

3D Printing for Architecture: organic integration of algorithm, machine and material paste-manufacture

Thiers Freire da Nobrega¹, Gonçalo Castro Henriques¹, Andres Passaro¹

¹Universidade Federal Rio de Janeiro, LAMO-PROURB
thiersfreire@gmail.com; gch@fau.ufrj.br, andrespasaro@fau.ufrj.br

Abstract. Form, process and material tend to be considered as independent or separated entities in modern design theory. This research explores the integration of parametric design with a paste-based 3D printing process. This integration intends to enable creative and holistic design inspired by nature. For that purpose, the research simultaneously develops, in a feedback loop, parametric modelling with the development of a machine to produce the shape in past-like material. The research develops a customized paste extruder to integrate the design algorithms and the machining processes. The authors test the methodology in a DIY, hands-on, empiric design integrating digital manufacture and handcraft craft, developing a customized parametric clay component, baked and glazed at a 1:1 scale for a future pavilion.

Keywords: Paste-based 3D printing, Digital Fabrication, Digital craft, Ceramic.

Contexto

Em anos recentes a impressão 3D tem-se tornado popular nos cursos de arquitetura. No entanto a sua aplicação é ainda limitada, quer pela modelagem de formas, quer pelo desenvolvimento material e pela sua produção. Um maior conhecimento de modelagem é essencial para desenvolver formas personalizadas na escala real. No entanto para produzir as formas em escala real é necessário desenvolver métodos de produção adequados e conhecimento sobre os materiais associados. O acesso a máquinas de impressão 3D em material final, como concreto ou argila, exige recursos que as universidades nem sempre dispõe. Para ultrapassar estas limitações, foi desenvolvido um projeto de final de curso de Arquitetura associando modelagem, com o desenvolvimento de uma máquina de impressão 3D de material pastoso.

O laboratório LAMO na sua fundação com a chegada da cortadora laser, começou a montar as suas próprias impressoras 3D, tendo lançado em 2014 o seu primeiro workshop sobre este tema, com a participação de Yan Molinos e Marlus Araújo. Seguiu-se uma série de capacitações internas para alunos de arquitetura com a participação de Thiers Nóbrega e Vinícius Lucena, entre outros (2015-6). Andres Passaro iniciou a aplicação da impressão em pesquisa para habitação de baixo custo, que foi apresentada nas jornadas de iniciação científica SIAC-UFRJ 2017-9. Com esta pesquisa foi desenvolvida uma primeira máquina de impressão com materiais pastosos com tração pneumática, numa parceria com a empresa Koios, um sistema delta com 3 perfis de alumínio de 2m altura, conectados por encaixes impressos em 3D. Com o primeiro bico extrusor foram iniciadas colaborações com o departamento de cerâmica da Escola de Belas Artes (Prof. Kátia Gorini, EBA). Foi desenvolvida também uma impressora 3D com a engenharia da COPPE-NUMATS, que vem desenvolvendo impressão em material cimentício (Prof. Romildo Toledo e Óscar Reales). Thiers Nóbrega continuou a adaptação do sistema com um mecanismo de extrusão que combinava seringa com êmbolo, câmara de armazenamento e bico, num mecanismo compacto. A impressora foi desenvolvida com o seu projeto final de graduação: "Impressão 3D Arquitetônica" orientado por Andres Passaro, que será descrito neste artigo. Mais recentemente, em junho 2021, o LAMO recebeu o Kuka KR120 270r. Apesar das dificuldades operacionais para instalação, avançou em pesquisas também associadas à impressão 3D. Nomeadamente criando uma aliança para alavancar o desenvolvimento com as universidades UFRJ - Universidade Federal Rio Janeiro, Brasil, UBB-Universidad Bío-Bío e UTFSM - Universidad Técnica Federico Santa María do Chile, formando o grupo Southern Creative Robots (Passaro, Henriques, Alvarado, González 2022).

O projeto final de graduação acumulou pesquisa anterior, que foi publicada recentemente no artigo "[Experimental Paste Extrusion Mechanism for 3D Printing](#)". O interesse na impressão 3D pastosa deparou com dificuldade de acesso a máquinas que possibilitem investigar este tipo de manufatura, pelo

que a solução foi fabricar nosso próprio mecanismo. Através da investigação de projetos open source, cultura maker e pesquisa na internet, fomos desenvolvendo o mecanismo de extrusão pastosa (argila).

