <https://www.manufacturingguide.com>

As etapas do processo de desenvolvimento de um modelo a partir da fabricação digital aditiva ocorrem sequencialmente e de forma cíclica. Primeiro, realiza-se a modelagem 3D digital, em seguida, a conversão do modelo em formato poligonal (STL), no terceiro passo, a conversão do modelo em camadas (SLi), e, por fim, a impressão do modelo propriamente dito (Arruda; Araújo, 2022). Nesta última etapa, o modelo pode receber algum acabamento, caso seja necessário. A Figura 2 destaca cada uma destas etapas mencionadas.

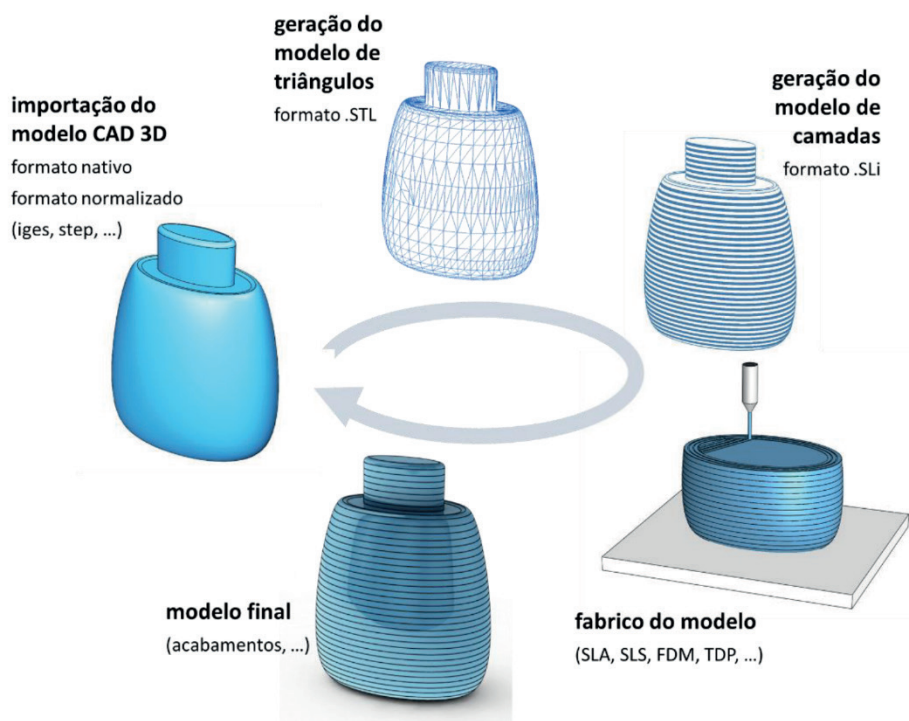


Figura 2: Etapas do processo de manufatura aditiva. Fonte: Relvas (2018, p. 17).

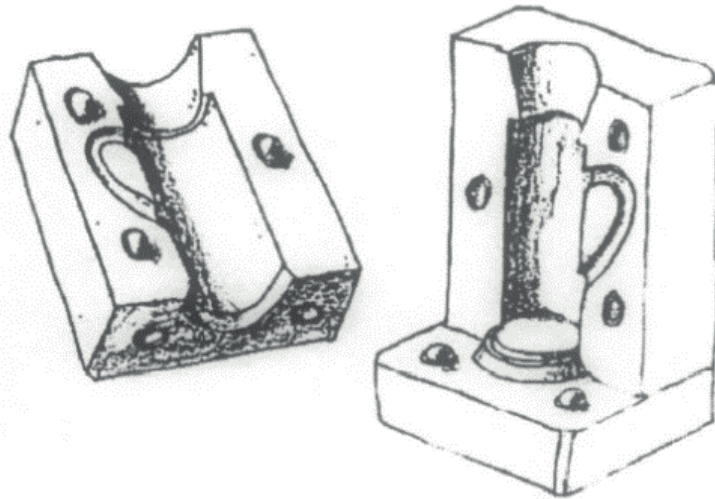
Segundo Arruda e Araújo (2022), as principais vantagens da fabricação digital aditiva são a grande liberdade geométrica, o baixo desperdício de material, a utilização eficiente de energia, o emprego de um único equipamento em todo processo, a rapidez na obtenção de pequenas quantidades de componentes, o potencial de misturar materiais e a produção de peças finais. O mesmo autor menciona limitações que, muitas vezes, dificultam o processo, tais como: precisão e acabamento inferiores a usinagem, limitação quanto à escolha de materiais que podem ser empregados, problemas com distorções e empenamento do material, além de uma produção de lotes em grandes quantidades que ainda é lenta e cara. Apesar dessas limitações, a fabricação digital aditiva, especialmente a impressão 3D, tem avançado e expandido suas aplicações para além da produção de protótipos e modelos. No entanto, observa-se um grande crescimento da sua aplicação na fabricação efetiva de peças funcionais, aplicadas em uma vasta área comercial e industrial, como a aeroespacial, automobilísticas, produtos de consumo, medicina, máquinas e equipamentos, construção civil, entre outras (Arruda; Araújo, 2022).

