

FORMA DADO E MATÉRIA

A Incorporação de Técnicas de Fotogrametria
e Fabricação Digital a Estratégias de
Documentação Patrimonial e Restauro

Leonardo Edson Amorim

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A544f Amorim, Leonardo Edson.
Forma, Dado e Matéria : A Incorporação de Técnicas de Fotogrametria e Fabricação Digital a Estratégias de Documentação Patrimonial e Restauro / Leonardo Edson Amorim. – 2022.
84 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Arquitetura e Urbanismo, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Me. Carlos Eugênio Moreira de Sousa.
1. Fabricação Digital. 2. Fotogrametria. 3. Patrimônio Cultural Edificado. 4. Restauro. I. Título.

CDD 720

LEONARDO EDSON AMORIM

FORMA, DADO E MATÉRIA:

A INCORPORAÇÃO DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA E FABRICAÇÃO DIGITAL A
ESTRATÉGIAS DE DOCUMENTAÇÃO PATRIMONIAL E RESTAURO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Arquitetura e Urbanismo do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito à obtenção do título de Arquiteto
e Urbanista.

Aprovada em: 17/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Carlos Eugênio Moreira de Sousa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Ribeiro Cardoso (membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Natalie Johanna Groetelaars (convidada)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Jorge, Nicolle Kerman, Joana D'arc, Abilene Silva e Lupin pelo amor e apoio emocional.

Ao Rodinely e Vinícius pela amizade ao longo desse trajeto.

Aos professores Eugênio Moreira e Roberto Vieira pela inspiração e incentivo.

E a Jorge Saraiva e a Universidade Federal do Ceará pelos recursos e infraestrutura.

“É verdade que, se uma reta ao cortar duas outras, forma ângulos internos, no mesmo lado, cuja soma é menor do que dois ângulos retos, então as duas retas, se continuadas, encontrar-se-ão no lado onde estão os ângulos cuja soma é menor do que dois ângulos retos”

-Quinto postulado de Euclides

RESUMO

O paradigma de documentação vigente entre as instituições brasileiras que realizam o processo de salvaguarda do patrimônio cultural edificado atualmente ainda se baseiam, em sua maioria, na construção de um banco de dados composto de ilustrações técnicas geradas a partir de inferências manuais em campo e modelos digitais gerados a partir dessas ilustrações. No entanto, devido a saltos em poder computacional e na democratização da tecnologia, há uma crescente acessibilidade a tecnologias mais recentes, que se mostram eficazes na produção de registros digitais mais detalhados e precisos. Uma vez que o modelo-registro deixa de partir de abstrações bidimensionais da edificação e passa a ser gerado a partir de um processo de reconstrução tridimensional do objeto construído, pode ser obtido um registro mais fidedigno do patrimônio edificado. Esse registro possibilita como subprodutos, potencialidades vantajosas para processos de restauro, educação, e divulgação patrimonial, que muito se valem de registros detalhados e precisos. Este trabalho se empenha na elaboração de um dispositivo de representação para elementos de alta complexidade geométrica presentes no patrimônio cultural edificado, elaborado a partir de modelos digitais gerados a partir de reconstrução fotogramétrica automatizada através de *Dense Stereo Matching*(DSM), com vistas à uma maior acurácia no registro de informações úteis a processos de restauração, permitindo fluxos de transposição de informação que cubram desde a aquisição de dados do modelo até sua rematerialização, através de uma série organizada de processos de inferência, modelagem e fabricação.

Palavras-chave: Fabricação Digital, Fotogrametria, Patrimônio Cultural Edificado, Restauro

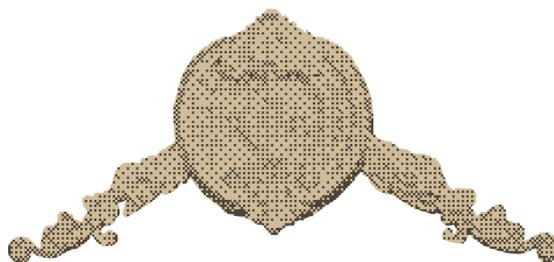
ABSTRACT

The current documentation paradigm among Brazilian institutions that carry out the process of safeguarding built cultural heritage today is still based, for the most part, on the construction of a database composed of technical illustrations generated from manual inferences in the field and digital models. However, due to leaps in computing power and the democratization of technology, there is increasing accessibility to newer technologies, which are proving effective in producing more detailed and accurate digital records. Once the model-record is no longer based on two-dimensional abstractions of the building and is generated from a process of three-dimensional reconstruction of the built object, a more reliable record of the built heritage can be obtained. This record makes possible, as by-products, advantageous potential for restoration, education, and heritage dissemination processes, which make much use of detailed and accurate records. This work is committed to the elaboration of a representation device for elements of high geometric complexity present in the built cultural heritage, elaborated from digital models generated from automated photogrammetric reconstruction through Dense Stereo Matching (DSM), with a view to greater accuracy in recording useful information for restoration processes, allowing information transposition workflows that range from model data acquisition to its rematerialization, through an organized series of inference, modeling and fabrication processes.

Keywords: Digital Fabrication, Photogrammetry, Built Cultural Heritage, Restoration.

SUMÁRIO

Introdução	1
Metodologia	8
O Problema da Documentação	9
Dense Stereo Matching (DSM)	12
Etapas do Processo	17
Ferramentas Utilizadas no Processo de Captura	19
Fabricação Digital	23
Máquinas de CNC	23
Softwares de CAD/CAM	27
Trabalhos Relacionados	29
Técnicas de Captura	29
Técnicas de Fabricação	31
Processos Propostos	34
Testes de Conceito	41
Ornamentos no Contexto Fortaleza/Ceará	41
Experimentos Realizados	47
Retábulo do altar da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário de Russas-CE	47
Postes em Ferro Fundido no Parque da Liberdade	53
Ornamento em Argamassa na Fachada da Farmácia Oswaldo Cruz	58
Considerações Finais	69
Referências Bibliográficas	70



Introdução

O paradigma atual de como se executa documentação patrimonial no Brasil ainda depende majoritariamente de técnicas convencionais de levantamento, onde o foco está na obtenção de desenhos em projeção plana. Estes são realizados manualmente *in loco* (onde as características geométricas são transpostas diretamente para o papel com o auxílio de instrumentos de medição) e posteriormente traduzidas para meio digital, onde ferramentas de desenho auxiliado por computador (*Computer Aided Design*, ou CAD) valem-se de primitivas geométricas como linhas, planos, polígonos etc. Representações desse tipo, embora comuns no âmbito da arquitetura, podem ser pouco eficientes em registrar a complexidade geométrica de alguns elementos constituintes do patrimônio cultural edificado, produzindo registros pouco precisos e pouco detalhados.

Os problemas decorrentes do uso de técnicas tradicionais tornam o processo de documentação moroso, de custo elevado, pouco preciso e muitas vezes inadequado ao registro de formas complexas e/ou de grandes dimensões. É comum haver ambiguidades e inconsistências nos registros dos objetos, uma vez que os desenhos são elaborados individualmente em ferramentas CAD convencionais, sendo necessária uma conferência minuciosa entre eles, de modo a eliminar (ou reduzir) erros de representação (GROETELAARS, 2015, p.30).

Esse paradigma se mostra especialmente problemático quando aplicado à documentação de exemplares arquitetônicos ecléticos ou barrocos, que são carregados com tipos de ornamentos escultóricos, menos cartesianos em sua forma, e não possuem a mesma legibilidade que outros

elementos arquitetônicos ortogonais ou compostos de formas mais regulares quando traduzidos para meios de documentação mais tradicionais.

Em sua origem, pertencem a um contexto histórico onde proliferavam artífices capazes de interpretar sua complexidade geométrica através de desenhos projetivos. Não encontrando rebatimento em elementos arquitetônicos contemporâneos, tais artífices estão cada vez mais raros, o que levanta o questionamento sobre a eficácia dos dispositivos tradicionais de representação para embasar futuras ações de conservação. Para estilos ornamentados, imagens fotográficas, croquis e desenhos técnicos pouco têm a contribuir para processos de repriminção de ornamentos perdidos ou severamente danificados, a menos que hajam outros elementos semelhantes, pelo menos em menor grau de arruinamento, que possam fornecer moldes para reprodução. (NOGUEIRA et al., 2019, p.4)



Figura 1: À esquerda, ornamento presente na fachada da Antiga Residência do Engenheiro-Mor da Ferrovia, em Fortaleza-CE. À direita, trecho do levantamento realizado pelo IPHAN que mostra a documentação produzida para tal elemento (Acervo LED-UFC).

A importância da documentação e conservação do patrimônio cultural foi ratificada no documento *PRINCIPLES FOR THE RECORDING OF MONUMENTS, GROUPS OF BUILDINGS AND SITES* (1996) pelo Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) na assembléia geral em Sofia no mesmo ano, onde em uma das deliberações o conselho aprofunda em relação à natureza dessa documentação, especificando dentre outros parâmetros, a preferência por métodos que sejam os mais precisos e menos intrusivos possíveis.

Foi observado que o paradigma BIM (Building Information Modelling) tem evoluído ao longo dos anos no sentido de agregar dados construtivos à representação do modelo do objeto edificado que extrapolam a representação estritamente gráfica da edificação, podendo-se atrelar ao modelo dados de natureza quantitativa e formal que auxiliam em uma compreensão mais abrangente do objeto construído representado, apresentando-se como ferramental viável e método vantajoso para processos de documentação patrimonial.

O fomento pela adoção do paradigma BIM enquanto estrutura de modelagem, documentação e projeto há algum tempo não conta apenas com a voz de entusiastas do ferramental e escritórios experimentais, tendo sua disseminação como ferramenta padrão instituída por entidades de Estado, como pode ser observado no decreto nº 9.377, promulgado em 17 de maio de 2018, onde se lê:

Art. 1º Fica instituída a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil - Estratégia BIM BR, com a finalidade de promover um ambiente adequado ao investimento em Building Information Modelling - BIM e sua difusão no País.

Parágrafo único. Para os fins do disposto neste Decreto, entende-se o BIM, ou Modelagem da Informação da Construção, como o conjunto de tecnologias e processos integrados que permite a criação, a utilização e a atualização de modelos digitais de uma construção, de modo colaborativo, de forma a servir a todos os participantes do

empreendimento, potencialmente durante todo o ciclo de vida da construção.

A produção de modelos dentro do paradigma BIM no entanto, carrega uma questão importante relacionada à forma como esta produção é realizada, utilizam-se as formas e as dimensões dos objetos (geralmente obtidas através de medição direta) representadas em plantas, cortes e elevações, como referência para a modelagem paramétrica dos elementos construtivos (GROETELAARS, 2015). Ainda que essa forma de tradução de informação apresente suas próprias desvantagens, mantém-se a dificuldade de representação de objetos com forma curva e irregular. Pode-se especular que desde o relegar da adoção de ornamentos de natureza escultórica acentuado pelo movimento moderno da arquitetura e a decrescente presença dos mesmos nas edificações, não há demanda substancial por ferramental padrão que facilite a representação desses elementos, mesmo em softwares BIM.

No âmbito da História da Arte o ornamento é, frequentemente, estudado sob um ponto de vista estilístico, na busca de datações e procedências. As teorias do ornamento mais tradicionais, que surgiram por volta de 1850 a 1950, influenciam até hoje a produção acadêmica e mesmo o senso comum. As restrições modernistas ao ornamento foram muitas vezes lidas e citadas fora de seus contextos. Como verdadeiras fórmulas antiornamentais conferiram ao ornamento um caráter complementar, como se em sua retirada seu suporte não viesse a sofrer nenhum tipo de prejuízo senão estético e formal. Não apenas o ornamento foi reduzido ao aspecto decorativo, mas os próprios debates deste período, que envolviam além dos historiadores da arte, artesãos, críticos, teóricos, designers e arquitetos, sofreram restrições a sua riqueza teórica. Reduzidos a famosas fórmula antiornamentais, como "o ornamento é crime", de Adolf Loos, "é preciso parar de ornamentar" de Louis Sullivan, tais afirmativas esvaziaram-se de seus contextos de origem e sintetizaram toda a produção teórica daquele momento a uma negação ao

uso do ornamento. foi-lhes retirada a influência da produção industrial, em que o ornamento já não tinha lugar em comparação às utilidades do objeto (PEDRONI, 2013, p.80).

Observada a dificuldade da representação de ornamentos num contexto onde artífices qualificados estão cada vez menos presentes e onde se percebe o rápido desenvolvimento de técnicas de representação em ambiente digital, o trabalho busca entender técnicas de produção de representações de elementos de alta complexidade geométrica presentes em edificações de interesse cultural (notadamente ornamentos) que sejam acessíveis e tenham potencial de integração com plataformas de representação contemporâneas, como ferramentas que operam sob o paradigma BIM.

Uma vez que a documentação atua como estratégia de salvaguarda do patrimônio cultural, dentre outras coisas, porque pode subsidiar a reconstrução de elementos deteriorados, a partir do produto deste primeiro inquérito, busca-se também explorar as possibilidades de materialização das representações obtidas, observando sua afinidade com processos de fabricação digital e avaliando seu uso potencial em processos de restauro.

A aquisição de dados geométricos precisos de elementos construídos é uma tarefa que se mostra de suma importância na indústria da construção civil, subsidiando desde a elaboração de projetos de reformas até o acompanhamento da obra em "tempo real". A utilização de equipamentos de *laser scanner* de alta definição tem se mostrado cada vez mais presente em fluxos de operação BIM, onde as nuvens de pontos podem ser comparadas com os modelos de projeto, permitindo um gerenciamento mais eficiente. O tipo de dado obtido pela varredura desses equipamentos mostra-se excelente para o enfrentamento do gênero de problemática colocada pelo presente trabalho. No entanto, uma vez que o processo baseia-se no uso de um equipamento especializado que pode custar de dezenas a centenas de milhares de reais, processos baseados nesse tipo de tecnologia podem se tornar inviáveis para amplo uso. Desse modo, optou-se pela exploração de técnicas alternativas que se beneficiam dos amplos e frequentes avanços em poder

computacional e processamento de imagens. Nesse ponto, busca-se a utilização de técnicas de Fotogrametria Digital, que permitem a tradução de objetos físicos para modelos tridimensionais através da interpretação de fotos e diferentes sistemas de varredura. Hoje essas técnicas estão disponíveis em vários formatos, desde programas gratuitos de código aberto a serviços online de pay per input (PPI), tornando os requisitos mínimos para uso apenas um celular com câmera fotográfica e acesso à internet.

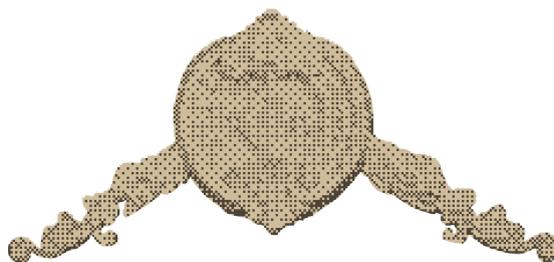
Já no que concerne ao campo da materialização, máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) permitem a fabricação de peças físicas a partir de modelos digitais utilizando processos aditivos ou subtrativos e diferentes tipos de insumos materiais. A grande disponibilidade de diagramas e projetos de código aberto de máquinas de CNC, aliados à ampla disponibilidade de componentes eletrônicos não proprietários, têm reduzido as barreiras de acesso a essas tecnologias.

Observadas as possibilidades não incorporadas destas tecnologias e a problemática presente na forma corrente de documentação patrimonial, este trabalho se empenha na elaboração de um dispositivo de representação para elementos de alta complexidade geométrica presentes no patrimônio cultural edificado, elaborado a partir de modelos digitais, com vistas à uma maior acurácia no registro de informações úteis a processos de restauração, permitindo fluxos de transposição de informação que cubram desde a aquisição de dados do modelo até sua rematerialização, através de uma série organizada de processos de inferência, modelagem e fabricação.

Com a elaboração do dispositivo pretendido, busca-se responder às problemáticas elencadas nesta introdução, e explorar conceitualmente as possibilidades que um modelo de documentação dessa natureza permite, idealmente produzindo uma alternativa funcional à documentação de patrimônio.