No estado atual da impressão 3D de arquitetura, há uma diversidade de formas arquitetônicas experimentais, variando de estruturas convencionais a circulares. A escolha do sistema de máquinas e extrusão também se destaca, com a presença de pórticos cartesianos e braços robóticos. O uso predominante de cimento e outros materiais pastosos é evidente, com a busca por replicar formas tradicionais ([Alvarado, Orellana, Pérez, 2021](#)). Esta pesquisa explora a combinação de materiais locais com processos automatizados, visando eficiência e sustentabilidade. Na impressão 3D em arquitetura há progressos com a associação de técnicas com materiais. Esta pesquisa explora um mecanismo de extrusão para uma construção personalizada e alinhada com demandas contemporâneas da arquitetura.

1 Hipótese

A incorporação de novos processos de fabricação 3D, para juntar a processos consolidados de projeto deparam com as limitações de considerar as novas máquinas como meras ferramentas. Nesse contexto, a transição do sistema de produção do paradigma estabelecido para o paradigma digital contemporâneo da informação, requer integrar as diferentes etapas da produção na concepção arquitetônica. Essa integração precisa abranger tanto a criatividade presente no código (algoritmo) para desenvolver a forma, como a utilizar o código para controlar a máquina, para assim desbloquear todo o potencial que o sistema nos pode oferecer. Assim é necessário integrar no projeto arquitetônico, o algoritmo com a máquina, para suportar soluções criativas e coerentes com as estruturas que observamos no mundo natural ([Oxman 2010](#)).

Esta abordagem não pretende impor uma lógica organicista movida por desejos pessoais ou apenas estéticos, mas sim considerar o aspecto orgânico e biológico de origem natural, como exemplo de soluções coerentes que nos podem guiar perante os desafios estruturais impostos pelo processo de fabricação na arquitetura. Há uma afinidade intrínseca do arquiteto nos seus processos criativos com o orgânico, já que enquanto ser vivo, é natural que considere familiares as soluções provenientes da sua própria natureza.

Esta identificação com o orgânico não é exclusiva dos métodos digitais e nem depende apenas da utilização de recursos avançados automatizados. A máquina nos fornece apenas uma dimensão informatizada, que permite o acesso a um processo, no qual, os problemas físicos a serem enfrentados na construção se tornam variáveis e parâmetros manipuláveis. Contudo, ousamos dizer que esses processos computacionais complexos se aproximam da essência criativa de alguns visionários no campo da arquitetura. A busca por projetos inspirados na natureza e na extração de soluções harmônicas, fluidas e coerentes não é algo recente entre os arquitetos, havendo percursos como

Frank Lloyd Wright e Zaha Hadid que executaram obras arquitetônicas de grande dimensão inspiradas em formas orgânicas naturais.

Este processo criativo requer uma abordagem fluida do arquiteto considerando inputs dos ambientes naturais, mesmo que o resultado seja um processo de construção tradicional. Diante do potencial oferecido pela arquitetura paramétrica, cabe-nos investigar como conciliar essa fluidez e aproveitar plenamente seus recursos generativos. Acreditamos que essa integração, nos conduzirá não apenas a uma arquitetura organicamente orientada para a concepção de formas naturais e inteligentes, mas também para soluções sustentáveis e integradas harmoniosamente no meio ambiente.

2 Método / Metodologia

Existem vários mecanismos de impressão 3D pastosa, mas como referido não possuímos acesso a nenhum destes mecanismos em pleno funcionamento na nossa universidade. A alternativa para executar testes para compreender o processo foi desenvolver nosso próprio *sistema de extrusão integrado*, projetado segundo a lógica do faça você mesmo (DIY - Do It Yourself), em formato de seringa, composto de êmbolo, câmara de armazenamento e bico. Neste sistema eliminamos o mecanismo de extrusão secundário e optamos pela extrusão direta, diminuindo a complexidade e custo do projeto. Adaptamos o mecanismo de uma impressora 3D FDM convencional, com área de impressão de 26cm x 23cm, que determina a dimensão da produção.