Técnicas de produção de placas cerâmicas

Inicialmente os azulejos eram produzidos manualmente pela técnica das placas. Posteriormente, com a industrialização, os processos passaram a envolver maquinaria a vapor utilizando moldes. Os azulejos de meio relevo das fábricas de Lisboa em Portugal usavam moldes de madeira ou de metal. As fábricas da cidade do Porto que produziam azulejos relevados, usavam moldes de madeira ou de gesso com representações de malmequeres ou de outros motivos florais (Mariz, 2014).

O molde de gesso é uma técnica muito utilizada e que consiste na produção de moldes que podem ser, conforme o desenho da peça, únicos, bipartidos, tripartidos e, assim por diante. São esses modelos que permitem a reprodução seriada de qualquer peça, conforme ilustrado na Figura 3 pelos malhetes guia do molde de gesso (Fernandes, 2000).

Figura 3: Molde de gesso.
Fonte: Fernandes (2000).



Outra técnica consiste em cortar as placas de argila fresca utilizando uma forma guia, que pode ser de papelão ou outro material, cuja dureza permite criar formas com função de gabarito para o corte. Entretanto, é necessária muita prática para garantir que os cortes, geralmente feitos com estilete, sejam reproduzidos da forma mais fiel possível com o gabarito, como demonstrado na Figura 4.

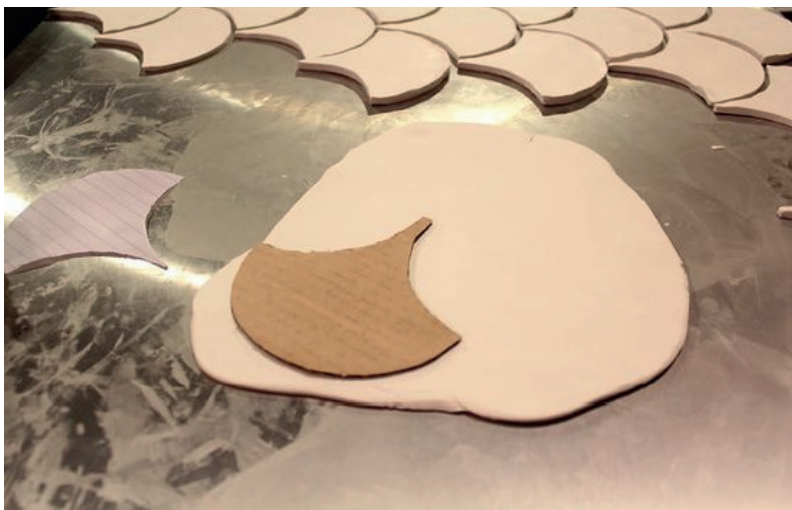


Figura 4: Forma guia
Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/646125877819297958/>

O corte por módulo fixo é outra técnica de produção de placas cerâmicas de importante destaque nesta pesquisa. Consiste em cortar a argila fresca com um material mais duro, geralmente metal, garantindo a mesma forma para todas as peças reproduzidas. Essas ferramentas forjadas em processos industriais especializados podem contar com o mecanismo de ejeção da placa de argila cortada e possibilidades geométricas variadas, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5: Módulos de corte fixo.
Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/646125877818575697/>.



Metodologia

A metodologia desta pesquisa caracteriza-se por sua natureza aplicada. Segundo Lakatos e Marconi (2010), o caráter aplicado da pesquisa destaca-se à medida que seus resultados são utilizados para resolver problemas reais. Assim, busca-se agregar design e tecnologia na fabricação de módulos fixos de corte. Dessa forma, os objetivos exploratórios da pesquisa concentram-se na experimentação de protótipos de corte, com o propósito de viabilizar sua produção por meio da impressão 3D.

A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios de computação gráfica e fabricação digital da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e utilizou a impressora 3D (Figura 6) modelo *Ender3 CREALITY 42-34(Z)*. O processo de impressão foi a partir do método *Fused Deposition Modeling* (FDM) de fabricação aditiva, onde as camadas de materiais de filamento PLA foram fundidas para criar um objeto.

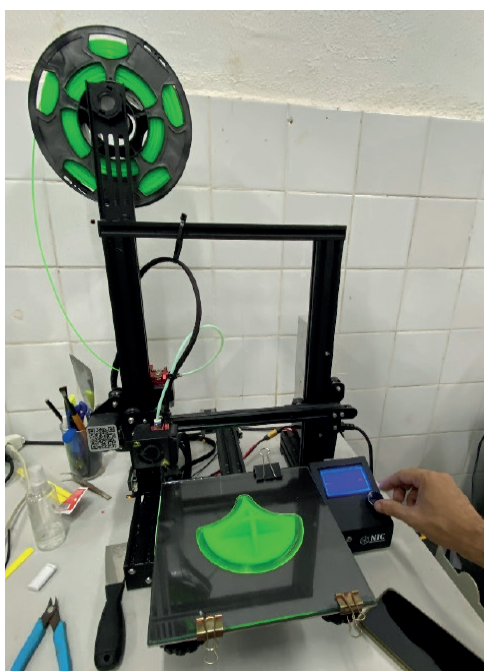


Figura 6: Impressora 3D Ender3 Creality.
Fonte: Dos autores (2024).