Para levar a cabo o objetivo geral deste trabalho, foram elaboradas etapas de desenvolvimento necessárias para assegurar uma compreensão ampla da problemática abordada, das ferramentas disponíveis para respondê-la e seus respectivos funcionamentos:

- apreensão do problema identificado no paradigma atual de documentação patrimonial.
- Estudo prospectivo de técnicas de levantamento para a obtenção de modelos a partir de “nuvens de pontos”.
- Explorar possibilidades de materialização utilizando técnicas de fabricação digital a partir dos modelos gerados;
- Incorporar processo de fabricação desenvolvidos como processos complementares às técnicas de fabricação convencionais.
- Execução de modelos para validação do conceito;
- Avaliação de resultados obtidos.

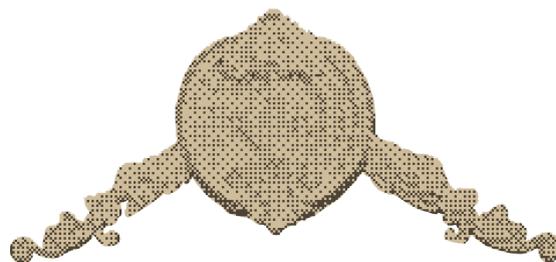


Metodologia

O método de desenvolvimento deste trabalho é dividido em duas etapas. Uma primeira etapa de análise e planejamento, parte da identificação do problema no paradigma vigente de documentação do patrimônio edificado, onde busca-se compreender e solucionar esse problema, expresso na dificuldade da transposição de informação geométrica nos processos de registro. O trabalho parte da hipótese de que processos disponíveis de captura fotogramétrica e fabricação digital podem ser incorporados a outros processos existentes já utilizados para explorar as potencialidades dessas técnicas em processos de documentação patrimonial e restauro.

Com uma compreensão razoável das problemáticas, ferramentas e processos, busca-se o desenvolvimento de fluxos organizados de trabalho, nos quais possa-se classificar uma série de processos que operacionalizam a produção de modelos e protótipos de acordo com a materialidade do ornamento.

A segunda etapa busca validar as proposições de fluxos de trabalho levantados na primeira, observando a viabilidade da aplicação desses modelos no contexto local, produzindo uma série de protótipos em diferentes materialidades para avaliar diferentes técnicas de fabricação, observar dificuldades e potencialidades dos processos e registrar os resultados.



O Problema da Documentação

Cada elemento do patrimônio cultural edificado pode ser considerado como um arquivo, um contêiner de informações, de várias dimensões, relevantes para a história de formação de um determinado grupo social. Conservar o patrimônio passa pela tarefa de conservar essas informações, tornando de suma importância os trabalhos de documentação. Podemos, então, encarar os procedimentos de documentação como ações de codificação dessas informações em outros suportes (NOGUEIRA, 2019), sejam eles também materiais ou virtuais. A dimensão histórica e social pode ser armazenada através de textos, fotografias, desenhos, vídeos etc., ao passo que a dimensão física, tátil, costuma se valer, em grande parte, dos códigos do desenho arquitetônico.

A documentação como estratégia de conservação cumpre uma dupla função. Por um lado, serve ao propósito de reprodução visual do objeto registrado (ainda que parcialmente), o que pode ser útil tanto em ações de educação patrimonial quanto em casos de desaparecimento, sendo, neste caso, uma forma de preservação da memória (OLIVEIRA, 2008), uma possibilidade de transmissão de conhecimento a outras gerações e povos. De outro modo, cumpre função mitigadora perante o risco de degradação do suporte material original, seja pela ação do tempo, por anomalias ambientais ou ações antrópicas. Atua, ainda, como suporte a projetos de intervenção. Qualquer supressão ou desaparecimento de elementos deve poder ser por ela resolvida, tornando possível ações de restauro e reconstrução sem que se faça necessário recorrer a qualquer formulação de hipóteses, conforme recomendações dos organismos internacionais de proteção ao patrimônio (ICOMOS, 1964). É ferramenta fundamental em ações de gestão e planejamento de obras de conservação, permitindo o embasamento de tomadas de decisão, definição de prioridades e guiando, inclusive, o gerenciamento de recursos financeiros (NOGUEIRA, 2010).

De fato, se observarmos os procedimentos de salvaguarda adotados pelos órgãos de proteção ao patrimônio cultural edificado no Brasil, seja a nível federal, estadual ou municipal, perceberemos

que tais práticas de documentação são adotadas. Os processos de tombamento exigem a elaboração de documentos detalhados que cataloguem esse conjunto de informações impregnadas na edificação, incluindo a produção de um levantamento arquitetônico.

A importância dessa espécie de cadastro é amplamente discutida manuais técnicos do IPHAN, como podemos ver em Oliveira (2008). Muito embora seja possível perceber uma preocupação em investigar técnicas mais modernas de aquisição de dados, como a fotogrametria, o 3D laser scanning e o sensoriamento remoto, o mesmo é feito de maneira introdutória. Grande parte do detalhamento de procedimentos do caderno técnico está dedicada a processos cadastrais com equipamentos tradicionais – como pranchetas, lapiseiras, trenas, níveis, prumos e, no máximo, estações totais – bem como fotografia documental. Alie-se a isso o fato de que é por vezes muito burocrática a incorporação de inovações tecnológicas por parte das instituições públicas (uma vez que demanda atualização de pessoal, maquinário e sistemas) e temos um ambiente onde proliferam as documentações baseadas em vistas ortogonais obtidas por medição direta.

Ao passo que as fotografias, croquis e vistas projetivas dão conta da documentação de estilos mais austeros, como é o caso de algumas edificações coloniais e de exemplares da arquitetura moderna, o mesmo não pode ser dito dos estilos ornamentados, dentre os quais podemos destacar o ecletismo. Possuidor de elementos de alta complexidade geométrica – os ornamentos –, o ecletismo compõe parte significativa do acervo cultural das grandes cidades brasileiras. Em Fortaleza, o estilo é característico de um período de profundas reformas econômicas e sociais conhecido como Belle Époque (PONTE, 2014), onde se enquadram boa parte dos edifícios de valor patrimonial da cidade.

Uma alternativa que se apresenta está na utilização de plataformas BIM, sendo possível uma documentação arquitetônica mais completa e consistente (GROETELAARS, 2015). A representação desenvolvida em plataforma BIM oferece um banco de dados incorporado a um modelo tridimensional, permitindo a gestão de informações de maneira centralizada e colaborativa, automatizando a produção de peças gráficas, geração de relatórios e simulações. Uma extensão do conceito, o HBIM (Historic Building Information Modeling), contempla a possibilidade de incorporação de uma nuvem de pontos obtida por escaneamento como uma referência para o modelo de informação, combinando os dados a modelos paramétricos. Aqui, o conceito de LOD (Level of Development) é muito importante, sendo possível a proposição de modelos desde o LOD

100 – onde se vale de representações simbólicas não-geométricas – até o LOD 400 – onde há a representação geométrica precisa e detalhada visando a fabricação (TOLENTINO, 2016).

Muito embora seja possível a criação desse tipo de modelo, no contexto local enfrentam-se dois problemas. Por um lado, ainda se batalha pela transição dos sistemas CAD tradicionais para plataformas BIM, havendo muitos dos levantamentos mais atuais tendo sido produzidos ainda a partir de desenhos, embora já em formato digital. O processo encontra-se alavancado, sobretudo, com a inserção de disciplinas BIM no currículo dos cursos de Arquitetura e Urbanismo. Neste sentido, aponta-se para o pioneirismo do LED (Laboratório de Experiência Digital) da UFC, que desde 2009 enseja as discussões sobre concepção, desenvolvimento e materialização no âmbito digital. Por outro lado, seja pela costumeira vinculação desses processos a equipamentos onerosos, seja pela falta de capacitação dos corpos técnicos dos órgãos de proteção ao patrimônio no que tange aos processos de fotogrametria, ainda encontra-se incipiente a experiência no campo da aquisição de dados geométricos complexos e sua interface com modelos de informação. Neste sentido, este trabalho irá se concentrar principalmente em explorar as técnicas de fotogrametria pela técnica conhecida por Dense Stereo Matching (DSM), onde a produção de modelos geométricos passa pelo processamento de imagens simples, que podem ser tomadas a partir de dispositivos usuais como câmeras fotográficas ou celulares.

No contexto da documentação patrimonial, onde a replicabilidade física do objeto a partir do registro é um fator relevante, quando tecnologias de reconstrução a partir de “nuvens de pontos” produzem modelos tridimensionais relativamente precisos em relação ao objeto original, se mostra imediatamente evidente a complementaridade e relevância de processos de fabricação digital nesse fluxo de trabalho, visto que os mesmos tem como requisito de funcionamento estes mesmos modelos tridimensionais.

Dense Stereo Matching (DSM)

Baseado em experimentos e considerações sobre as possibilidades de aplicação de novas tecnologias digitais na representação do patrimônio arquitetônico edificado levantadas por Groetelaars, Tolentino, Linhares e Amorim, em produções do Laboratório de Estudos Avançados em Cidade, Arquitetura e tecnologias Digitais da Universidade Federal da Bahia (LCAD-UFBA), pode-se observar uma variedade de ferramentas e processos cujas respectivas integrações apontam para a possibilidade de fluxos de trabalho que permitam a operacionalização de um novo processo de documentação de patrimônio cujos produtos finais sejam registros digitais com maior nível de detalhe e um nível de separação menor a respeito da sua relação enquanto abstração gráfica do objeto construído.

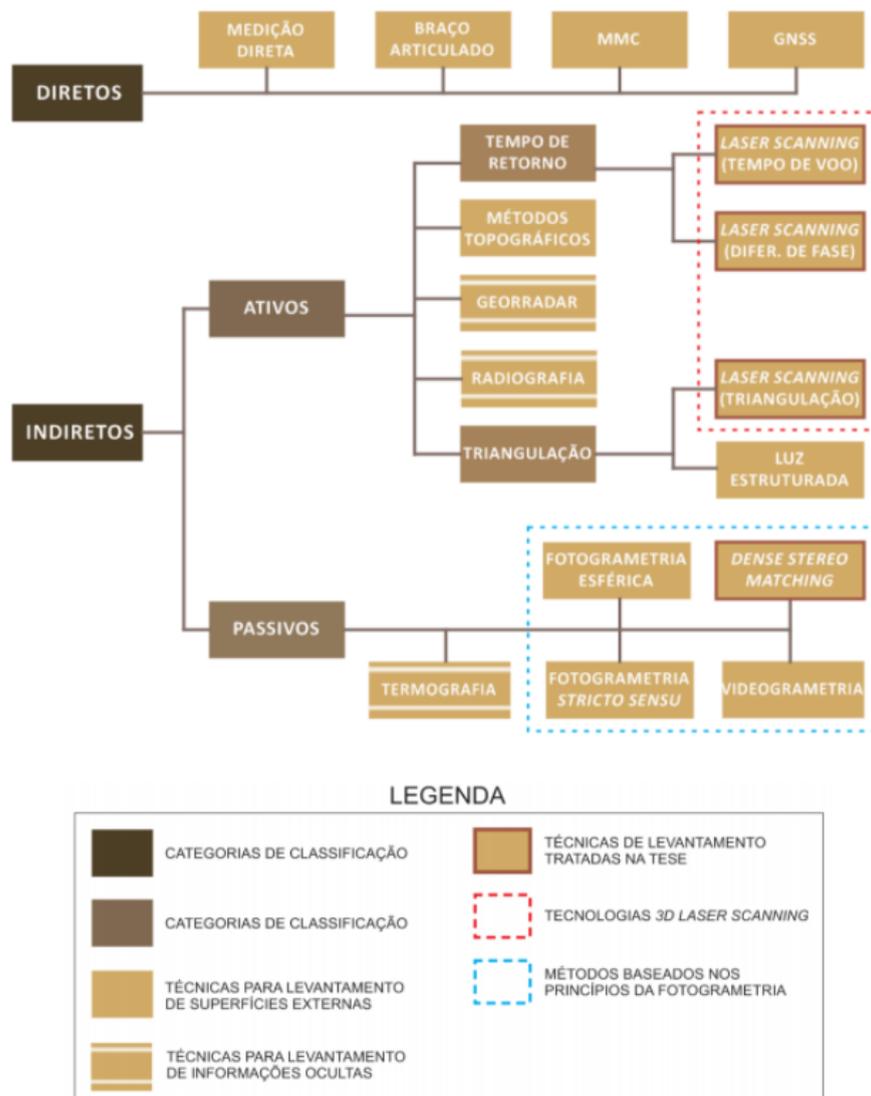


Figura 2: Classificação das principais técnicas de levantamento. Fonte: Groetelaars (2015, p.61).

Esta maior fidelidade é posta como um aspecto que aponta não apenas para a reprodução gráfica de dimensões e proporcionalidades do objeto, mas para minúcias e aspectos da edificação que não são capazes de serem reproduzidas através de meios de reconstituição a partir de desenhos técnicos. Muito além do registro facilitado de objetos não-ortogonais, é possível a identificação da materialidade e até patologias da edificação com base no modelo gerado.

Após a análise e apreensão geral do estado da arte dos métodos disponíveis para a aquisição de dados para documentação, optou-se pela reconstrução fotogramétrica através de DSM como o método de captura a ser utilizado no recorte deste trabalho, dada a precisão de seus resultados em reproduzir o objeto da captura, e sua acessibilidade e baixo custo em relação aos demais, visto que é um método que não necessita de equipamentos e recursos específicos. Sendo possível, no cenário mais escasso, realizar uma reconstrução apenas com uma câmera fotográfica e acesso à internet, através de serviços de fotogrametria com processamento na nuvem, normalmente sendo cobrada uma pequena taxa por vez de uso.

Dense Stereo Matching (DSM) Trata-se da reconstrução fotogramétrica de um objeto através da correlação automática de conjuntos de pixels homólogos em diferentes fotos. Fotos em diferentes perspectivas do mesmo objeto permitem que o algoritmo de processamento comparativo espacialize os pixels correlatos num espaço tridimensional para a geração de uma “nuvem de pontos”.

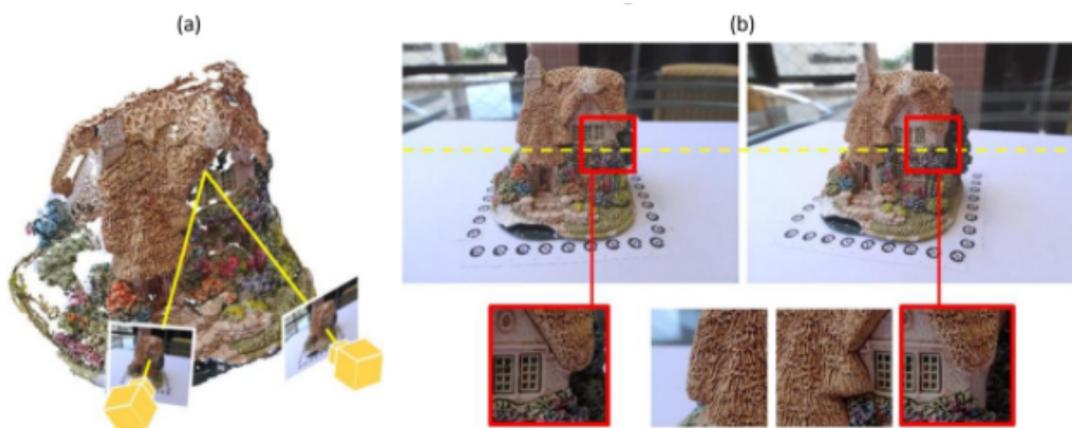


Figura 3: Princípio de funcionamento do DSM: (a) fotografias tomadas de diferentes ângulos para a geração de "nuvens de pontos"; (b) processo de associação de pequenas áreas visando a correlação de pixels nas diferentes fotografias. Fonte: Groetelaars (2015, p.72).

A captura fotográfica do objeto é a parte mais crítica do processo, uma vez que a correlação adequada de características do objeto capturado depende de uma série de critérios que afetam diretamente a qualidade da reconstrução.