As peças do sistema funcionam de forma interligada. Na primeira versão (figura 1, imagem superior) acoplamos ao motor de passo uma engrenagem planetária [1], também impressa DIY para aumentar o torque do motor, e exercer pressão através do pistão [3] e seu êmbolo sobre a pasta de argila dentro do cilindro de alumínio. Construímos a peça que empurra o pistão [2] a partir de uma impressão 3D, que é tracionada pela barra roscada através de uma castanha metálica. Esta peça contém quatro furos, onde passam barras lisas e servem como guias, estabilizando todo o mecanismo. Aproveitamos algumas das partes deste sistema de sucata, como o fuso roscado, derivado de partes sobressalentes de uma impressora antiga. As barras lisas ficam entre o motor e o cilindro de compartimento do material pastoso, que são fixadas respectivamente no motor e no tubo extrusor. Todo acoplamento entre o cilindro de alumínio, o motor e o bico foram impressos em PLA numa impressora 3D.

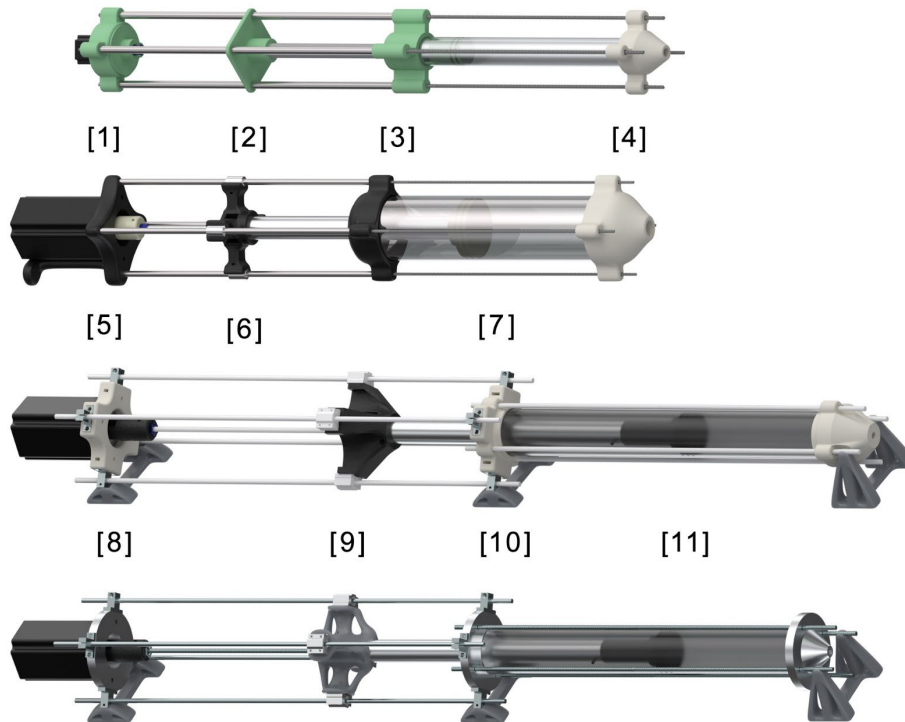


Figura 1, 2, 3, 4. Render das quatro diferentes versões do mecanismo, sendo a superior a primeira. Fonte: Autor, 2022

O centro de nosso primeiro extrusor, foi um compartimento cilíndrico de alumínio [3] de cinco centímetros de diâmetro, que recebe o material pastoso (argila, ou futuramente argamassa). No interior deste cilindro, está o êmbolo, também impresso em 3D, circundado por um anel de vedação. Este êmbolo é diretamente ligado ao fuso roscado e acoplado ao eixo do motor para tracionamento. A ponta do cilindro de alumínio [4], corpo do extrusor, recebe uma peça também modelada em 3D, que permite rosquear um engate pneumático rápido para acoplamento de uma mangueira de teflon de cinco milímetros de diâmetro interno. Esta mangueira é responsável por encaminhar o material pastoso até a impressora.

A primeira versão do mecanismo extrusor, depois de executados diversos testes, provou ser um sistema funcional. No entanto, surgiram novos desafios durante o seu desenvolvimento: precisamos readaptar as peças impressas e reforçar determinados pontos; o cilindro de alumínio se mostrou muito pequeno para a escala desejada e o motor, mesmo com a engrenagem planetária, não tinha força necessária para empurrar a argila, pois com o tempo as engrenagens começaram a desgastar e o motor a emperrar. Assim, para superar estes problemas necessitamos projetar um novo mecanismo extrusor.