Em virtude da caracterização da pesquisa e da busca por um novo artefato de corte, a adoção do procedimento metodológico *Design Science Research* (DSR) torna-se relevante. O processo inicia-se pela compreensão do problema, seguida da geração de alternativas de solução que culminam no desenvolvimento de um artefato, a fim de que sua eficiência e eficácia sejam avaliadas em relação ao objetivo proposto (Santos, 2018). Segundo o autor esse método é adequado em uma pesquisa que envolve a criação de um artefato com o objetivo de promover melhorias no mundo real, sendo a efetividade do artefato em alcançar tais melhorias, sendo esse o foco do estudo.

Com base no *Design Science Research* (DSR) desenvolveu-se as quatro fases de estudo conforme descrito a seguir. A Figura 7 apresenta o processo do DSR que se inicia pela compreensão do problema, geração de alternativas, desenvolvimento do artefato e avaliação.

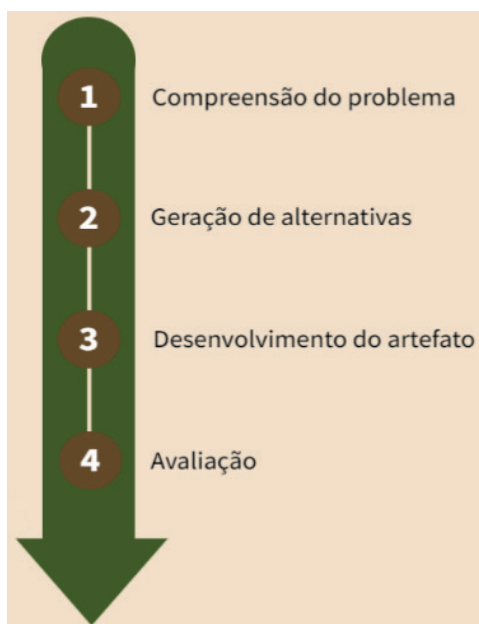


Figura 7: Etapas de pesquisa em *Design Science Research* (DSR).

Fonte: Dos autores (2024), adaptado de Santos (2018).

Fase 1 – Compreensão do problema: o objetivo desta fase foi imergir no tema de estudo e compreender como as tecnologias de fabricação digital poderiam solucionar a produção de protótipos de corte. Com isso foi desenvolvido um módulo mínimo que segue uma sequência de tarefas realizadas com a utilização de três *softwares*: o primeiro (*Illustrator*) para definir e vetorizar o padrão mínimo do módulo. O segundo (*Rhinoceros 3D*), emulador de ambiente tridimensional, responsável pela criação do sólido (protótipo digital) e o terceiro (*Ultimaker CURA*), utilizado para “fatiar” o sólido e adequar os parâmetros de acordo com as necessidades do projeto. Este último transforma as informações digitais em um código (*G-code*) que é transferido por intermédio de um *Micro SD* à impressora 3D.

Fase 2 – Produção dos protótipos: o objetivo desta fase foi gerar propostas de módulo de corte a fim de explorar as possibilidades de solução por meio de testes nas placas de argila. Nesse momento a compreensão dos erros e acertos somam indicadores de direção do projeto digital quanto à organização dos elementos do módulo de corte. Com isso, extraem-se dados importantes para o desenvolvimento do protótipo final. Nessa etapa, a produção dos protótipos seguiu a ordem de construção digital seguido de testes de avaliação com a argila. A partir do comportamento

das placas de argila fresca considerando deformações estruturais, velocidade de reprodução das placas e usabilidade do protótipo em relação ao operador, foram identificadas falhas e, em cada teste, a busca por melhores soluções.

Fase 3 – Avaliação: nesta fase, o objetivo foi avaliar os protótipos produzidos por meio das análises estrutural e funcional elencando principalmente características do protótipo quanto à resistência ao trabalho realizado, preservação das placas cerâmicas extraídas e quantidade de placas cerâmicas obtidas. A avaliação foi realizada em cada protótipo construído.

Fase 4 – Desenvolvimento do protótipo final: com base nas fases anteriores foram definidos detalhes para a produção do protótipo final. O processo de produção a partir do método de fabricação aditiva envolve uma sequência de dados originários da modelagem digital do modelo e dos protótipos anteriores.

Resultados e discussões

As escamas de peixe como objeto de apreciação da pesquisa foram a base para o desenvolvimento dos protótipos de corte a partir da fabricação digital. Com isso, para explorar melhor as possibilidades do desenvolvimento de ideias e soluções foi elaborado um painel semântico, exposto na Figura 8, que sintetiza as informações conceituais norteadoras da pesquisa.