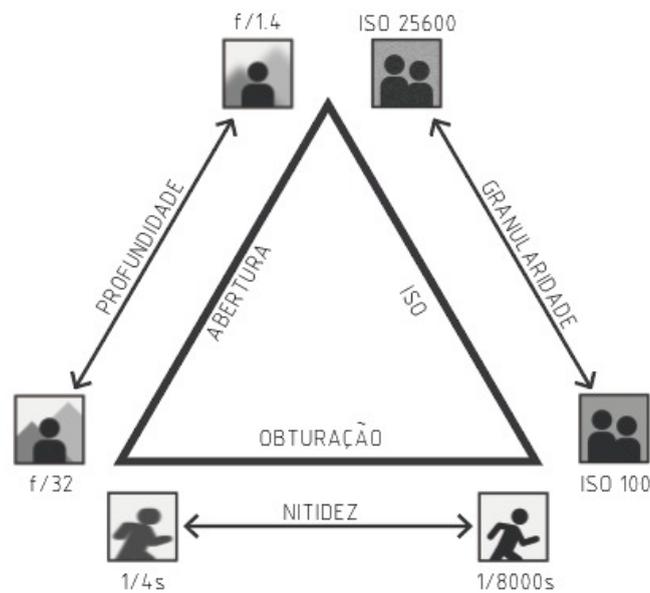


Figura 4: Triângulo de exposição. O objetivo é obter imagens nítidas e sem borrões do objeto, logo é recomendado o uso da câmera com tripés ou velocidade de obturador rápida, reduzir a abertura para aumentar a profundidade de campo da captura, e reduzir o ISO para minimizar o ruído de imagem. Fonte: elaborado pelo autor.

A documentação técnica do software Meshroom (2020, tradução livre) descreve as práticas ótimas de captura como:

- A cena/objeto deve estar bem iluminada(o).
- Evitar sombras, reflexos e objetos transparentes.
- A captura é melhor quando feita sob iluminação indireta como a da sombra diurna de uma edificação, deve-se evitar superfícies planas e monocromáticas.
- Não usar Flash.
- Não alterar a distância focal durante a captura, ou utilizar uma lente fixa.
- Certificar-se de fotografar de todos os ângulos.

- Rotacionar apenas objetos que possuam plano de fundo uniforme.
- O objeto de interesse deve sempre preencher a maioria da imagem.
- As capturas devem possuir uma sobreposição lateral mínima de 60% e frontal de 80%.
- Para cada captura, deve-se deslocar para uma nova posição (ou rotacionar o objeto).
- Não realizar múltiplas capturas do mesmo ponto.
- Pode-se fotografar várias vezes seguindo diferentes padrões para evitar deixar pontos cegos.
- Evitar capturas tremidas.
- Quanto mais imagens capturadas melhor, podendo não serem utilizadas caso julgado necessário.

Segundo Groetelaars (2015) O processo de geração de "nuvens de pontos" com a técnica DSM pode ser dividido em 5 principais etapas: (1) inserção das fotos; (2) correlação automática das fotografias; (3) reconstrução da geometria preliminar do objeto e da câmera; (4) associação densa de pixels homólogos; (5) criação do modelo geométrico na forma de "nuvem de pontos" e a malha TIN (do inglês *Triangulated Irregular Network*, é uma malha de triângulos não retificada gerada a partir da associação dos vértices gerados pela nuvem de pontos, podendo ser texturizada ou não).

Esse processo pode ser realizado por uma série de ferramentas, necessitando apenas das capturas fotográficas como material de input. Essas ferramentas podem ser tanto softwares comerciais quanto *open-source* (programas de código aberto de natureza gratuita e compartilhada), além da disponibilidade crescente de serviços de *cloud processing*, onde as fotografias são processadas em um servidor remoto, normalmente com uma taxa por uso e com menos controle do usuário em relação ao resultado final.

Cada um desses softwares difere em alguns aspectos de funcionamento, indo desde a operação de sua interface até a morfologia do algoritmo de reconstrução, o que implica em resultados finais diferentes para cada software apesar do input fornecido ser o mesmo em maioria dos casos. No objetivo de traçar um fluxo de trabalho funcional para a documentação de patrimônio cultural

edificado, este trabalho se propõe a estabelecer um comparativo entre alguns dos softwares de fotogrametria mais acessíveis e oferecer opções viáveis para a operacionalização deste processo.

Etapas do Processo

Após análise de referências e testes preliminares, chegou-se à síntese de um fluxo de processos a servir de modelo para a produção de reconstruções fotogramétricas no escopo do trabalho. Por conveniência, ele pode ser separado em três etapas principais com base nas ferramentas usadas:

- 1. Captura fotográfica em campo:** Eleito o objeto a ser registrado, é feita uma série de capturas seguindo o perímetro do objeto arquitetônico, cobrindo toda a superfície a ser levantada. Para tanto, nesta etapa faz-se necessário observar algumas recomendações, como a manutenção de uma boa área de recobrimento entre as imagens (entre 50-80%), captura em diferentes níveis (órbitas ao redor do objeto com diferentes alturas, com um ângulo entre 10 e 15° entre capturas), cuidado com condições de iluminação para evitar contrastes excessivos de sombra (áreas muito escuras podem gerar *digital artifacts* ou áreas sem informação no processamento automático) e configurações manuais de abertura, velocidade do obturador e ISO (o que impede que o ajuste automático crie diferenças de cor e brilho entre imagens da mesma área).

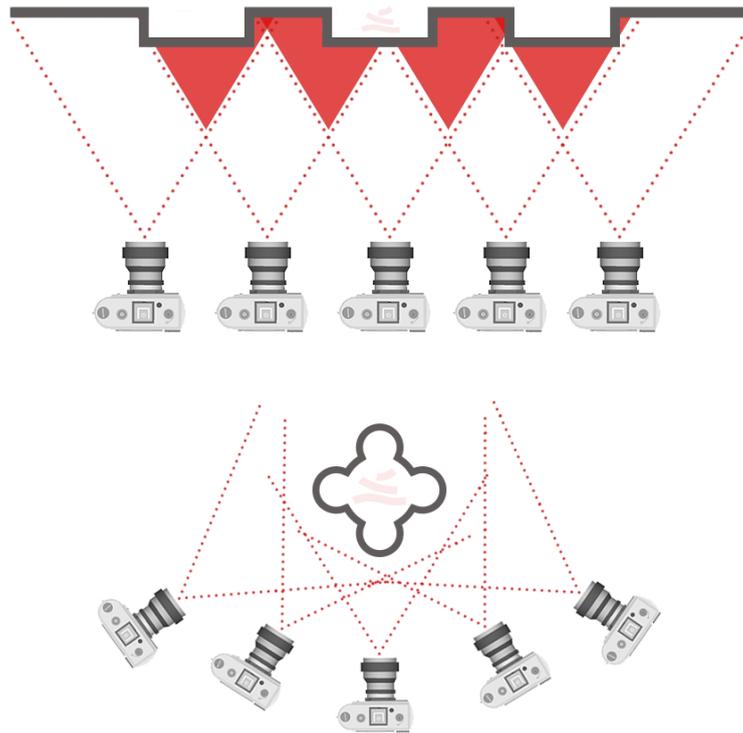


Figura 5: técnica ideal para captura fotográfica paralela (superior) e orbital (inferior) do objeto (Fonte, 2022).

2. **Processamento automático de imagens:** Nesta etapa é feita a reconstrução digital do modelo a partir das fotografias capturadas. O software faz uma reconstrução automatizada das posições onde foram feitas as capturas e a subsequente associação de *pixels* homólogos pelo processo de *DSM* supracitado e geração da “nuvem de pontos”. A **malha TIN** é triangulada a partir da “nuvem de pontos” gerada e texturizada a partir das fotos que foram fornecidas como *input*. A totalidade da etapa é longa, podendo tomar de algumas horas a alguns dias dependendo de uma série de variáveis como particularidades do software usado, número de fotos utilizadas, e poder computacional disponível. Compreende as etapas de geração de “geração de nuvens de pontos” descritas por Groetelaars (2015) citadas anteriormente.

3. **Retopologia:** Esta é uma das etapas menos automatizadas do processo, com algumas intervenções diretas no modelo gerado fazendo-se necessárias, requerendo assim, boa compreensão geométrica do modelo por parte de seu editor. No entanto é uma etapa de suma importância para a produção de um modelo final funcional e compreensivo. A malha

3D produzida pela reconstrução, ainda que seja um importante registro de captura, possui uma grande contagem de polígonos e uma série de imperfeições de topologia que podem ser identificados como erros do processo de reconstrução, tornando o modelo gerado inicialmente pouco adequado para seus fins designados. O processo de **redução de polígonos** e **limpeza do modelo** atuam no sentido de fazer uma redução proporcional da geometria sem que se percam detalhes importantes e características particulares do edifício. Esse processo gera um modelo visualmente similar mas com um custo de processamento consideravelmente menor, facilitando a intervenção no modelo. Apesar de destes processos garantirem um modelo leve, funcional e visualmente verossímil, sua malha ainda é o que pode se considerar uma “colcha de retalhos digital”, por ser produto de várias associações locais de pixels subsequentes, e não de considerações formais sobre a morfologia do elemento capturado. A **retopologia**, apesar de estar caminhando em direção a soluções automatizadas se valendo de *machine learning*, ainda é um processo longo e majoritariamente “artesanal”, que se vale da interpretação e habilidades de modelagem do editor para traduzir a geometria original para uma malha organizada que possa ser operada com mais facilidade, com ênfase na importância de uma geometria do objeto retopologizado racional e verossímil.

Este fluxo, no entanto, é sujeito a mudanças por conta das particularidades dos softwares que são elencados para cada etapa de desenvolvimento. Alguns softwares de fotogrametria permitem executar operações formais no modelo antes que ele seja exportado para softwares de modelagem. Em outros casos, existem processos incrementais que podem ser adicionados ao fluxo de trabalho, no caso de necessidades de registro mais específicas.

Ferramentas Utilizadas no Processo de Captura

As ferramentas elencadas para cada etapa foram as seguintes:

1. Captura fotográfica em campo

- a. **Câmeras de Superzoom:** Essas câmeras possuem controle manual preciso de configurações ISO, abertura e foco, além de oferecerem zoom potente, facilitando a captura de detalhes elevados ou distantes.
- b. **Drone com Câmera:** Drones profissionais com câmeras estabilizadas facilitam a captura em alta qualidade de elementos em alturas muito elevadas. E em maior escala, permitem a produção de ensaios de fotogrametria aérea e produção de ortofotos.
- c. **Câmeras de smartphone de alta resolução:** Apesar da qualidade fotográfica ser inferior à de câmeras mais avançadas, esta é a opção mais facilmente disponível. Somado a isso, existem um número de aplicações de fotogrametria por DSM para celular, que apesar de não produzirem resultados consistentes e de alta qualidade, portabilizam significativamente o processo.

2. Processamento automático de Imagens

- a. **Meshroom:** É um programa gratuito de código aberto, sua interface conta com um sistema baseado em nódulos que permite a configuração de como serão encadeadas as etapas do processo, configuração incremental de rotinas adicionais ao processo de reconstrução e refinamento e controle dos parâmetros de cada etapa.

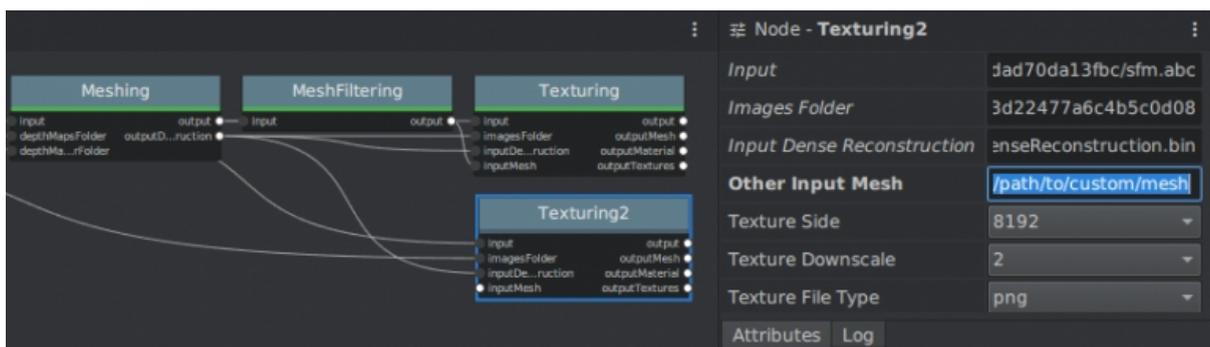


Figura 6: Interface de edição de nódulos e parâmetros do Meshroom. Fonte: Acervo do autor.

- b. **3DF Zephyr:** É uma solução comercial de fotogrametria, no entanto possui uma versão de avaliação com recursos limitados, mas suficientes para a realização dos testes propostos. sua operação é mais simplificada em relação ao Meshroom, o

que facilita a configuração inicial dos processos a troco de um controle menor das minúcias do processo de reconstrução.



Figura 7: Interface 3DF Zephyr. Fonte: Acervo do autor.

- c. Reality Capture: Solução comercial de fotogrametria, possui tanto uma versão de licença perpétua quanto *PPI*, além de uma versão educacional. É o produto mais bem estabelecido entre os citados, e possui um número maior de ferramentas para a manipulação de malhas e "nuvens de pontos", que permite além de outros processos, alinhar dois ensaios de captura diferentes de um mesmo objeto para complementar a reconstrução do modelo. Seu sistema de operação mantém registros do modelo gerado a cada operação na geometria, facilitando o estabelecimento de comparativos.

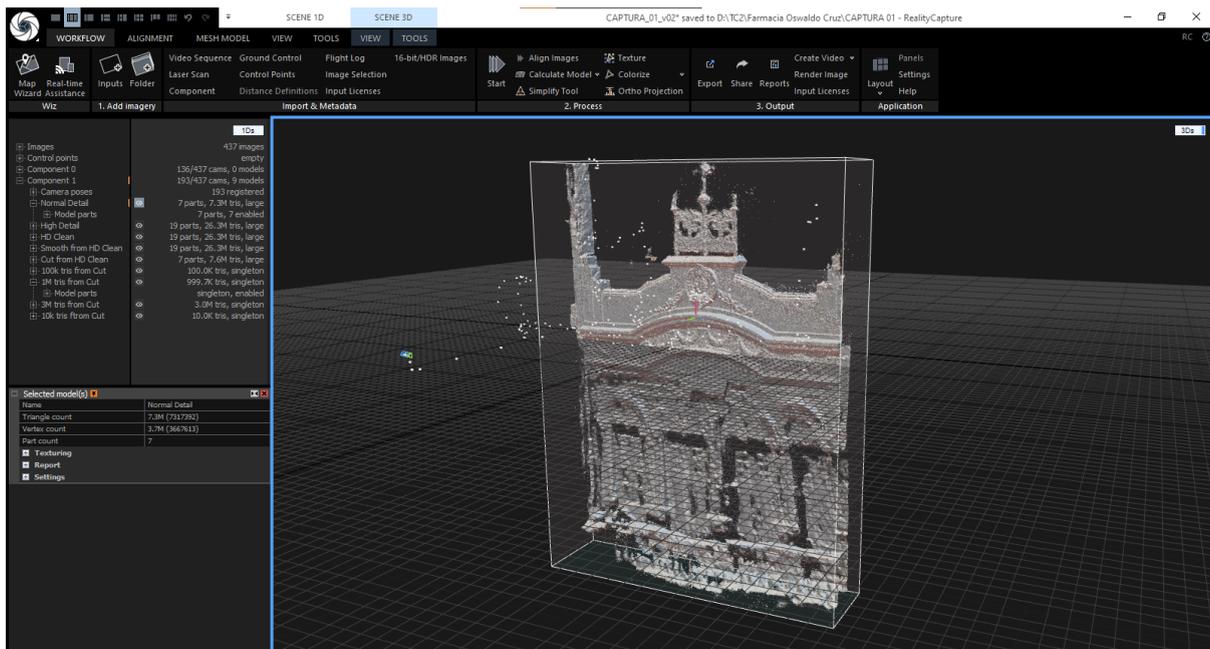


Figura 8: Interface Reality Capture. Fonte: Acervo do autor.

- d. Autodesk Recap: Pensou-se relevante para o trabalho testar um serviço de processamento fotogramétrico na nuvem, mesmo não servindo sozinho como amostragem para uma avaliação abrangente do método, este pode ao menos informar algumas das particularidades deste tipo de processo. O Recap em particular é a solução disponibilizada pela Autodesk, que recentemente vem ampliando muito o uso de armazenamento e processamento usando a nuvem em seus serviços. Sua versão de testes limita o número de imagens que podem ser incluídas no ensaio para um máximo de cento e cinquenta, e não permite nenhuma configuração do processo, que se limita ao upload das fotos e o retorno dos resultados de processamento.

3. Retopologia

- a. Blender: É um software de código aberto extremamente versátil, orientado não apenas para modelagem, mas também animação, texturização, composição, renderização, e edição de vídeo. Com suas atualizações mais recentes, popularização e adoção mais ampla por profissionais do mercado que lidam com

3D, Blender tem cada vez mais mostrado resultados finais em par com soluções pagas, em particular para os objetivos deste trabalho.