A segunda versão do mecanismo (figura 2) possui uma série de ajustes: adquirimos um motor de passo mais forte [1], um Nema 32 com 120kg de força; reforçamos a peça que empurra o pistão [2] alinhada com rolamentos lineares; e substituímos o cilindro de alumínio [3] de 5 centímetros de diâmetro por um de 10 centímetros. Com essas novas mudanças aumentamos a escala do mecanismo, com um motor e volume maior que o anterior, no entanto, a estrutura do mecanismo continuou a mesma, as barras que tracionam e guiam as peças não foram alteradas. Isso gerou um problema, a barra roscada não aguentou a força do motor e entortou. Devido a estes novos problemas foi necessário desenvolvermos uma terceira versão do mecanismo. Esta versão contou com uma nova peça impressa para o motor passo [1], para alinhamento das barras lisas e de conexão do motor de passo com a barra roscada. Mudamos também a peça que traciona o pistão [2], que reforçamos e substituímos também os rolamentos lineares por blocos de rolamentos lineares mais estáveis. Modificamos a peça de suporte do cilindro de compartimento [3] para segurar as peças de apoio das barras lisas e os fusos que prendem o cilindro de compartimento da argila. Substituímos o cilindro de compartimento de alumínio por um cilíndrico de acrílico [4], uma mudança crucial para ver a quantidade de argila dentro, evitando os problemas ocasionados quando a argila acaba e o pistão força o bico. A última mudança foi na peça impressa do bico, colocamos silicone na sua borda para conter o vazamento de material.

Com estas mudanças, da terceira versão, obtivemos resultados positivos, a máquina melhorou e pudemos efetuar novos testes. Apesar das melhorias, as peças impressas começaram a apresentar constantes falhas devido à força do novo motor, de até 120kg, e começaram a quebrar. A quebra repetida de peças impressas em 3D, mesmo que reforçadas e com 100% de densidade, mostrou que a pressão era excessiva e precisaríamos pensar em uma alternativa. A solução que pensamos foi usinar as peças em alumínio com um torneiro mecânico. Para tal, desenvolvemos um novo projeto de peças do mecanismo com esse método de fabricação. Por serem feitas em um torno, a forma arredondada facilita sua usinagem. Depois destes ajustes, no projeto e com as peças executadas, o mecanismo extrusor estabilizou e conseguimos prosseguir com foco na impressão 3D de argila propriamente dita.



Figura 5, 6 e 7. Mostram as falhas que ocorreram devido às peças impressas não suportarem a pressão na terceira versão da máquina. Fonte: Autor, 2022

Depois de assegurado o controle do mecanismo, através do algoritmo implementado, o próximo passo foi compreender os limites do material a utilizar no projeto. Para imprimir algo pastoso, é importante dominar a viscosidade do material, o que tem influência direta na sobreposição de camadas e no funcionamento do mecanismo. Se o material for muito fluido, não mantém a sua estrutura própria, se dissolve literalmente. Se for demasiado denso, o mecanismo pode não ter força suficiente para executar a extrusão, ou gerar falhas na sobreposição de camadas pela dificuldade de expelir pasta. É importante entendermos, qual o limite de desvio do centro das camadas, criando camadas “em balanço”, sem perder o suporte da camada subsequente. Todas estas questões foram investigadas para permitir definir a forma final do projeto. Relativamente à tecnologia de impressão em material pastoso tivemos como referências as publicações de [Cuevas & Pugliese \(2020\)](#) e de [Keep & Layer & Height \(2020\)](#).

Obtivemos resultados positivos com argila, em experimentos anteriores. É fácil calibrar a viscosidade da argila, adicionando água, porque a argila não endurece rapidamente e através da queima se abre um novo campo de possibilidades de acabamento, pelo processo de esmaltação. Iniciamos os testes, com três tipos de argilas: a argila branca shiro pascal com chamote, argila marfim pascoal e a massa porcelana, todas de um fornecedor local do Rio de Janeiro. A argila que obtivemos melhores resultados de plasticidade foi a shiro pascal com chamote. O chamote é uma argila queimada e triturada, que em seguida é incorporada na mistura e reduz a plasticidade, mas que aumenta a resistência estrutural e diminui a retração linear, após a secagem, o que se verificou ser um diferencial no decorrer dos testes executados. Assim usamos esta mistura de argila para os testes que iremos agora descrever.