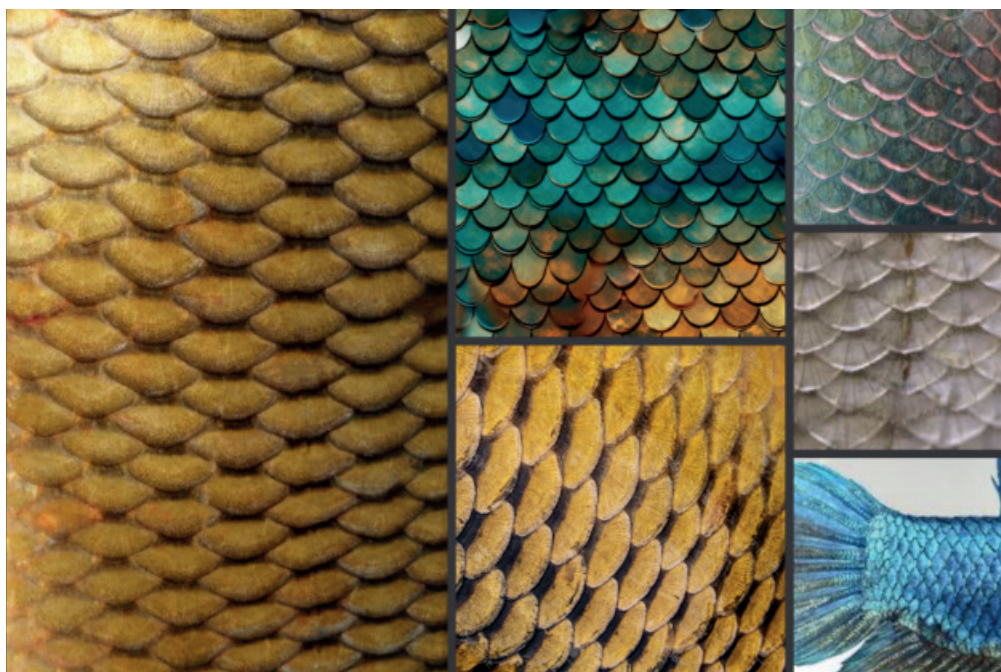


Figura 8: Painel semântico.
Fonte: dos autores (2024).

A partir desta observação foi elaborado um esboço da concepção conceitual do módulo de corte com o objetivo de visualizar um módulo padrão pensando nas formas de encaixe por técnicas de *rapport*. Como resultado das etapas anteriores foi desenvolvido o módulo mínimo, ou seja, um padrão do módulo de corte obtido a partir de uma circunferência de 12 cm de diâmetro partindo da subtração das intersecções de outras duas circunferências de igual tamanho, alinhadas e centralizadas a partir do eixo X da circunferência principal (Figura 9).

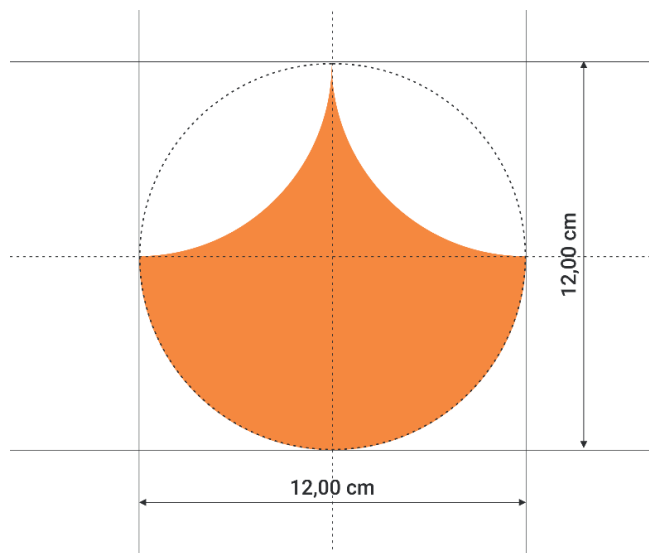


Figura 9: Módulo mínimo.
Fonte: Dos autores (2024).

A produção do protótipo 1 (Figura 10) foi basicamente constituído por uma base sólida agrupada a lâmina de corte perpendicular à base com atenção para as terminações pontiagudas da forma.

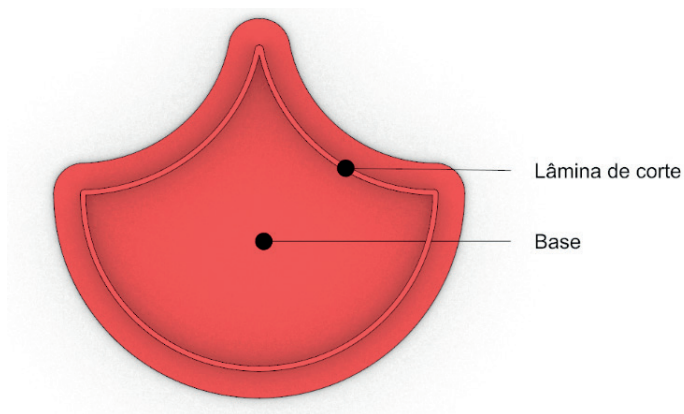


Figura 10: Protótipo 1.
Fonte: dos autores (2024).

Durante os testes do protótipo 1, observou-se dificuldades na acomodação da placa de argila dentro do mesmo, bem como, dificuldade de ejetar a placa recortada de argila do módulo conforme Figura 11.



Figura 11: Testagem do Protótipo 1 com argila.
Fonte: dos autores (2024).

Dessa forma, foi necessário aplicar força para ejetar a placa do interior do protótipo 1, que ficou deformada de forma considerável durante o processo de cura. Assim, o protótipo 1 mostrou-se pouco eficiente na conservação da forma original, dificultando também a otimização do processo de reprodução seriada conforme Figura 12.