- b. MeshLab: Outra solução gratuita de código aberto, o MeshLab é orientado especialmente para o gerenciamento e processamento de grandes malhas não-estruturadas, precisamente o produto das reconstruções tridimensionais que são produto primário deste trabalho. Ele possui uma série de ferramentas para edição, limpeza, inspeção e reparo de malhas poligonais grandes.
- c. Zbrush: Solução comercial de escultura digital, atualmente é um dos padrões da indústria, apesar da sua interface de difícil uso. Adicionalmente, possui ferramentas convenientes para a retopologia e edição de malhas.

Quanto ao equipamento disponível para a realização dos estudos, foram utilizados:

- Uma câmera fotográfica da marca Canon, modelo PowerShot SX60 HS de 16.1 megapixels;
- Um drone da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro, equipado com uma câmera de 20 megapixels capaz de gravar vídeos 4k de resolução a 60 frames por segundo;
- Computadores equipados com placas gráficas dedicadas, necessárias para o processamento das imagens.

Fabricação Digital

Máquinas de CNC

Máquinas de CNC são ferramentas caracterizadas pela capacidade de serem controladas pela interpretação direta de instruções transmitidas através de linhas de código alfanumérico (uma linguagem de programação conhecida como Código-G, ou *G-code*).

O *G-code* em si, é gerado por softwares de CAD/CAM (Abreviatura inglesa significando a integração entre 'Desenho Assistido por Computador' e 'Manufatura Assistida por Computador')

respectivamente), estes são capazes de reinterpretar modelos 3D através de uma série de processos, traduzir a forma do objeto para uma série de coordenadas informadas pelo seu contorno, e organizar essas informações numa série de instruções a serem seguidas pela máquina em questão. A máquina processa e interpreta as instruções do G-code, que são executadas pelos diferentes componentes associados à máquina. Fresadoras e impressoras 3D cartesianas convencionais, por exemplo, funcionam utilizando motores de passo que deslocam o cabeçote do equipamento pelo volume útil de fabricação, que por sua vez é orientado num espaço cartesiano, onde cada jogo de motor de passo é encarregado do deslocamento em um eixo. A placa controladora do equipamento recebe a instrução listada no G-code, envia o sinal correspondente para o motor de passo, e ele desloca a ferramenta de acordo através dum jogo de polias ou trilhos. Outros componentes desses equipamentos, como brocas, resistores, ventoinhas e afins, funcionam da mesma forma, recebendo tipos diferentes de instruções.

No processo deste trabalho, foram foram consideradas:

1. **Fresadora:** A fresadora é uma máquina de **manufatura subtrativa**, onde se parte de um volume de matéria prima e durante o processo há uma gradual remoção de material. Ela utiliza uma fresa fixa a um eixo rotativo, que lentamente desbasta material fixo à mesa de trabalho. Materiais mais comumente utilizados como matéria prima em fresadoras são: placas de madeira, aglomerados como MDF, OSB e poliestirenos.



Figura 9: Fresadora modelo Duplotech CNC Router 1325, utilizada na produção dos modelos usinados deste trabalho. Fonte: Acervo do autor.

2. **Impressoras 3D:** estas por outro lado são ferramentas de **manufatura aditiva**, que trabalham com a deposição gradual de material. Elas utilizam diferentes tipos de materiais como insumo, e o tipo de insumo normalmente é o fator que determina o sistema de funcionamento de cada impressora. No processo deste trabalho foram utilizadas impressoras de tipo FFF e DLP.

a. **Fused Filament Fabrication (FFF):** Conhecido mais popularmente pelo seu acrônimo comercial **FDM**(*Fused Deposition Modelling*), é o método mais acessível

de impressão 3D, que recebe filamentos de diferentes tipos de polímeros como insumo. estes são lentamente extrudados por um bico aquecido que funde o filamento e o deposita construindo uma série camadas sobrepostas à base de fabricação, para construir o contorno do objeto.

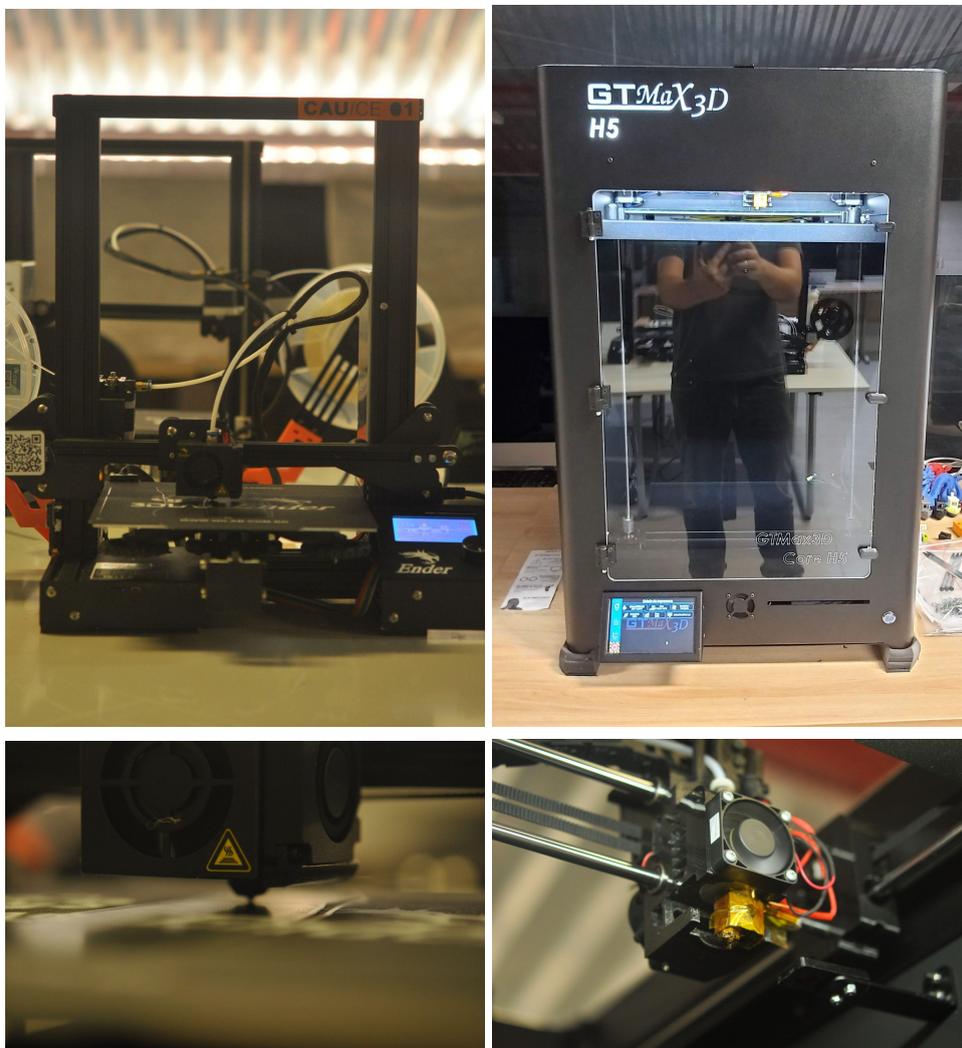


Figura 10: Impressoras 3D de FFF, modelos: Creality Ender 3 (esquerda) e GTMax 3D H5 (Direita), utilizadas na produção dos modelos impressos deste trabalho. Fonte: Acervo do autor.

b. Digital Light Processing (DLP): Utiliza resinas fotopolimerizáveis como matéria prima, que dependem de luz ultravioleta uniforme para curar corretamente. A máquina utiliza um reservatório de fundo transparente, onde é depositada a resina, e uma superfície de impressão fixa de ponta-cabeça a um eixo vertical. Este reservatório repousa sobre uma tela de LCD, e abaixo dela há um emissor de luz ultravioleta. Durante seu funcionamento a máquina submerge a superfície de impressão no reservatório de resina e a pressiona contra o fundo transparente, a

luz ultravioleta é disparada contra o fundo do reservatório, mas é filtrada pela tela de LCD, que projeta uma máscara opaca, permitindo a passagem de luz apenas na região referente à camada a ser depositada. O processo se repete, lentamente elevando a superfície de impressão para a deposição das camadas subsequentes. DLP é um método que permite o depósito de camadas menos espessas, o que resulta num acabamento mais fino, No entanto a matéria prima é mais cara, e a operação exige o manuseio e limpeza de resinas tóxicas.

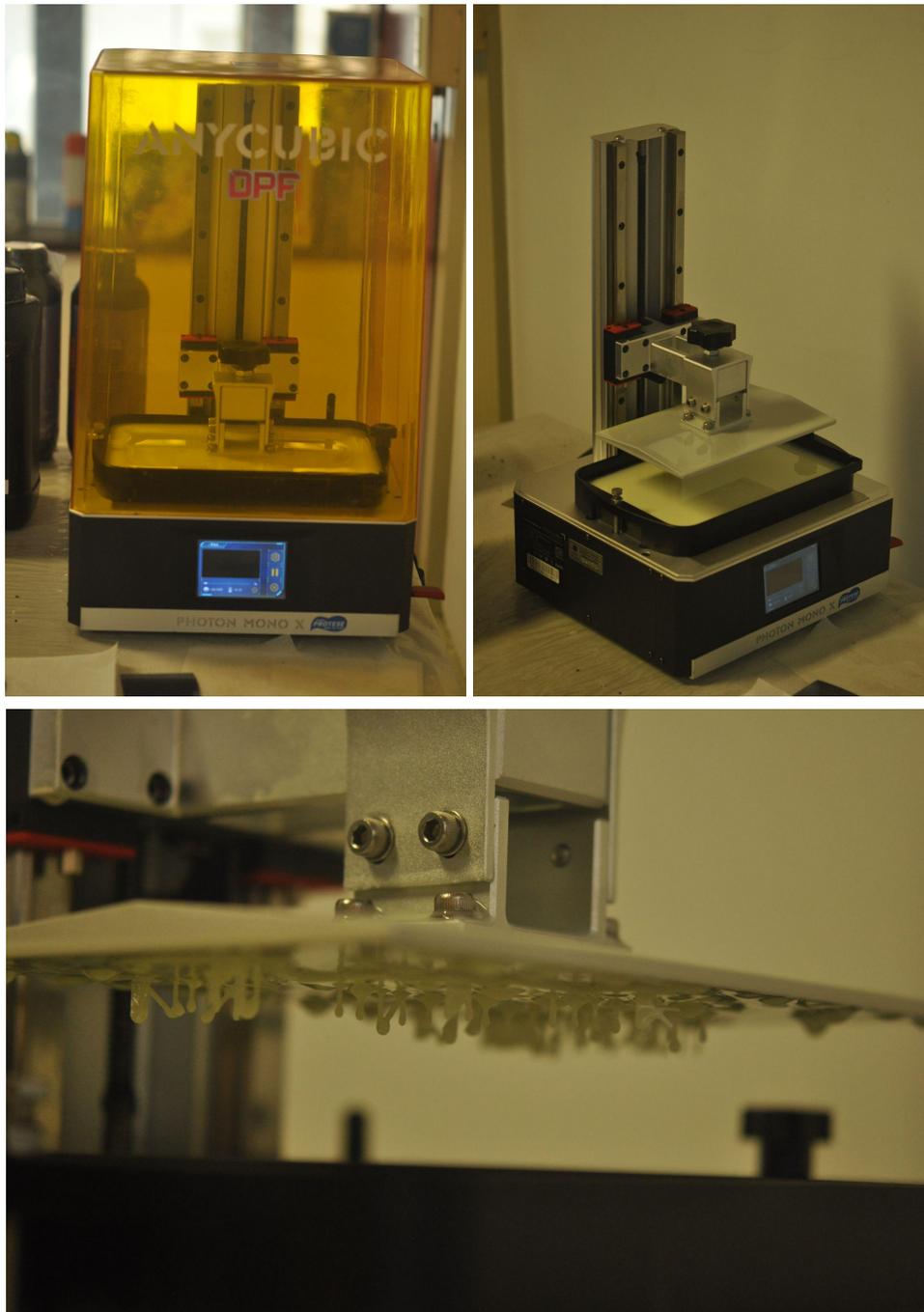


Figura 11: Impressora DLP Photon Mono X. Fonte: Acervo do autor.

Softwares de CAD/CAM

como citado acima, a interpretação e tradução dos modelos digitais a instruções numéricas depende destes softwares, no entanto existem softwares para cada tipo de equipamento, dotados de diferentes particularidades, dentre os explorados:

- c. **Fatiador FFF:** Os softwares deste tipo utilizados para impressoras 3D são comumente chamados de fatiador(ou *slicer*), por conta do processo seccionar visualmente o modelo digital em camadas para produzir as instruções de impressão.
 - i. **Ultimaker Cura:** Solução gratuita.
 - ii. **Simplify 3D:** Solução comercial.

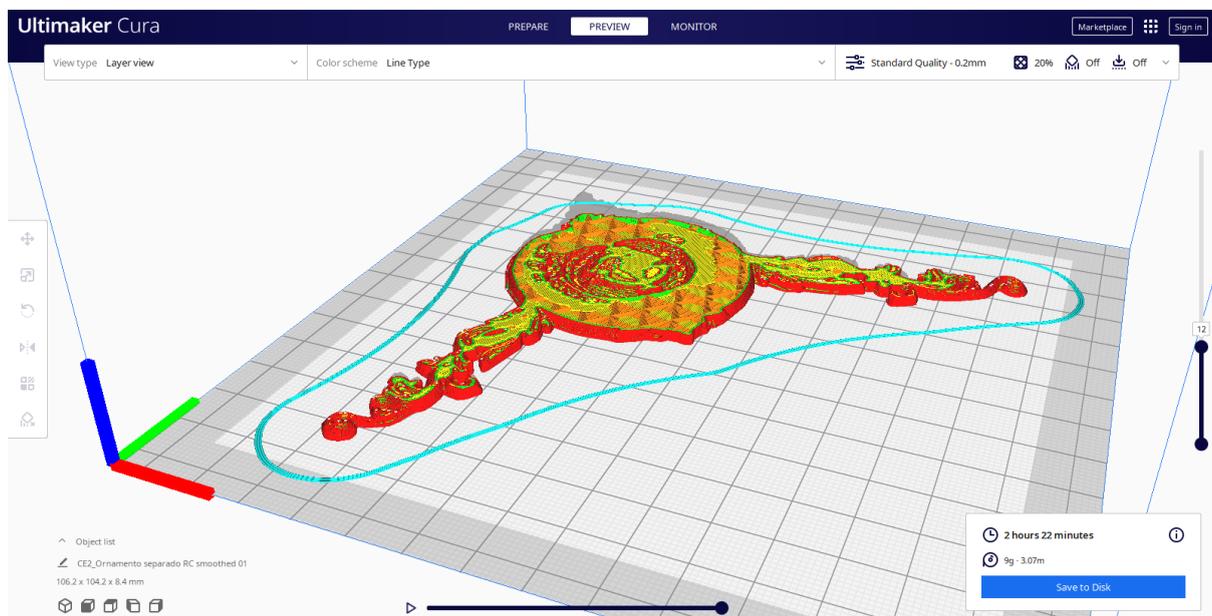
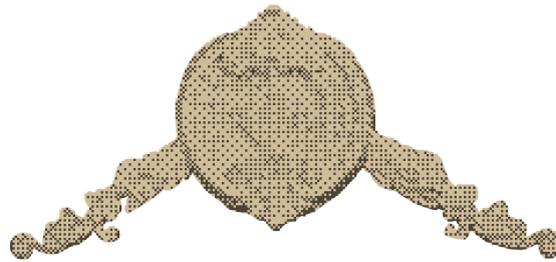


Figura 12: Interface Ultimaker Cura. Fonte: Acervo do autor.

- d. **Fatiador DLP:** Diferente do fatiador FFF, o produto principal não é um conjunto de coordenadas, mas uma série de imagens monocromáticas que são utilizadas como máscaras pela tela de LCD da impressora.
 - i. **Chitubox:** Solução gratuita, possui versão paga.
 - ii. **Photon Workshop:** Software proprietário, gratuito.
- e. **Fresadora:** Dadas as circunstâncias variáveis nas quais Fresadoras CNC operam(utilizando diferentes materiais, de diferentes espessuras e densidades,

com diferentes fresas) Softwares CAD/CAM para Fresadoras pedem como input uma série de parâmetros, além de um projeto de planejamento um pouco mais complexo das operações de desbaste do material.