Resultados

Desenvolvemos um projeto, através de um estudo de caso, uma proposta de um pavilhão para testar o processo de impressão 3D. O objetivo foi desenvolver uma forma ampliada pelos meios de fabricação digital integrando o uso destas ferramentas de maneira orgânica. Outra questão imprescindível, foi desenvolver um projeto, que pudesse ser executado com as ferramentas disponíveis, num laboratório com recursos básicos de impressão 3D, usando impressora 3D de porte médio, desenvolvida através de método faça você mesmo. Este é assim um projeto prático-teórico, de caráter empírico, que explora, de acordo com os recursos disponíveis, as possibilidades de impressão 3D na arquitetura.

Desenvolvemos um pavilhão que protege o ambiente da luz solar e permite em simultâneo a circulação de ar. Numa construção tradicional, uma cobertura com telhas serve como proteção do ambiente, mas simultaneamente bloqueia a entrada de ar de forma invariável. Tal acontece porque a telha é um

componente padronizado que resulta de fabricação seriada. Nosso desafio envolveu pensar um componente tipo telha, que pudesse servir como proteção contra chuva, ao mesmo tempo garantindo a circulação de ar. Desenvolvemos este componente personalizado, definindo os seus parâmetros, para ultrapassar as limitações da padronização. Desenvolvemos uma textura que se altera gradualmente, à medida que os módulos se sobrepõem formando o pavilhão. Ou seja, quanto mais alto estão os blocos, menor é a sua abertura para o exterior do espaço arquitetônico. Desta maneira, a luz e a entrada de elementos externos como água e ar, são bloqueados na parte superior da construção e mais abertos em sua base, gerando uma forma orgânica e distribuída setorialmente.

Antes de modelar os blocos, realizamos estudos com diagramas e croquis. Começamos por olhar para a forma da telha tentando entender como poderíamos aprimorar a sua funcionalidade. Entendemos que o projeto se beneficiaria se apresentasse também soluções funcionais para a entrada de ar e proteção à chuva, tratando destes três itens de maneira integrada. Para adicionar essas outras propriedades aos blocos, desenvolvemos uma forma facilmente controlada através do design paramétrico. A solução foi encontrada através do componente “graph mapper”, do programa de modelagem paramétrica “Grasshopper3D”, que representa uma função de mapeamento numérico. Com esta definição podemos aplicar uma distribuição senoidal, de uma série de números, que constituem uma lista de valores. A onda seno serviu de base para nossa forma. Resumidamente, relacionamos as coordenadas de cada ponto dessa malha, com geometrias de referência. Com essa definição foi possível controlar a amplitude das aberturas do projeto. Os blocos revestem uma estrutura de compensado impermeabilizado que resultam de um processo de experimentação projetual. Os blocos têm uma curvatura com abertura na parte externa e interna da geometria, que variam de acordo com a altura do bloco em relação ao chão. A curvatura interna, nesta primeira versão, é acentuada, possibilitando a passagem da luz lateral. Os blocos, necessitam de uma estrutura interna para suportar a

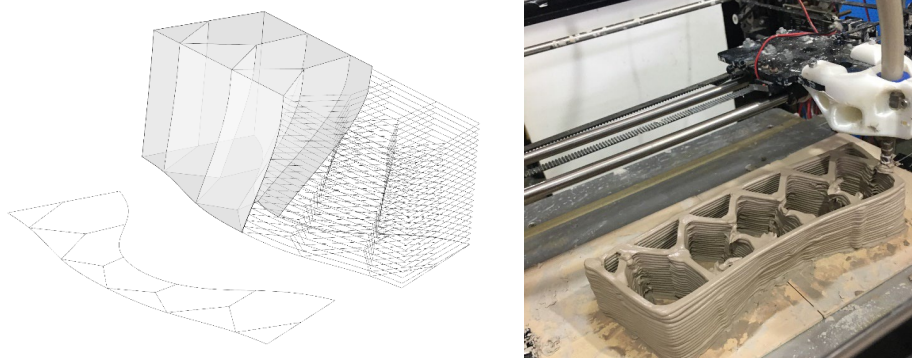


Figura 8 e 9. A figura 8 mostra a visualização do primeiro modelo de bloco feito, com as linhas das camadas. A figura 9 mostra o erro na impressão. Fonte: Autor, 2022

capa externa, como se fosse um padrão de “infill” visto na impressão 3D de plástico convencional. Geramos estas geometrias para estruturar o interior da forma para a podermos imprimir a partir de padrões geométricos, ocupando parcialmente o espaço e sustentar as camadas externas.