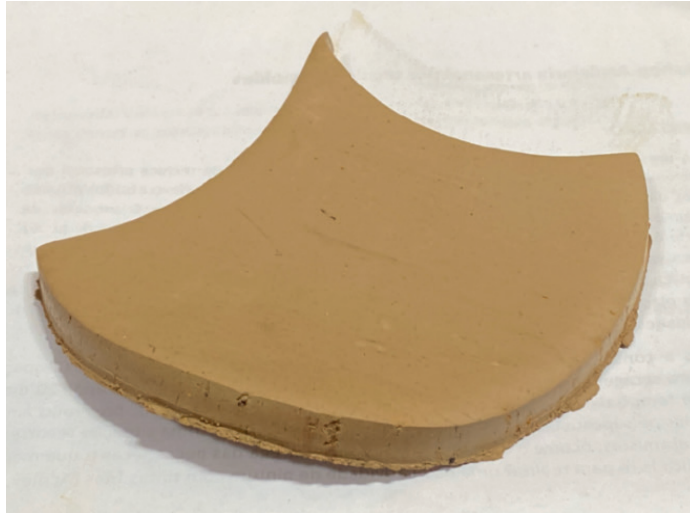


Figura 12: Placa de argila resultado do protótipo 1.
Fonte: dos autores (2024).

A partir destas observações foi desenvolvido o protótipo 2, cujo objetivo foi corrigir os problemas identificados, ou seja, a ejeção da placa de argila e a estabilidade das terminações pontiagudas no momento da ejeção. Dessa forma, em relação à problemática da base fechada, foi pensado em um redesign com base aberta, criando uma espécie de borda suporte da lâmina de corte. Para facilitar a extração da placa recortada, pensou-se em uma segunda estrutura de base suporte que acompanhasse a forma da lâmina de corte e que auxiliasse na ejeção da placa de argila, nomeada de módulo ejetor. Assim, o segundo protótipo foi composto por duas estruturas: (a) sendo uma do módulo de corte e (b) do módulo ejetor, como mostrado na Figura 13.

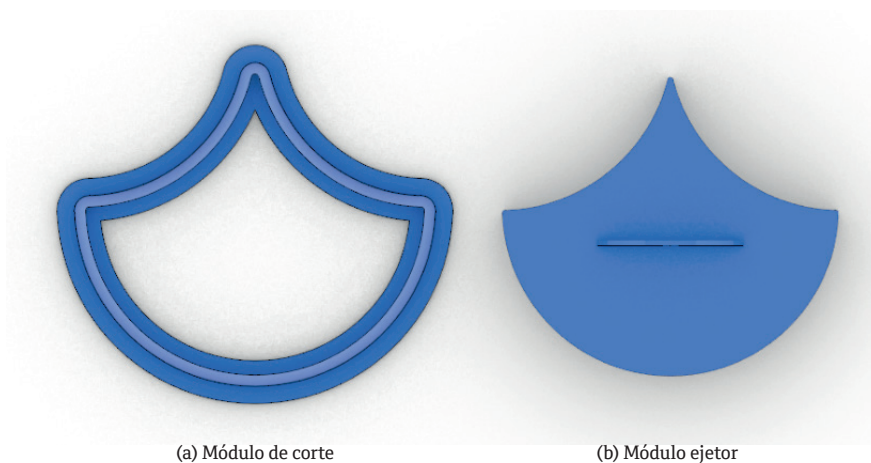


Figura 13: Modelagem digital do protótipo 2.
Fonte: dos autores (2024).

Vale ressaltar que foi adicionado uma semicircunferência ao módulo ejetor para proporcionar aderência à mão do operador. Em resumo, o protótipo 2 desenvolvido possui duas partes que se complementam no momento do corte da argila. Assim que a fabricação digital do protótipo 2 foi realizada, novos testes com a argila indicaram resultados negativos causados pela espessura do módulo ejetor. Definido com 0,2 cm de espessura, o módulo ejetor mostrou-se bastante flexível durante os testes, dificultando a ejeção da placa de argila com suas configurações preservadas. Além da espessura não acompanhar a dinâmica de ejeção da placa de argila, outra problemática foi identificada: desprendimento de camadas de material PLA fundido conforme mostra a Figura 14. Uma análise das causas do problema apontou para o dimensionamento da espessura, preenchimento da parte sólida e fusão das camadas de impressão, ou seja, deduziu-se que as configurações de preenchimento precisam ser alteradas para não repetir o erro, fabricando assim, módulos ejetores frágeis.

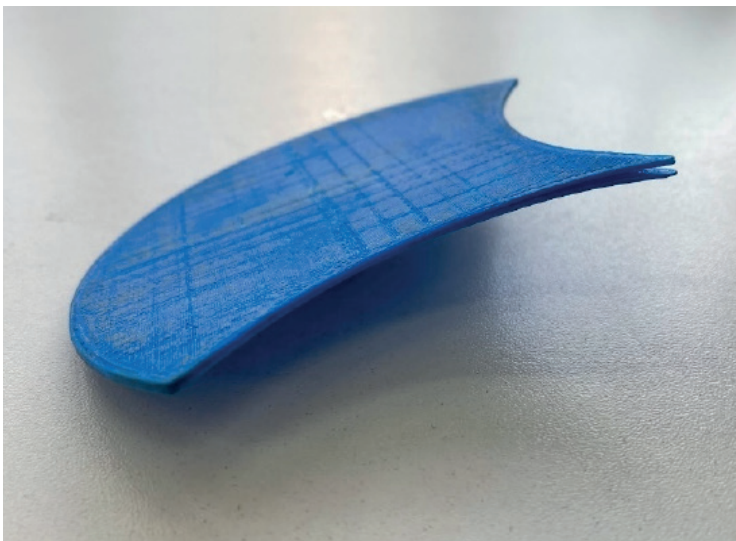


Figura 14:
Desprendimento de
camadas protótipo 2.
Fonte: dos autores
(2024).