- i. **Autodesk ArtCam:** Versão antiga de um software comercial descontinuado (suas funções foram incorporadas ao Fusion 360), foi utilizado neste trabalho por limitações de equipamento.
- ii. **Autodesk Fusion 360:** Software de design industrial com vários workspaces de fabricação, incluindo CAM para fresadoras CNC. Solução comercial, mas possui versão gratuita.



Trabalhos Relacionados

Com a proposição experimental do fluxo padrão de processos, baseado nas informações levantadas a respeito de Fotogrametria e CNC, o próximo passo foi investigar a incorporação destes processos em estudos de caso reais, para obter maior compreensão dos passos e particularidades envolvidas nas diferentes etapas.

Técnicas de Captura

Alshawabkeh e Haala (2004) mostram um interessante trabalho de registro do monumento Al-Khasneh na cidade de Petra, utilizando a tecnologia LIDAR (Light Detection And Ranging) não só para a obtenção de modelo tridimensional mas também para a obtenção de desenhos de projeção ortogonal de maneira automatizada. Apesar dos excelentes resultados obtidos, destaca-se a dificuldade no reconhecimento automatizado de arestas (onde os autores se valeram de algoritmos especializados para a detecção de feições) e as oclusões geradas pelas reentrâncias e sobreposições de elementos no monumento, onde a característica estacionária desse tipo de equipamento de mostra como um problema a ser superado (neste caso, se lançou mão da combinação entre as nuvens de pontos obtidas de escaneamentos a partir de pontos distintos).

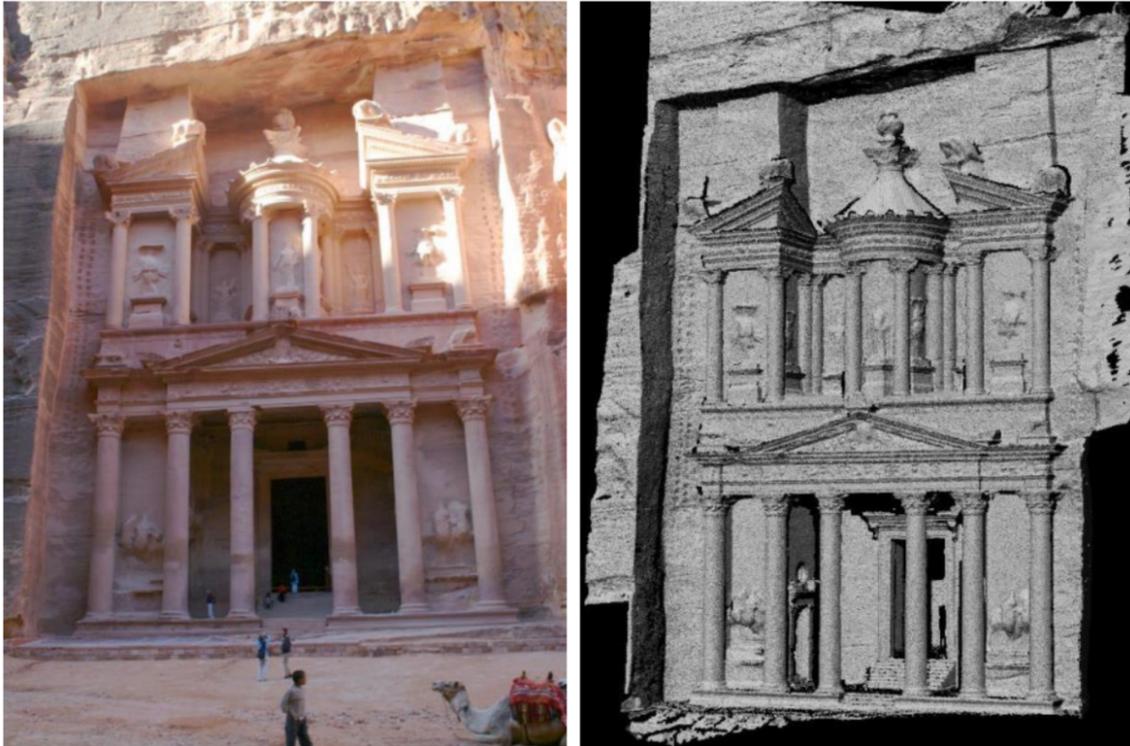


Figura 13: À esquerda, fotografia da fachada do monumento Al-Khasneh. À direita, imagem de seu modelo digital. Fonte: Alshawabkeh e Haala (2004, p 2 e 3).

Drap, Grussenmeyer e Hartmann-Virnich (2000) apresentam o uso de uma plataforma de desenvolvimento próprio chamada ARPENTEUR (ARchitectural PhotogrammEtry Network Tool for EdUcation and Research). Esta, caracteriza-se como um conjunto de ferramentas dedicadas ao levantamento arquitetônico baseado na web. Em seu trabalho, os autores apresentam uma aplicação do sistema no registro da igreja de Notre-Dame d'Aleyrac, na cidade francesa de Provence. Encontrando-se em um estado de ruína, a estratégia para a documentação baseou-se no uso da fotogrametria para a modelagem semi-automatizada dos elementos constituintes das arcadas em pedra, sendo possível sua identificação e catalogação. O trabalho demonstra uma das primeiras aplicações da fotogrametria no registro de edificações de interesse patrimonial e, embora exigisse adaptações do sistema para cada caso específico e dependesse da escolha de uma forma geométrica primitiva para descrever a estrutura da modelagem, apresenta-se como um sistema bastante avançado para a época. O sistema, infelizmente, não se encontra mais disponível, não tendo sido possível realizar qualquer tipo de teste prático para um maior entendimento de seu funcionamento.

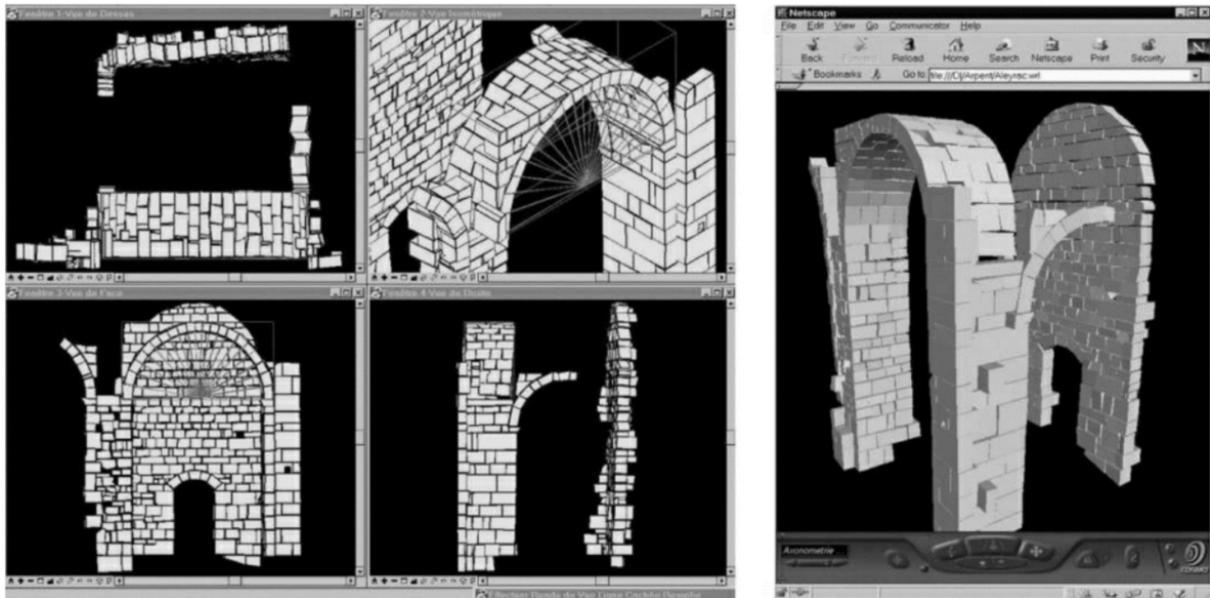


Figura 14: Resultados do processo de modelagem dos arcos da igreja de Notre-Dame d'Aleyrac. Fonte: Drap, Grussenmeyer e Hartmann-Virnich (2000, p. 145).

Técnicas de Fabricação

Em *Documentation and digital fabrications methods for restoration of eclectic metal ornaments* (MOREIRA et al. 2016) foi registrado o processo de documentação através da captura e reconstrução fotogramétrica de um ornamento metálico presente no Mercado dos Pinhões e um estudo comparativo dos processos de fabricação de um modelo físico em escala a partir do modelo tridimensional resultante da captura.

Dentre os processos explorados pelo trabalho, houveram experimentos de fundição adotando processos de **isopor e cera perdidos**, onde são produzidas peças a partir destes respectivos materiais, que por sua vez são revestidas com uma casca cimentícia de maior resistência térmica, formando um molde ao redor do objeto. Ao verter o metal fundido dentro do molde, o calor do material dissolve a forma original, e o metal preenche seu espaço, depois a casca é destruída para a obtenção do objeto final.



Figura 15: Resultado de reconstrução fotogramétrica de ornamento no Mercado do Pinhões utilizando o software Agisoft PhotoScan. Fonte: Moreira et al. (2016, p.192).

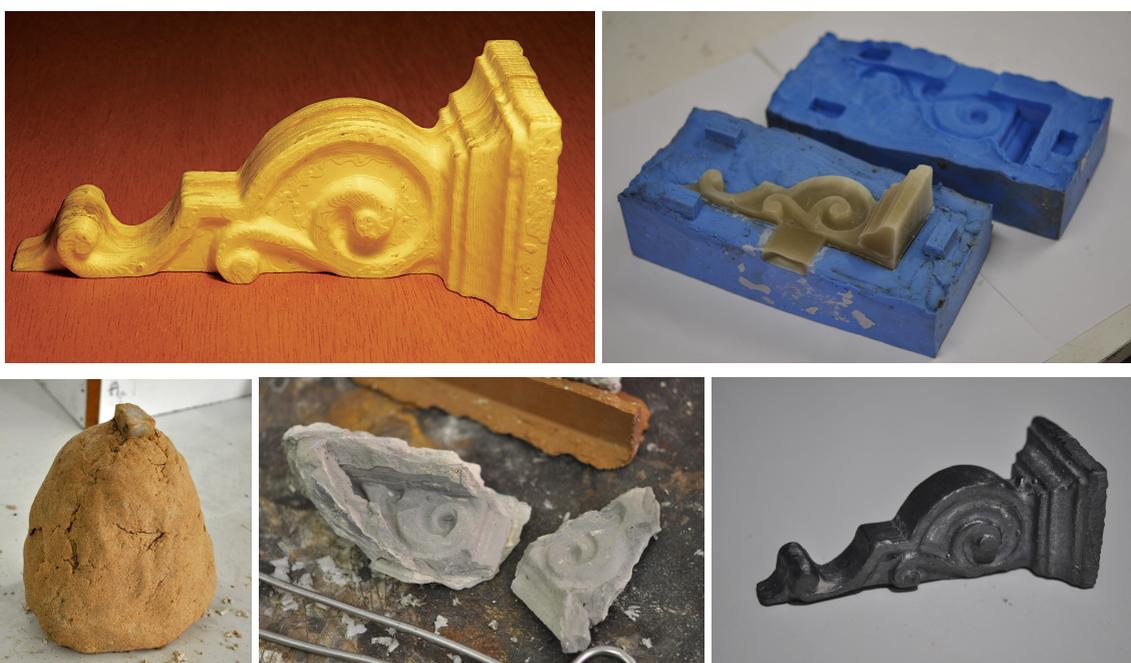


Figura 16: Processo de geração de réplica de ornamento metálico partindo de matriz fabricada digitalmente. Fonte: Moreira et al. (2016, p.195-197).

Varela e Sousa (2015), por sua vez, apresentam um trabalho que une as etapas de modelagem e fabricação, aplicando o processo para a pedra angular presente em um dos arcos de entrada do Palácio Episcopal do Porto, de autoria do arquiteto Nicolau Nanson. O processo apresentado utiliza-se de softwares de fotogrametria que automatizam a modelagem a partir de uma sequência de fotografias de curto alcance tomadas de vários ângulos. Foram utilizadas 24 fotografias para a obtenção automática de um modelo digital do objeto, que é levado para um software de modelagem para a limpeza de pequenas anormalidades e retirada de geometrias adjacentes. Como teste, um protótipo em escala 1/10 foi produzido através de impressão 3D com tecnologia FDM, em polímero ABS. Uma vez validada, o elemento foi então reproduzido em escala natural,

utilizando-se de processo de fresagem e corte por braço robótico em um bloco de isopor de alta densidade. Aqui chama-se atenção para a completude do processo, que passa pela aquisição dos dados geométricos e se preocupa em estruturar um fluxo de trabalho que possa levar à fabricação. Como limitações, aponta-se para o fato de que o material escolhido, o isopor, apresenta uma baixíssima resistência mecânica, o que torna o processo significativamente menos custoso do que o uso de granito, material constituinte do elemento original. Embora o uso deste material nesse tipo de equipamento não seja uma impossibilidade, sua densidade e resistência podem apresentar entraves para o uso da técnica.

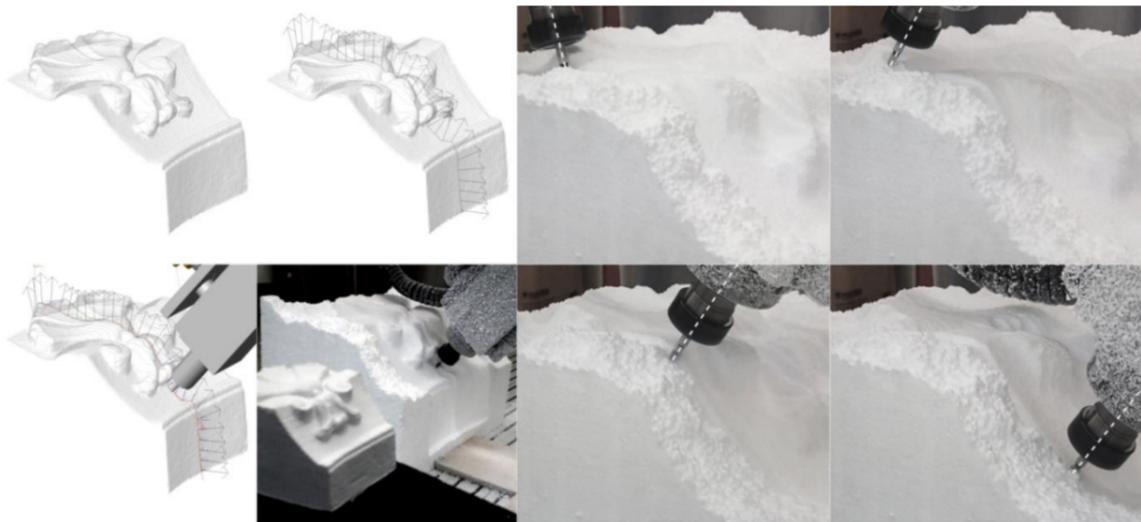
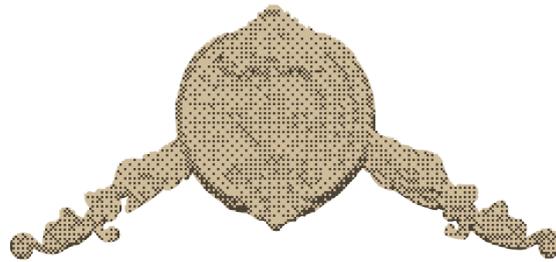


Figura 17: Imagens do processo de fabricação da pedra angular do arco de entrada do Palácio Episcopal do Porto. Fonte: Varela e Sousa (2015, p. 724).



Processos Propostos

Observadas as particularidades dos processos analisados e do ferramental elencado, pôde-se traçar um fluxo de trabalho padrão para a produção de reproduções físicas de ornamentos a partir de modelos digitais.

Resumindo todo o processo de forma simplificada:

Elencado o ornamento, é realizado um ensaio fotográfico para a aquisição dos dados necessários para a reconstrução automática do modelo, atentando-se para todas as recomendações dos processos de captura. As fotos são recebidas como input pelo software de fotogrametria, que alinha automaticamente as fotografias num espaço cartesiano e faz o cálculo da nuvem de pontos e depois a malha TIN, esta recebe a informação de textura também produzida a partir das fotos. Alguns softwares de fotogrametria apresentam a opção de isolar o volume de interesse da malha e realizar operações simples de retopologia na própria aplicação, mas como ainda não se trata de um padrão, e ajustes mais finos costumam ser necessários, o modelo é importado para softwares de edição de polígono, onde são feitos os demais ajustes à geometria, compatibilizando o modelo seja para uso direto em processos de fabricação, ou para uso em suporte documental.