Na primeira versão do bloco, o padrão interno era em forma de “Y”. No fatiamento da geometria em camadas, a parte superior se tornou uma linha contínua, um W, e a perna do “Y” era uma linha separada. Quando essas linhas foram traduzidas em pontos de G-code, a máquina gerou o “W” contínuo e fez as linhas separadamente. Como podemos ver na imagem, isso produziu constantes falhas na impressão, quando o bico precisava de mudar de um ponto ao outro no movimento da camada, não era contínuo. O que demandou repensar a geometria interna do bloco. A segunda versão, do bloco mostrou uma maneira de solucionar os problemas da versão anterior. Fizemos a malha interna em forma de dois “W”, formando duas linhas contínuas. Contudo, surgiu um novo problema. As linhas do “W” começavam e terminavam em posições opostas. Isso fez com que quando a máquina terminava a extrusão de um caminho e seguia para o início do outro “W”, o bico extrusor percorria a geometria da camada executada, deixando uma falha na extrusão depositada anteriormente. Dessa maneira, ficou evidente a necessidade de ordenar as camadas de extrusão consecutivamente, de maneira a minimizar o caminho que a máquina percorre, expelindo o mínimo de material possível. A sequência de imagens mostra a marca deixada pelo bico extrusor no bloco.

Na terceira versão do bloco podemos ver como simplificamos a geometria. Percebemos que, com uma forma em “W” contínua, conseguimos suportar as camadas externas sem problemas. Além disso, com apenas uma linha interna contínua, conseguimos alternar os pontos iniciais, com os finais das camadas internas e externas. Um obstáculo que tivemos de resolver foi relativo à uniformidade da altura das camadas. Com o componente “isocurve” conseguimos criar curvas nas superfícies da geometria, e controlar essas curvas com o uso de um “graph mapper”, regulando precisamente a distância entre camadas. Uma questão que ficou por resolver, nesta forma, foi do “overhang”. A geometria que criamos possuía um grau de balanço elevado.

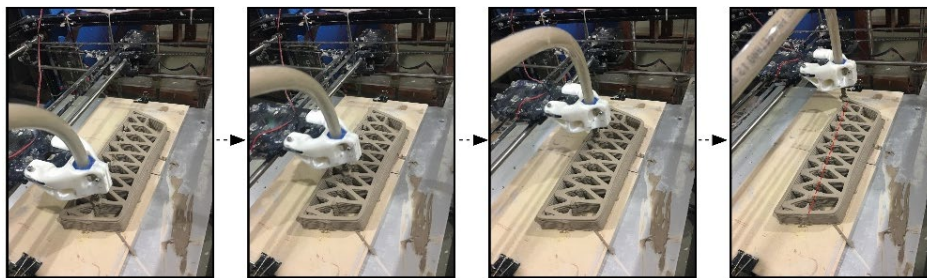


Figura 10, 11, 12, 13. Mostram o bico extrusor a danificar a camada anterior ao se movimentar sobre a peça sendo impressa. Fonte: Autor, 2022

Dessa forma, no bloco do pavilhão que possuía uma abertura mais acentuada, a forma não aguentou as camadas em balanço e o bloco entrou em colapso. Para solucionar este problema criamos uma geometria de suporte impressa em PLA com uma impressora FDM comum. Apesar de ter funcionado, mesmo com essa técnica, as camadas sobrepostas continuavam com um espaçamento elevado. A solução para essa questão foi diminuir a curvatura das camadas internas, revisando a forma do bloco. Após resolver estes obstáculos, chegamos a uma forma final para o bloco de nosso pavilhão.