Conseqüentemente para o novo módulo de corte foi necessário aumentar a densidade de preenchimento no *software Ultimaker CURA*, bem como aumentar a espessura do módulo com o propósito de fabricar um módulo resistente o suficiente para produzir placas de argila sem deformações ou outras irregularidades. Somado às alterações anteriores, foi proposto uma modificação no pegador do módulo para dar mais firmeza e conforto na pegada do operador. Em síntese, três ajustes se tornaram necessários para o novo protótipo: aumentar a densidade de preenchimento, aumentar a espessura e melhorar o pegador do módulo ejetor. Sendo assim, fabricou-se o protótipo 3, conforme imagens da Figura 15.

Em detalhes na representação (A) tem-se a vista superior do módulo de corte com destaque para a lâmina cortante da placa de argila. A imagem (B) mostra o verso do módulo de corte, destacando-se a base sólida e o módulo ejetor. Na imagem (C) o módulo ejetor com espessura reparametrizada e, na imagem (D) o protótipo 3 com suas duas estruturas acopladas em posição para o trabalho de obtenção do corte desejado.

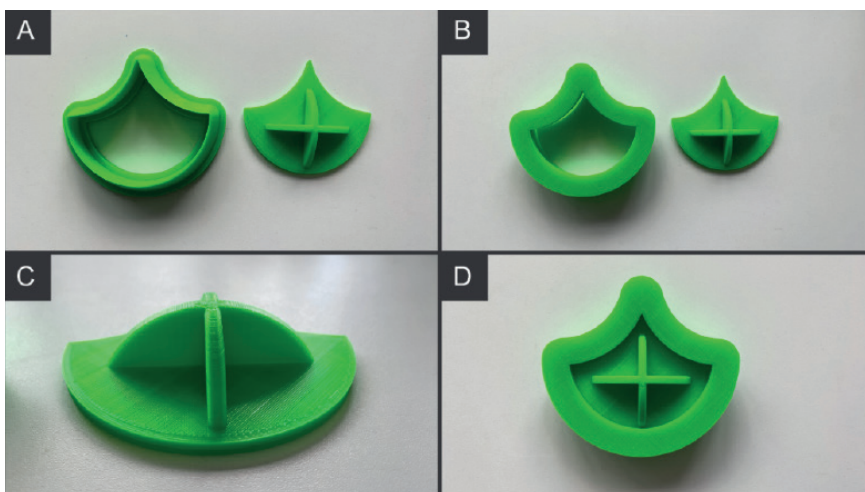


Figura 15:
Perspectivas do
protótipo 3.
Fonte: dos autores
(2024).

Durante a fase de testes do protótipo 3, percebeu-se resultado satisfatório conforme pode ser visto nas imagens da Figura 16. As placas se apresentam bem estruturadas quanto à forma e superfície. Durante essa fase foram produzidas 96 peças e o protótipo 3 não apresentou os problemas relatados nos protótipos 1 e 2.

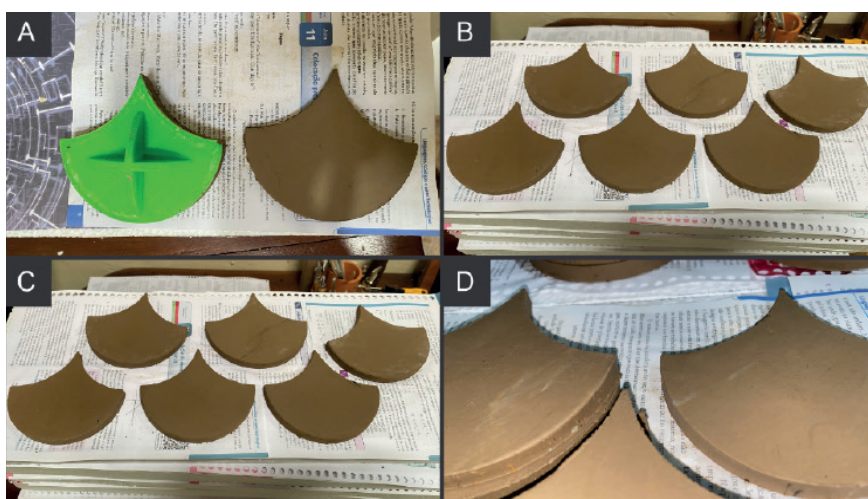


Figura 16: Resultados
da testagem com
placas de argila do
protótipo 3.
Fonte: dos autores
(2024).

Diante disso, foi realizada a análise comparativa (Tabela 1) dos protótipos 1, 2 e 3 em relação às suas dimensões estruturais e funcionais em cada etapa de teste. A análise comparativa revelou diferenças significativas em termos de eficiência, resistência e capacidade produtiva. O protótipo 1, com estrutura simples e única, mostrou-se ineficaz, não conseguindo extrair nenhuma placa e apresentando deformações nas extremidades e superfícies. Além disso, a resistência ao trabalho foi limitada, tornando o processo lento e inadequado para a produção em série.