No cenário de uma reprodução física, o modelo é importado para o software CAD/CAM adequado para a máquina de CNC a ser utilizada. O software nesse momento faz a tradução da forma do objeto para uma lista codificada de comandos que será interpretada e executada pelos componentes da máquina.

Executados todos os passos deste fluxo de trabalho de maneira satisfatória, deve-se obter uma reprodução física relativamente fiel ao objeto original.

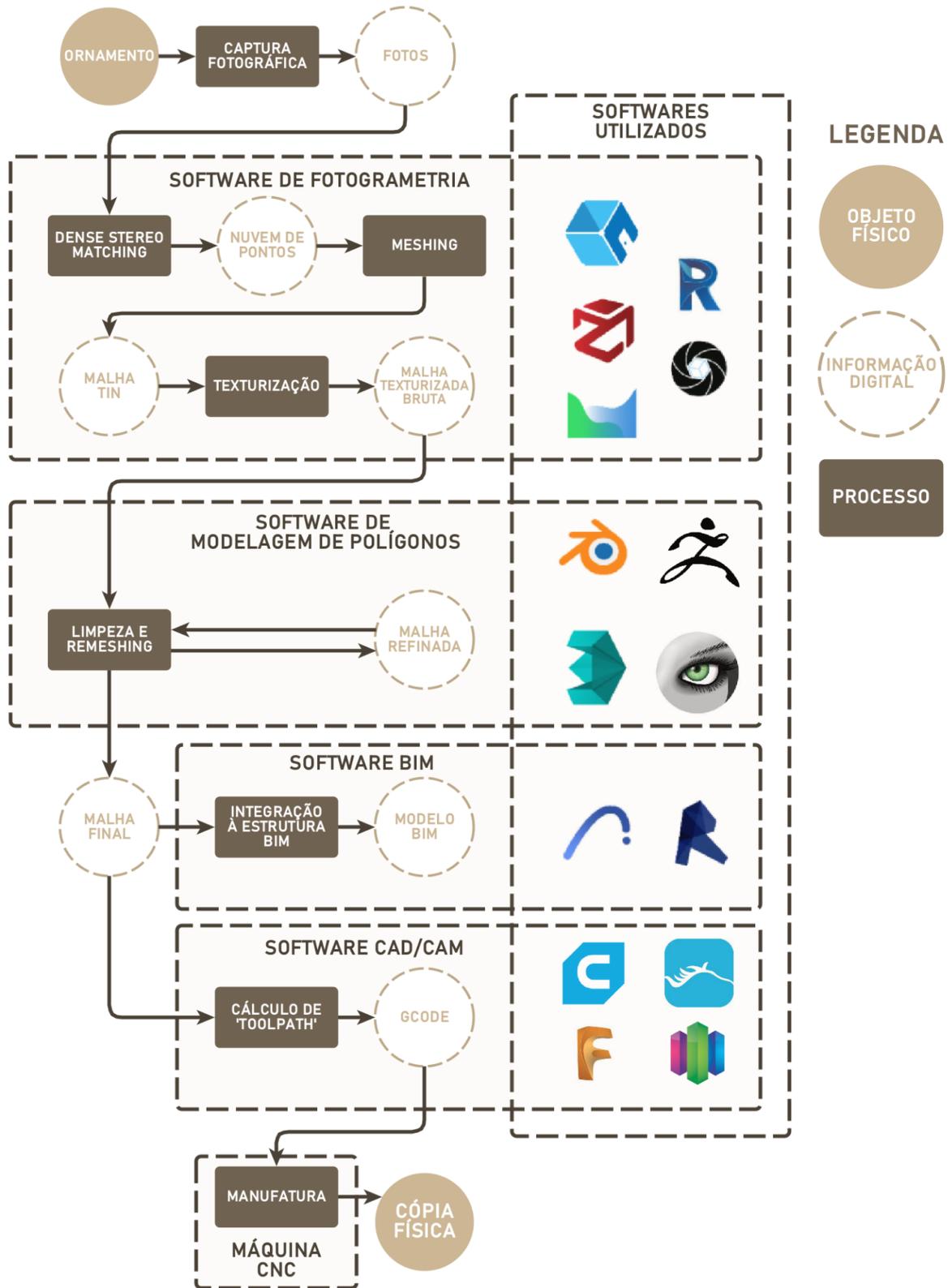


Figura 18: Fluxo de trabalho base proposto para a produção de um modelo digital gerado a partir de “nuvem de pontos”, e subsequente manufatura utilizando máquinas de CNC. Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que as cópias físicas, produtos desta série de processos, tem materialidades limitadas às capacidades das máquinas de CNC (polímeros, madeira, isopor, etc) na última etapa deste fluxo, outros processos complementares se fazem necessários para alcançar materialidades além das limitações destas máquinas.

Os fluxos de trabalho abaixo propõem respostas de processos de fabricação para as três diferentes materialidades estudadas, interpretando o fluxo padrão de fotogrametria-CNC como uma estrutura modular, e incorporando-a ao repertório ferramental convencional envolvido na manipulação de cada materialidade.

Estes fluxos são bases de processos que podem variar em algum nível, modificando ou incluindo diferentes processos intermediários, dadas as particularidades dos ornamentos e objetivos para os quais estes fluxos podem ser adotados, uma vez que o objetivo dos processos é especificamente a transposição de informação formal do objeto com o mínimo possível de perda dessa informação.

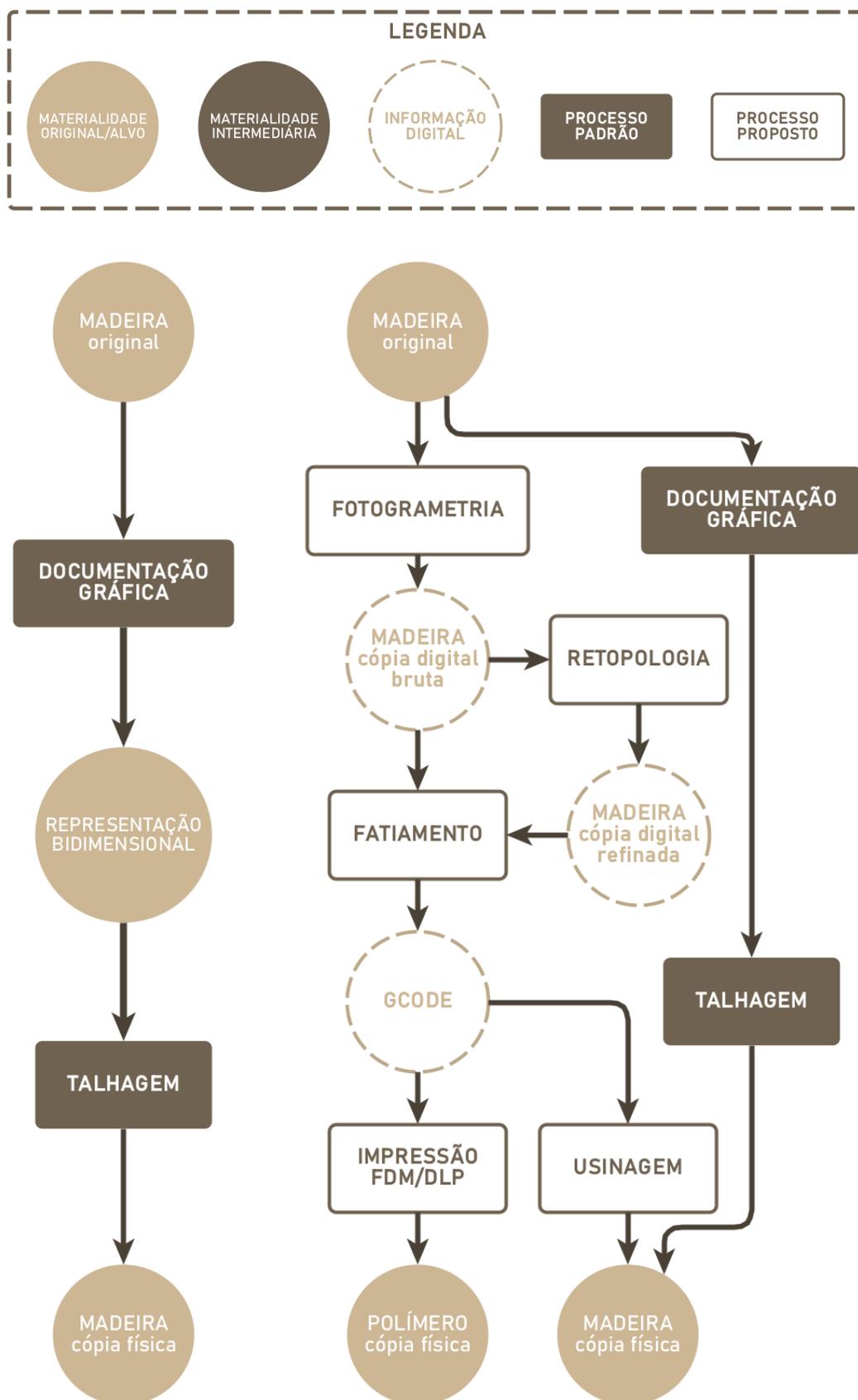


Figura 19: fluxo convencional para reprodução de uma cópia física em madeira (esquerdo), e o novo fluxo proposto (direito).

Fonte: Elaborado pelo autor.

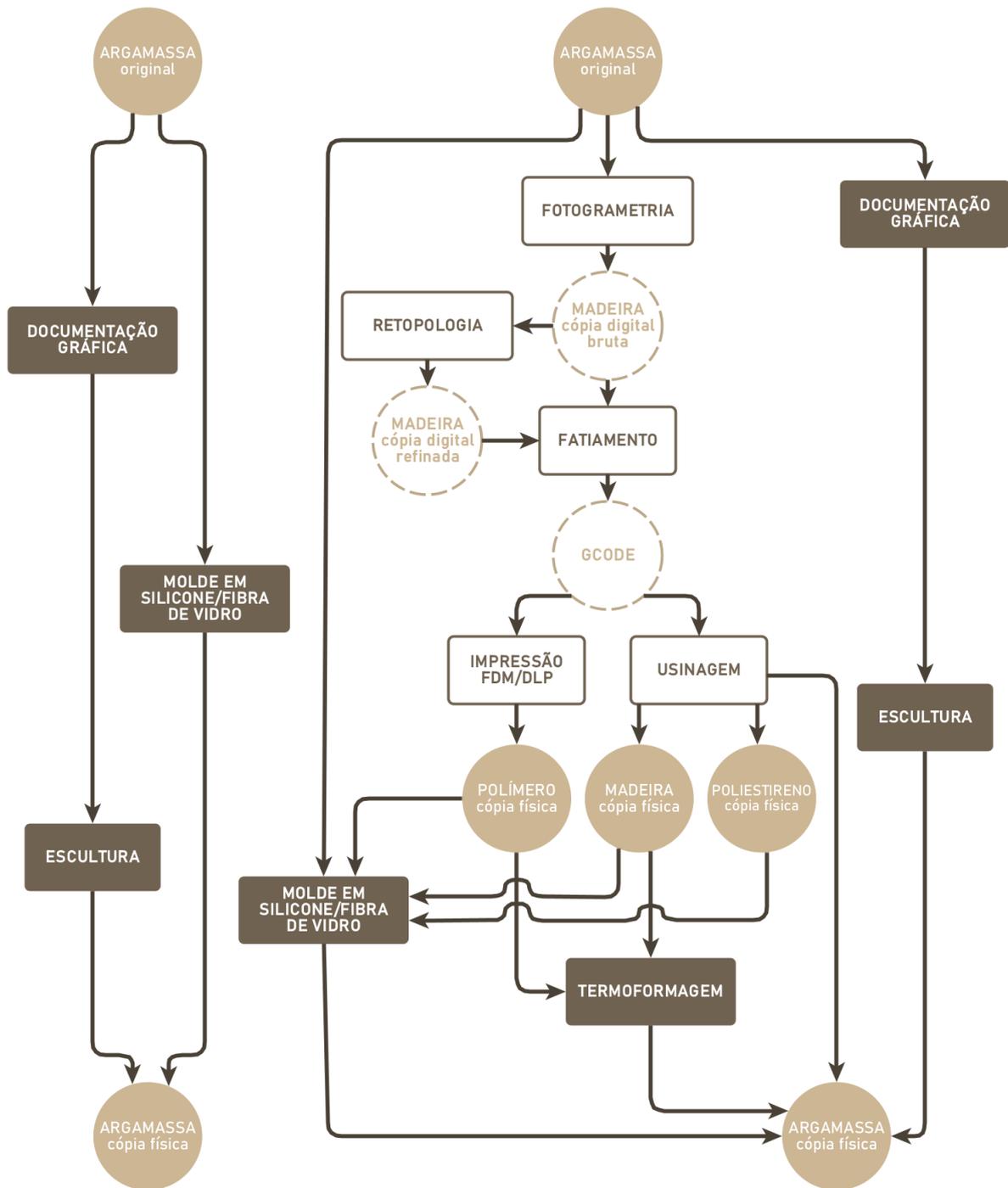


Figura 20: fluxo convencional para reprodução de uma cópia física em argamassa (esquerdo), e o novo fluxo proposto (direito).

Fonte: Elaborado pelo autor.

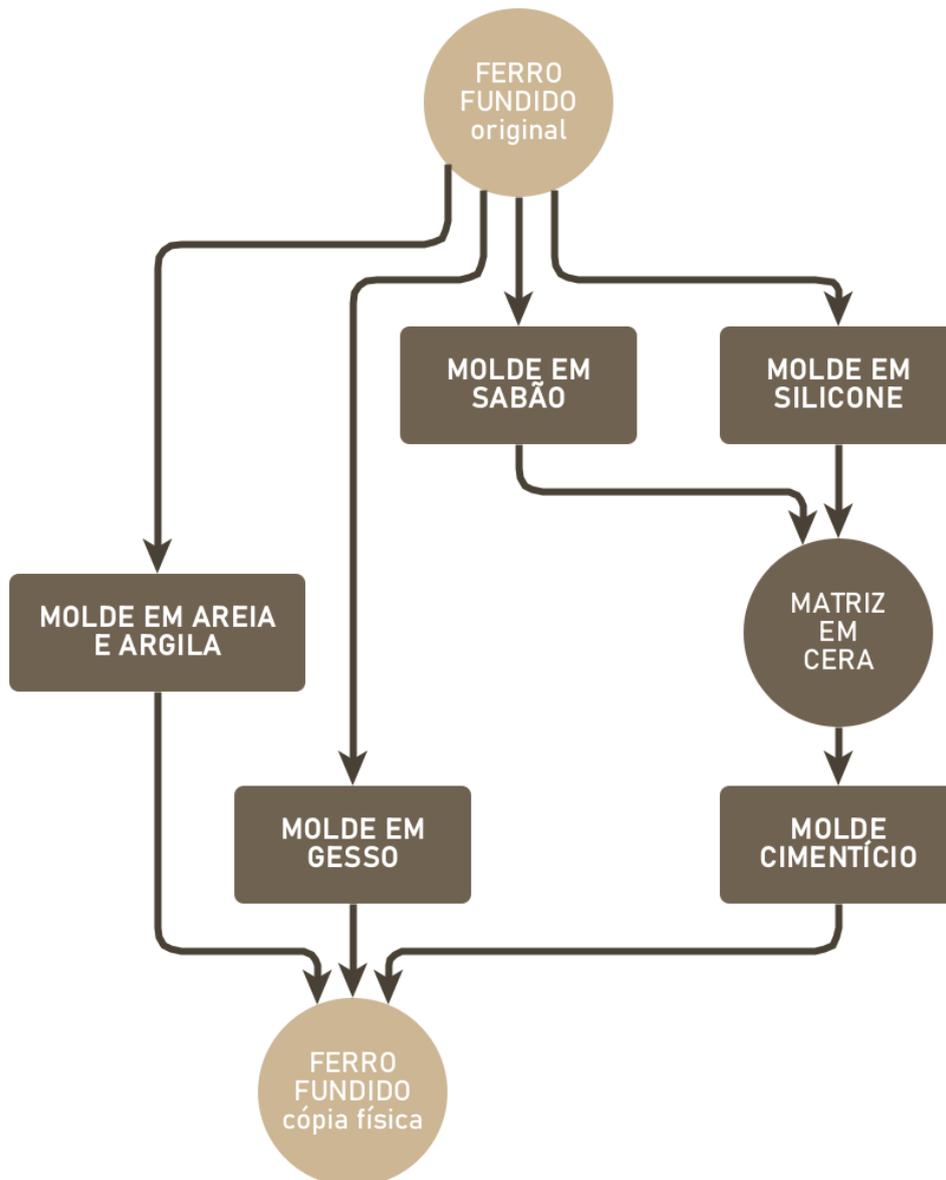


Figura 20: fluxo convencional para reprodução de uma cópia física em ferro fundido. Fonte: Elaborado pelo autor.