O bloco possui duas camadas de curvatura, interna e externa, que mudam de tamanho de abertura à medida que o bloco se distancia do chão. O produto deste trabalho, foi uma seção do projeto em escala reduzida. Partilhamos algumas etapas do processo desde a impressão até a queima e montagem do modelo.



Figura 14, 15, 16. Mostram o processo de fabricação final do bloco, mostrando a peça recém impressa, sendo esmaltada e já queimada. Fonte: Autor, 2022



Figura 17. Mostra um render da forma final do pavilhão. Fonte: Autor, 2022



Figura 18. Protótipo da sessão do arco que foi montada. Fonte: Autor, 2022

3 Conclusão

Para desenvolver este artigo foi necessário desenvolver uma pesquisa teórica e prática em três áreas: desenvolvimento de sistema de impressão 3D de material pastoso, implementação de código para modelagem 3D parametrizada e impressão 3D do material pastoso, incluindo a queima dos módulos produzidos. Essa integração permitiu aprofundar nosso conhecimento

do processo de fabricação 3D, com foco na aplicação prática de uma solução arquitetônica.

A combinação da criação arquitetônica integrando o pensamento parametrizado, com algoritmos de modelagem e impressão 3D pastosa, é um laboratório de investigação criativa. Desenvolvemos um protótipo de um pavilhão, em escala reduzida, com soluções integradas para tratamento de luz, entrada de ar e vedação contra chuvas, que mostra como é viável utilizar materiais tradicionais, como a argila, com processos digitais de fabricação. Durante o desenvolvimento, realizamos testes de impressão, de diferentes complexidades, ajustando erros e incorporando acasos observados nos experimentos práticos, validando o potencial da pesquisa. A organicidade do projeto não se limita apenas à funcionalidade da forma, mas sim à integração de todas as etapas, desde a abstração criativa até a concretização dos blocos impressos. A modelagem e impressão da argila, para criação de blocos paramétricos, seguida pela queima, revelou inúmeras possibilidades de trabalhar peças únicas que unem função e beleza. Acreditamos que estas experiências são uma referência, para futuras pesquisas no campo da impressão pastosa, tanto no meio acadêmico quanto na cultura open source. Este projeto, fruto de uma investigação de graduação, estabelece uma plataforma para experimentações futuras, no processo de construção arquitetônica e civil, impulsionando discussões relevantes, em constante evolução. Os resultados demonstram o potencial desta abordagem, evidenciam a capacidade de integrar tradições de materiais da terra, como argila, com processos contemporâneos de fabricação digital.

Referências

- García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda-Pérez, P. (2021). **Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings**. *Buildings*, 11(6), 254. <https://doi.org/10.3390/buildings11060254>
- Nóbrega, T. F. da, Nóbrega, C. A. da M., & Passaro, Martin, A. (2021). **Experimental Paste Extrusion Mechanism for 3D Printing**. In P. Herrera (Ed.), *Proceedings XXVI SIGraDi - Critical Appropriations - Lima, Peru* (pp. 1163–1176). Editora Blucher / SIGraDi. <https://doi.org/10.5151/sigradi2021-227>
- Passaro, A. M., Henriques, G. C., García-Alvarado, R., & González-Böhme, L. F. (2022). **Premissas para montagem de Unidade de Fabricação Robótica / Requirements to assemble a digital fabrication robotic unit**. In P. C. Herrera (Ed.), *Proceedings XXVI SIGraDi - Critical Appropriations - Lima, Peru* (pp. 409–420). SIGraDi / Blucher. https://doi.org/10.5151/sigradi2022-sigradi2022_98
- Cuevas, D. G., & Pugliese, G. (2020). **Advanced 3D Printing with Grasshopper: Clay and FDM**. Independently published www.amazon.com/Advanced-3D-Printing
- Keep, J., Layer, S., & Height, S. S. Z. (2020). **A Guide to Clay 3D Printing**. *to Clay 3D Printing*, [www.keep-art.co.uk/Journal/JKeep-Guide to Clay 3D Printing - 2020.pdf](http://www.keep-art.co.uk/Journal/JKeep-Guide%20to%20Clay%203D%20Printing%20-%202020.pdf)
- Oxman, N. (2010). **Material-based design computation [Doctoral Thesis Massachusetts Institute of Technology]**. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/59192>