O protótipo 2, por sua vez, trouxe melhorias em relação à preservação das placas, conseguindo produzir 28 unidades. No entanto, sua estrutura mostrou fragilidades, com problemas de descolamento em algumas camadas, o que comprometeu a resistência e a eficiência geral. Embora tivesse um desempenho mediano em termos de velocidade e qualidade de extração, ainda não atendeu plenamente aos requisitos contidos na Tabela 1.

Descrição	Protótipo 1	Protótipo 2	Protótipo 3
Número de componentes	1	2	2
Dimensões da forma plana	12x11,5 cm	12x10,53 cm	12x10,53 cm
Dimensões do módulo de corte	Área da base: 14 x 13 cm; Altura da lâmina de corte: 2,5 cm; Espessura: 0,2 cm.	Área da base: 14 x 13 cm; Altura da lâmina de corte: 2 cm; Espessura: 0,2 cm.	Área da base: 15 x 13,6 cm; Altura da lâmina de corte: 3 cm; Espessura: 0,8 cm.
Dimensões do módulo ejetor	X	Área da base: 11,9 x 10,2 cm; Espessura da base: 0,2 cm. Espessura do pegador simples: 0,2 cm	Área da base: 11,9 x 10,2 cm; Espessura da base: 0,6 cm. Espessura do pegador em cruz: 0,6 cm
Resistência do protótipo quanto à realização do trabalho	Mostrou resistência pela estrutura única, porém ineficiente durante a extração da placa que se deposita no interior do módulo.	Módulo ejetor se mostrou leve, excessivamente flexível e frágil, apresentando problemas de descolamento de algumas camadas nas estruturas, pouco eficiente.	Ambas as estruturas se mostraram rígidas e resistentes durante os testes, otimizando a velocidade de reprodução em série.
Preservação da placa extraída	Deformações em relação às extremidades pontiagudas e deformações da superfície.	Placas preservadas quanto à forma e superfície, porém exigiu maior manejo e cuidado para obtenção das mesmas.	Placas bem preservadas quanto à forma e superfície, apresentando processo de reprodução satisfatório.
Quantidade de placas obtidas	0	28	96
Velocidade de obtenção das placas	baixa	média	alta
Atende aos requisitos?	não	não	sim

Tabela 1:
Comparação das análises estrutural e funcional.
Fonte: dos autores (2024).

O protótipo 3 se destacou por sua maior robustez e otimização do processo produtivo, conseguindo extrair 96 placas em alta velocidade, preservando forma e superfície. A estrutura rígida e resistente contribuiu para a eficiência, tornando-o ideal para a reprodução em série. Diferente dos outros protótipos, ele não apresentou problemas de descolamento nem deformações nas placas extraídas. Como resultado final, o protótipo 3 foi o único que atendeu plenamente aos requisitos do projeto, sendo o mais indicado para aplicação prática, enquanto os protótipos 1 e 2 ficaram aquém das expectativas, sendo o protótipo 1 o menos eficiente.

Considerações finais

O uso das tecnologias de fabricação digital aditiva já vem sendo utilizada em diversos segmentos, mas ainda carece de estudos detalhados no setor cerâmico. Por meio de pesquisa bibliográfica não foram encontrados trabalhos científicos que detalham como esse processo pode ser realizado em substituição a técnicas de produção de placas cerâmicas tradicionais. Assim, esta pesquisa busca disseminar essa informação.

O fluxo metodológico descrito nesta pesquisa, demonstra que é possível integrar as tecnologias de modelagem CAD e manufatura aditiva aos processos de obtenção de revestimento cerâmico,

agregando design e tecnologia na sua fabricação, além de explorar novas formas, formatos e texturas.

Quanto ao material utilizado na pesquisa – filamento de PLA, observou-se que ele se mostrou eficiente para o estudo, apresentando dureza satisfatória para os procedimentos de corte da argila. Dessa forma, ele representa uma alternativa viável para a produção de módulos de corte fixos. No entanto, torna-se necessário um estudo mais aprofundado sobre a vida útil desse material nesse tipo de aplicação, bem como futuras investigações que analisem a ergonomia do produto e o potencial biomecânico do operador.

Portanto, a fabricação digital aditiva por impressão 3D (FDM) possibilita a produção de módulos de corte, levando em consideração os requisitos de projeto, especialmente no que diz respeito à preservação das placas extraídas do módulo e à resistência do artefato durante a execução do trabalho.