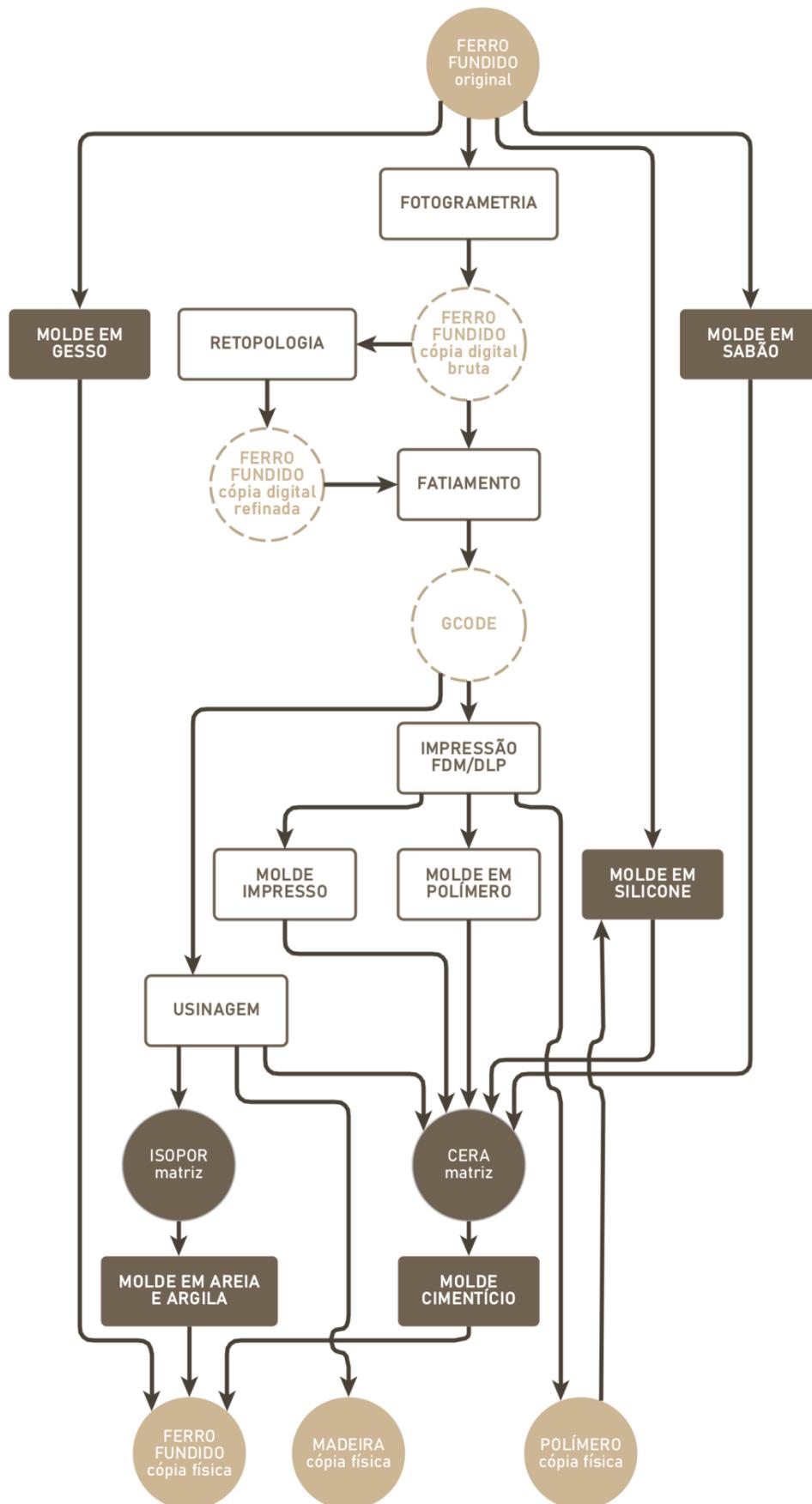
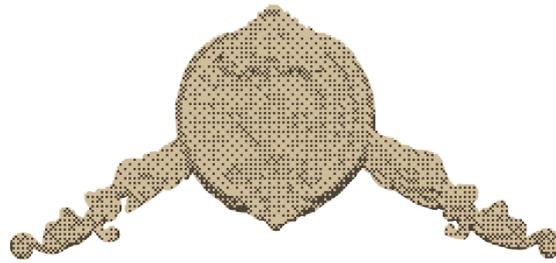


Figura 21: Novo fluxo proposto para reprodução de uma cópia física em ferro fundido. Fonte:Elaborado pelo autor.



Testes de Conceito

Ornamentos no Contexto Fortaleza/Ceará

Fortaleza, assim como suas congêneres no estado do Ceará, é uma cidade que concentra vários exemplares de edificações que são usualmente classificadas como Ecléticas ou de Estilo Eclético.

Em vez da arquitetura singela dos oitocentos, a cidade se engalana com formas decorativas novas, que se espriam em variantes populares de uma ornamentação à Luís XVI, com farto emprego de guirlandas e de balaustradas nas platibandas e nos muros de frente.

[...] Como se fossem opções do ecletismo, aparecem inúmeras realizações inspiradas no Art nouveau e, com menor exemplificação, no neocolonial.

[...]No Ceará, como no Brasil, o neogoticismo e, com maior vigor, o neoclassicismo, constituem um expressivo meio de europeização da arquitetura, ainda que, às vezes, meramente epidérmico. De qualquer modo, significavam um afastamento definitivo dos antigos padrões formais lusitanos. (CASTRO, 1987, p. 213, 214 e 217)

Segundo Nogueira (2019), por consequência de edificações comumente serem vistas pela lente da história da arte europeia tradicional, são taxadas de “ingênuas”, “pobres”, “sem valor artístico” ou

“sem valor arquitetônico”, nunca se chegando a uma conclusão objetiva do que isso quer de fato dizer.

Entendendo os processos culturais de uma sociedade com diferentes formas de criação, produzindo constantes traduções intersemióticas entre estas diferentes formas, podemos propor uma leitura da arquitetura que realmente inclua seu contexto de criação. No caso de Fortaleza, este contexto é uma rede de criação cultural formada por um processo de mestiçagem de constantes trocas e traduções culturais, como, na verdade é em toda a América Latina. Podemos, a partir daí, perceber que a mesma sociedade, a partir de um pensamento em rede composto por aproximações em vários níveis de caracteres e com diferentes engastes entre culturas distantes e distintas, produziu, por exemplo, elementos como a jangada, a renda de labirinto, a tapioca, a rede de dormir ou o maracatu, também produziu a arquitetura chamada de Eclética. Este ecletismo surge, então, não por uma colagem de estilos ou revivals de antigos períodos, já que, afinal, em Fortaleza não se viveu esses períodos para poder revivê-los, mas muito mais por uma capacidade ou tendência da rede de criação de aproximação de diferentes elementos e de engastes da natureza e da paisagem nos objetos por ela produzidos. Um primeiro olhar mais desatento pode classificar esta arquitetura simplesmente como Eclética; um segundo olhar mais apurado lhe chamaria de Ecletismo Cearense, mas não a explica já que está munido das ferramentas e vícios das velhas análises arquitetônicas. Falar de contexto vai muito além do que uma análise estatística do uso e ocupação do solo na vizinhança. É tratar do processo de criação, das relações culturais que propiciam sua elaboração, das conexões ambientais entre sujeitos, natureza e paisagem (NOGUEIRA, 2019, p. 19-20).

Ele argumenta em seu texto que ao longo do legado histórico de Fortaleza, estes estilos surgem como um processo de mestiçagem, onde há um sincretismo dos signos presentes não apenas nos elementos formais dos edifícios, mas na extensão da experiência cultural dos povos que os habitam. Logo, a carga simbólica presente nestes signos transpostos do contexto europeu, passa a se manifestar agora com novos significados, advindos justamente desse enlace de culturas. Logo, sob essa ótica, é seguro argumentar que a linguagem formal manifestada por essas edificações e seus ornamentos surgem como manifestações genuínas da cultura e história cearense. E estes exemplares são dignos de salvaguarda.

Observando o caso específico da cidade de Fortaleza, é possível perceber uma distribuição heterogênea do patrimônio cultural edificado. A exemplo de outras capitais brasileiras, tem no seu bairro central o núcleo inicial de ocupação do território, onde se concentram a maior parte das edificações de interesse.

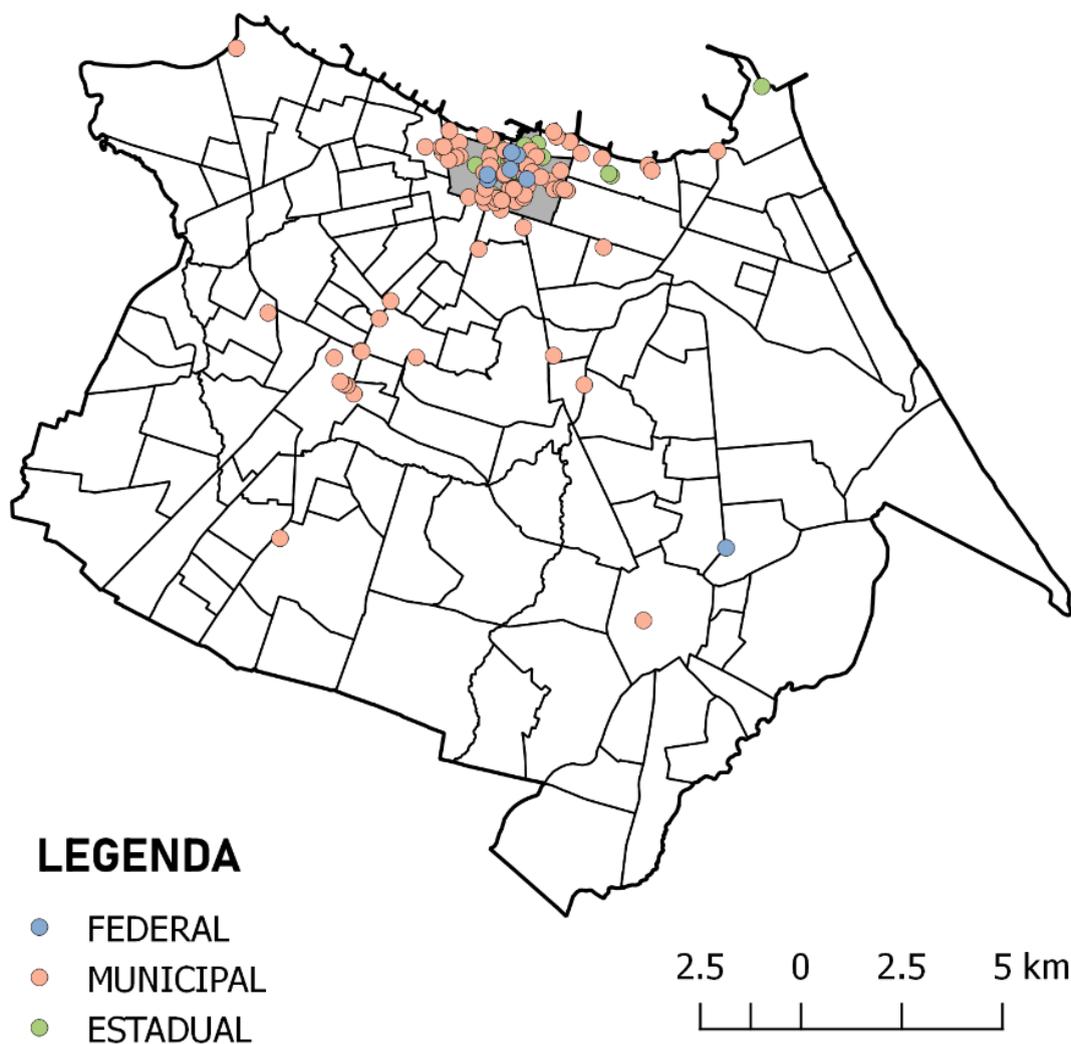


Figura 22: Patrimônio tombado na cidade de Fortaleza, classificado por esfera de proteção. Fonte: Acervo do autor.

Em um olhar mais aproximado, pode-se perceber que, para além dos elementos edificados protegidos oficialmente no bairro do Centro, há uma série de outras edificações de interesse cultural, demonstrando ainda um vasto campo de atuação para os órgãos de proteção ao patrimônio.

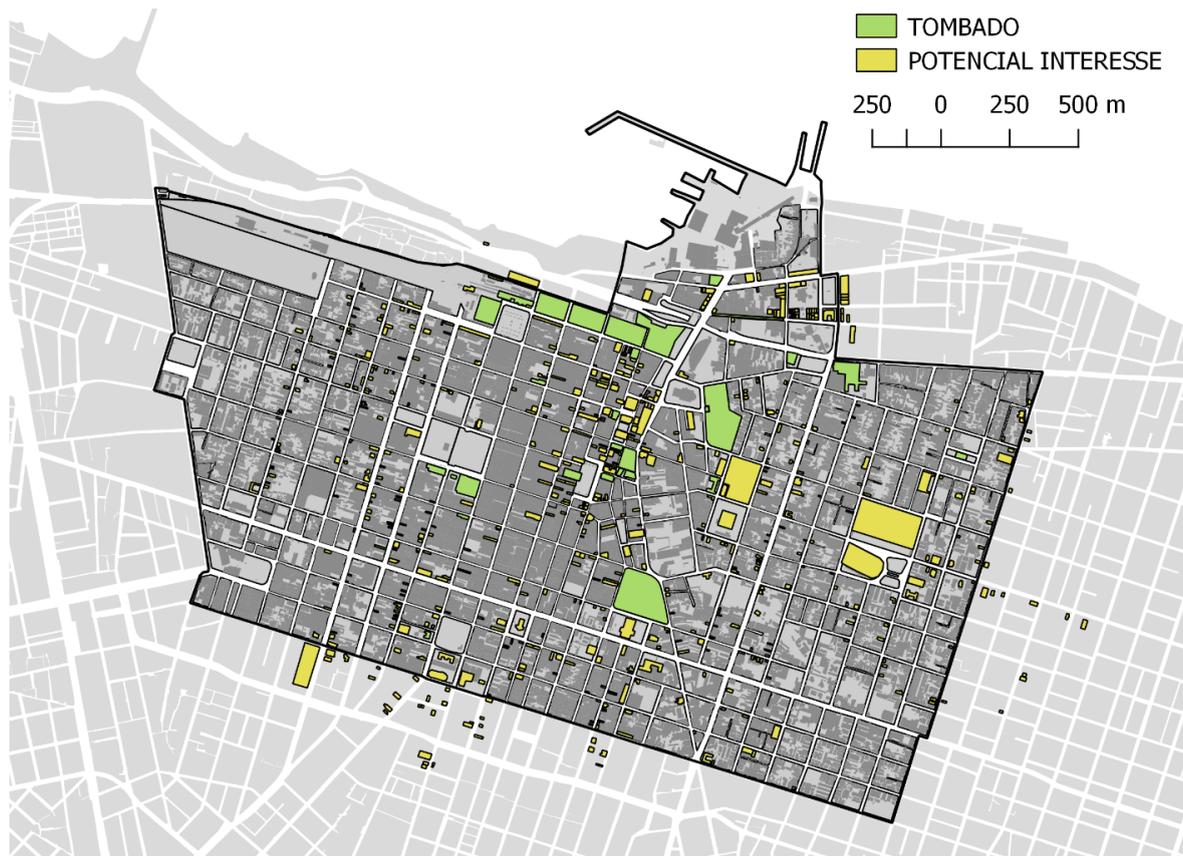


Figura 23: mapeamento de patrimônio na área do centro, mesmo com o número de edificações tombadas, ainda existe grande número de potenciais edifícios relevantes desprotegidos pela esfera pública. Fonte: Acervo do autor

Se tomamos essa amostra como significativa para a cidade e para o estado, podemos perceber um rico mosaico de ornamentações arquitetônicas, passando por motivos fitomórficos, inspirações em elementos de heráldica, mitos e animais fantásticos. De outro modo, faz-se presente uma variedade de materialidades, como os elementos em argamassa, as talhas em madeira e os elementos em ferro fundido, demonstrando um potencial campo de aplicação da pesquisa aqui empreendida bastante vasto.