Referências

- ARRUDA, Amilton José Vieira de; ARAÚJO, Germana Gonçalves de (Org.) **Design & narrativas criativas nos processos de prototipagem**. São Paulo: Blucher, 2022.
- BRITO, Gustavo de Figueredo; AGRAWAL, Pankaj; ARAÚJO, Edcleide Maria; MELO, Tomás Jeferson Alves. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, set. 2011. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/222/0> Acesso em: 9 jul. 2025.
- BRUSCATO, Underléa Miotto; ALVARADO, Rodrigo García. Muro-pixel: exploración digital de um sistema constructivo de placas entrelazadas. *In: Congresso Da Sociedade Iberoamericana De Gráfica Digital, 14, SIGRADI 2010, Bogotá. Anais [...]* Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 2010, p. 205-208. Disponível em: https://itc.scix.net/pdfs/sigradi2010_205.content.pdf. Acesso em: 9 jul. 2025.
- COUPKOVÁ, Zuzana; SEIBOLD, Johannes; PRUNTER, Philipp; MAIER, Johanna; MAIER, Thomas. Thermal performance of sculptured tiles for building envelopes. **Building and Environment**, [S.l.], v. 199, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013232100216X?via%3Dihub>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- FERNANDES, Dulce Maria de Paiva. **Modelação de gesso: materiais, ferramentas e procedimentos**. 2000. Disponível em: <https://chrisogg.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/03/modelacao-de-gesso.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MARIZ, Luís. **Azulejo semi-industrial na arquitetura civil portuense: caracterização e intervenção**. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2014.
- PRADELLA, Marcelo Pinto; FOLLE, Luis Fernando; Análise de mercado sobre tecnologias de prototipagem rápida por adição de material. *In: Anais [...]* do 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 4, p. 2286-2298, São Paulo: Blucher, 2014. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-de-mercado-sobre-tecnologias-de-prototipagem-rpida-por-adicao-de-material-12822> Acesso em: 9 jul. 2025.
- RELVAS, Carlos Alberto Moura. **Processos de prototipagem rápida no fabrico de modelos de geometria complexa: estudo realizado sobre o modelo anatómico da mão**. Dissertação (Mestrado em Design Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2002. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/13395> Acesso em: 9 jul. 2025.
- RELVAS, Carlos Alberto Moura. **O Mundo da impressão 3D e o fabrico digital**. Porto: Engebook, 2018.
- SANTOS, Aguinaldo dos. **Seleção do método de pesquisa: guia para pós-graduando em design e áreas afins**. Curitiba: Insight, 2018.
- SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos. A manufatura aditiva no design de produtos. *In: VOLPATO, Neri. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2016, 5. ed., cap.2, p. 31-44. Disponível em: https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/PDF_tecnologiasaditiva.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.
- SCHEEREN, Rodrigo. **Fabricação digital na América do Sul: laboratórios, estratégias, processos e artefatos para o design**. Tese (Doutorado em Teoria e História da Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102132/tde-05042022-173034/pt-br.php>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- TORREBLANCA-DÍAZ, David A.; MAZO, Ever Patiño. **Texturas bioinspiradas y fabricación digital**. 1.ed. Medellín: Editorial UPB, 2021. Disponível em: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/9086>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- VOLPATO, Neri. **Prototipagem rápida: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2006.

Sobre os autores

Marcelo Cássio Lima Santos é Mestrando em Design pela Universidade Federal do Maranhão. Possui graduação em licenciatura em Biologia e bacharelado em Arquitetura e Urbanismo. Especialista em Design Paramétrico em Arquitetura pela PUC MINAS e especialista em cidades inteligentes e sustentáveis pela UNINOVE. Produz pesquisas relacionando natureza, design, arquitetura e urbanismo. Investiga o potencial das tecnologias de fabricação digital em diversas áreas do conhecimento.

E-mail: marcelokassy@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4889452487547603>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3933-5126>

Ivana Marcia Oliveira Maia é Professora titular do Instituto Federal do Maranhão. Possui graduação em Desenho Industrial pela Universidade Federal do Maranhão (1986), Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2008), Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2014) e Pós-doutoramento na Universidade do Porto em Portugal (2018). Desde 2020 participa do Programa de Pós-Graduação em Design da UFMA. Tem interesse nos seguintes temas: design, ergonomia, biomecânica, tecnologias assistivas, design inclusivo, metodologias ativas e tecnologias digitais aplicadas à educação.

E-mail: ivana.maia@ifma.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1520994716359117>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1942-7795>

William Glaydson Lemos da Conceição é Bacharel em Design pela Universidade Federal do Maranhão UFMA. Ceramista há muitos anos e assistente de sala de aula de Paulo César Alves de Carvalho da UFMA. Recentemente foi instrutor da residência artística em cerâmica no Centro de Arte Espaço Chão, Rua do Giz, Praia Grande; onde aconteceu uma oficina de experimentos para restauro de azulejos de um casarão do século XIX. Pesquisa experimentos com novas tecnologias e as relações entre argila e manufatura aditiva enquanto métodos facilitadores dos processos da cerâmica bem como modelagem e impressão 3D na projeção de módulo padrão para obtenção de revestimento/azulejo em cerâmica tradicional.

E-mail: williamglaydson@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9045210271808373>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-8049-8554>

Bruno Serviliano Santos Farias é Doutor em Design pela Universidade Estadual Paulista (2019), Mestrado em Design pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA, 2014), especialização em Design Gráfico (2009) e graduação em Publicidade e Propaganda e Desenho Industrial. Atualmente, atua como professor da graduação em Design e contribui para o Programa de Pós-Graduação em Design da mesma instituição. As pesquisas concentram-se no Design Gráfico Inclusivo e na aplicação de Inteligência Artificial Generativa no campo do Design.

E-mail: bruno.serviliano@ufma.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4483482439913996>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5960-5835>