Figura 24: Mosaico de elementos ornamentais do patrimônio cultural edificado do Centro de Fortaleza. Fonte: Acervo LED.

No entanto, Fortaleza não tem um histórico de sucesso no que concerne à manutenção e salvaguarda do seu patrimônio edificado. -

Experimentos Realizados

Os processos e técnicas propostos serão colocados à prova através de testes com elementos de distintas naturezas. A escolha dos elementos parte da observação do conjunto de elementos do patrimônio cultural edificado no Ceará, com ênfase em na cidade de Fortaleza. A escolha também se alinha com os fluxos do projeto de pesquisa "Artífices Digitais: Tecnologias para a documentação do patrimônio cultural edificado e o uso de ferramentas de fabricação digital para a restauração", financiado pelo CNPq e do qual o autor faz parte da equipe de pesquisadores.

A seguir serão elencados 3 processos onde se trabalha com elementos ornamentais de alguns patrimônios culturais do Ceará: A igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário na cidade de Russas (onde trabalha-se a talha em madeira), o Parque da Liberdade na cidade de Fortaleza (onde trabalha-se o ferro fundido) e a Farmácia Oswaldo Cruz também em Fortaleza (onde o foco estará em seu ornamento central de fachada, constituído de argamassa.

Retábulo do altar da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário de Russas-CE

Em USO DA FABRICAÇÃO DIGITAL NOS PROCESSOS DE RESTAURAÇÃO: o retábulo do altar da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário de Russas-CE. (NOGUEIRA et al. 2019) foi documentado o processo de restauração descrito em maior detalhe. Sobre a Igreja em si, e os danos sofridos ao ornamento, o artigo descreve:

O templo surge a partir do primeiro quartel do século XVIII, filiado à freguesia de Olinda, Pernambuco. O retábulo, objeto principal dos trabalhos de restauração, é composto por um trabalho primoroso de talha em madeira escura e de alta dureza, finalizada com acabamentos em

folha de ouro e pinturas em símile marmol. Apresenta uma grande complexidade geométrica, sendo incrustado de elementos fitomórficos, com características estilísticas que poderiam ser enquadradas no gosto rococó. Não foi possível encontrar, durante os trabalhos realizados, registros históricos da procedência de tal talha. É certo, no entanto, que no Ceará não há registros, até então, de artífices com uma envergadura compatível com a qualidade da fatura e do douramento de tal escultura. Quando do início dos trabalhos, a estrutura apresentava uma perda de suporte significativa motivada por ataques de insetos xilófagos da espécie isóptera, que comprometera significativamente a sua leitura estética

(NOGUEIRA et al. 2019)

Este processo colaborativo surgiu como uma primeira possibilidade de explorar as técnicas elaboradas aplicadas a um projeto real de restauro num ornamento em madeira, e como os dados geométricos podem ser manipulados para produzir suportes materiais para este tipo de manutenção.

A estratégia do projeto partia da observação de que a forma deste retábulo é dotada de **simetria bilateral**, conseqüentemente a parte degradada do ornamento fazia parte de um par, e seu oposto não havia sofrido a mesma degradação, podendo-se então aferir uma aproximação da forma original do ornamento.



Figura 25: À esquerda, a base da coluna do evangelho. Ao centro, a base da coluna das epístolas. À direita, um croqui realizado a partir de observação da base da coluna das epístolas, explicitando suas dimensões. (NOGUEIRA et al. 2019).

O processo de construção do modelo foi feito utilizando fotogrametria por **DSM** para produzir dois modelos preliminares de ambos ornamentos. Após exportados para um software de modelagem, o modelo do ornamento de referência é refletido e alinhado ao danificado. Dada a natureza analógica da produção desses ornamentos (e em menor parte, pela própria natureza do processo de captura) eles não são perfeitamente simétricos. Este fator é adereçado utilizando **ferramentas de escultura digital**, que permitem a deformação uniforme da malha em locais específicos, mas mantendo a coesão formal do objeto.

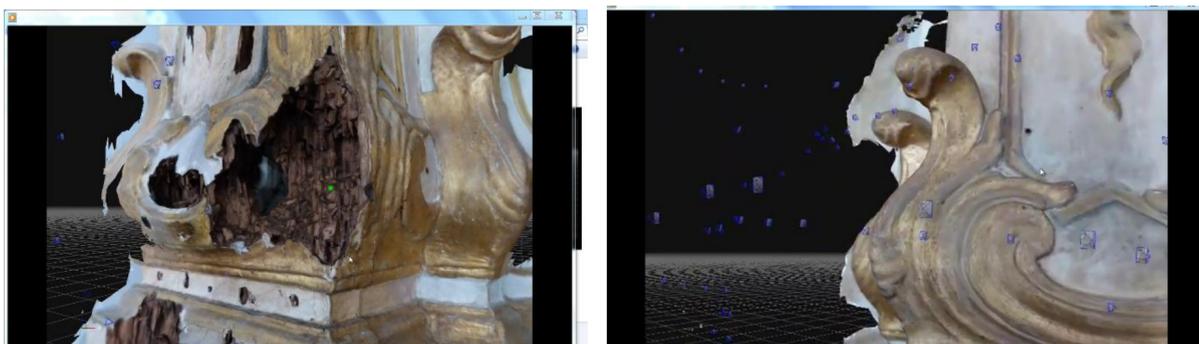


Figura 26: Modelo fotogramétrico da parte danificada do retábulo (Acervo LED)

Com as peças alinhadas, pôde-se realizar uma operação de **diferença booleana**, onde um modelo digital atua como um operador geométrico, detectando outro modelo que interseccione com sua geometria. O operador é utilizado como referência para a construção de um modelo sólido, que é composto pela junção das faces da geometria do objeto operado que não intercedem com o operador, e da geometria do operador que intercede com o objeto operado. Este processo gera um

fragmento baseado no modelo de referência, que preenche o espaço negativo do modelo deteriorado.



Figura 27: Ambos os modelos da peça deteriorada e a peça de referência sobrepostos (esquerda). fragmento gerado após a operação booleana. Fonte: Acervo do autor.

Para a produção do primeiro protótipo para a simulação de encaixe, dada uma antiga limitação de disponibilidade de impressoras de FFF. Havia disponível apenas uma impressora de modelo Cliever CL1, que possui um volume de impressão reduzido. Por consequência, um dos modelos de encaixe teve que ser fracionado em quatro peças para poder ser propriamente impresso.



Figura 28: Testes de adequabilidade com o protótipo em PLA. (NOGUEIRA et al. 2019)

Realizadas as observações e após leves ajustes no modelo, partiu-se para a fabricação das próteses que seriam de fato implantadas. A equipe da restauração optou por restituir os elementos faltantes por novas peças em madeira, o que guiou a escolha por uma técnica de fabricação subtrativa. Foi utilizada uma fresadora CNC com 3 eixos lineares e um eixo rotativo, o que permitiu a usinagem de blocos de madeira Pinus. Para a inserção final das próteses, foram feitas obturações nas peças danificadas para o preenchimento de lacunas mais profundas com o uso de serragem e adesivo polivinílico, material que também foi utilizado na colagem das peças. Realizados os nivelamentos das emendas, as próteses receberam aplicação de base branca com posterior aplicação de bolo armênio e mordente, preparando a superfície para a aplicação do douramento, feito em folha de ouro 22k. Por fim, foi realizada aplicação de pátina com o objetivo de reintegração cromática, sendo todo o conjunto protegido por aplicação de verniz protetor (NOGUEIRA et al. 2019)



Figura 29- Processo de inserção da prótese do "bico" (NOGUEIRA et al. 2019)

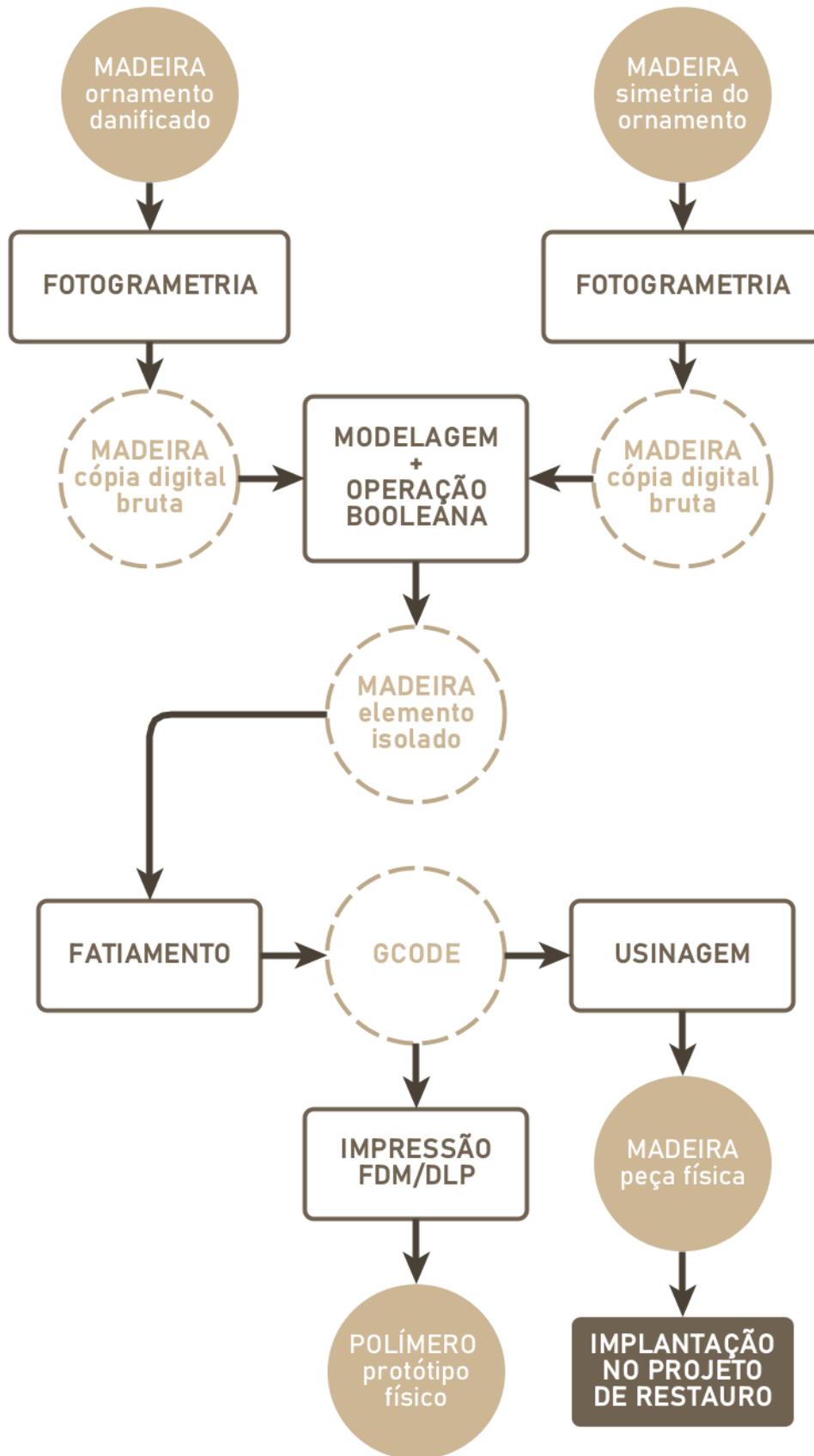


Figura 30: Fluxo de operação para ornamentos em madeira aplicado ao processo do retábulo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Postes em Ferro Fundido no Parque da Liberdade

Este estudo de caso surgiu como uma colaboração com o profissional de restauro professor Frederico Barros, que estava participando do projeto de requalificação do parque durante o desenvolvimento deste trabalho. A colaboração surgiu como possibilidade de desenvolver um estudo explorando a produção de peças em metal fundido, explorando técnica de produção de fragmentos de encaixe a partir de operações booleanas semelhantes às desenvolvidas no trabalho de Russas-CE. Infelizmente, ao momento da entrega deste trabalho, o protótipo final em metal fundido ainda não foi produzido por conta de trâmites nas obras do parque.

Quanto ao parque em si:

O Parque da Liberdade foi construído onde antes foi a Lagoa do Garrote, que era formada pela junção das águas de dois riachos: um vindo da atual praça Clóvis Beviláqua e outro que vinha pela atual Duque de Caxias. Rodolfo Teófilo, em seu livro História da Seca do Ceará, assim se pronuncia: "Na Boulevard da Duque de Caxias havia um riacho, onde a meninada se divertia pescando piabas e carás."

Estes dois cursos d'água juntavam-se na altura das atuais ruas Floriano Peixoto, Major Facundo e Assunção, desaguando onde hoje é a Cidade da Criança, construída nos primeiros anos da República pelo engenheiro Romualdo de Barros, no governo do Coronel Ferraz, o qual foi denominado, em 1890, de Parque da Liberdade em homenagem à libertação dos escravos; na entrada principal, ao lado da Igreja Coração de Jesus, na rua Pedro Pereira, foi erguida uma estátua de um índio quebrando os grilhões. No primeiro centenário da Independência do Brasil recebe o nome de Parque da Independência; em 1936 é criada oficialmente a Cidade da Criança, que passa a funcionar como uma escola pré-primária, para crianças de 3 a 7 anos de idade, sob a supervisão do Estado.

(FORTALEZA-CE, 2017)

Os objetos de estudo são dois dos postes que são encontrados ao longo do percurso do parque. Os dois possuíam danos semelhantes na superfície do mesmo tipo de ornamento, um dos dois exemplares, no entanto, variava mais em profundidade.



Figura 31: poste 1 (esquerdo e superior) e poste 2 (direito) utilizados no estudo. Fonte: Acervo do autor.

A estratégia de abordagem escolhida para a parte de produção do modelo é semelhante à utilizada no processo da peça do retábulo, com a diferença de que não há necessidade de captura de outro objeto separadamente, uma vez que o ornamento possui um padrão simétrico radial, então pôde-se utilizar uma cópia do mesmo modelo como projeção da geometria para o processo de diferença booleana.

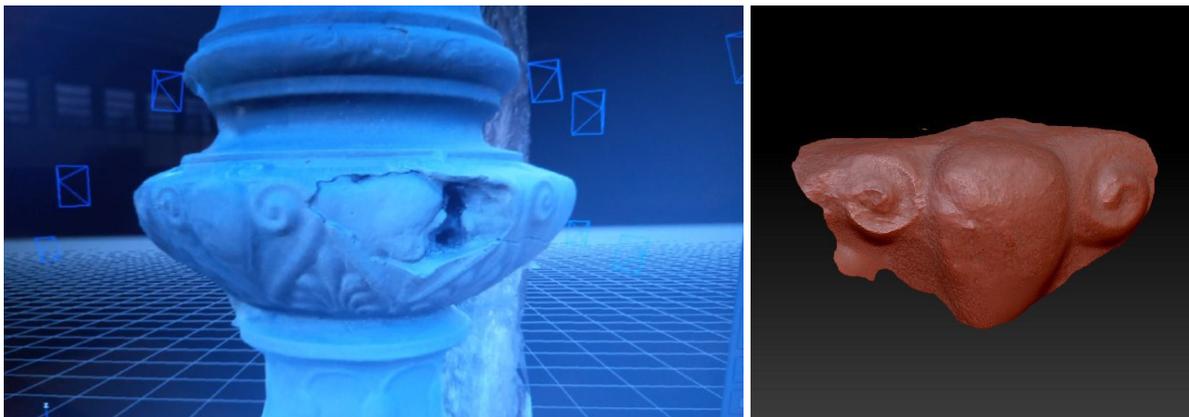


Figura 32: reconstrução com textura de poste 1 (esquerdo) e fragmento após operação booleana de poste 2 (direito). Fonte: Acervo do autor.

O modelo gerado é utilizado na impressão por FFF de protótipos para testes de encaixe com o objeto original.



Figura 33: protótipos impressos por FFF e seus respectivos testes de encaixe. poste 1 à esquerda e poste 2 à direita. Fonte: Acervo do autor.

Após a validação do modelo, ele é impresso novamente em resina pelo processo de DLP para ser utilizado como mestre na produção de um molde negativo, que por sua vez é utilizado para moldar a reprodução em cera do objeto que será utilizado no processo de fundição por cera perdida.

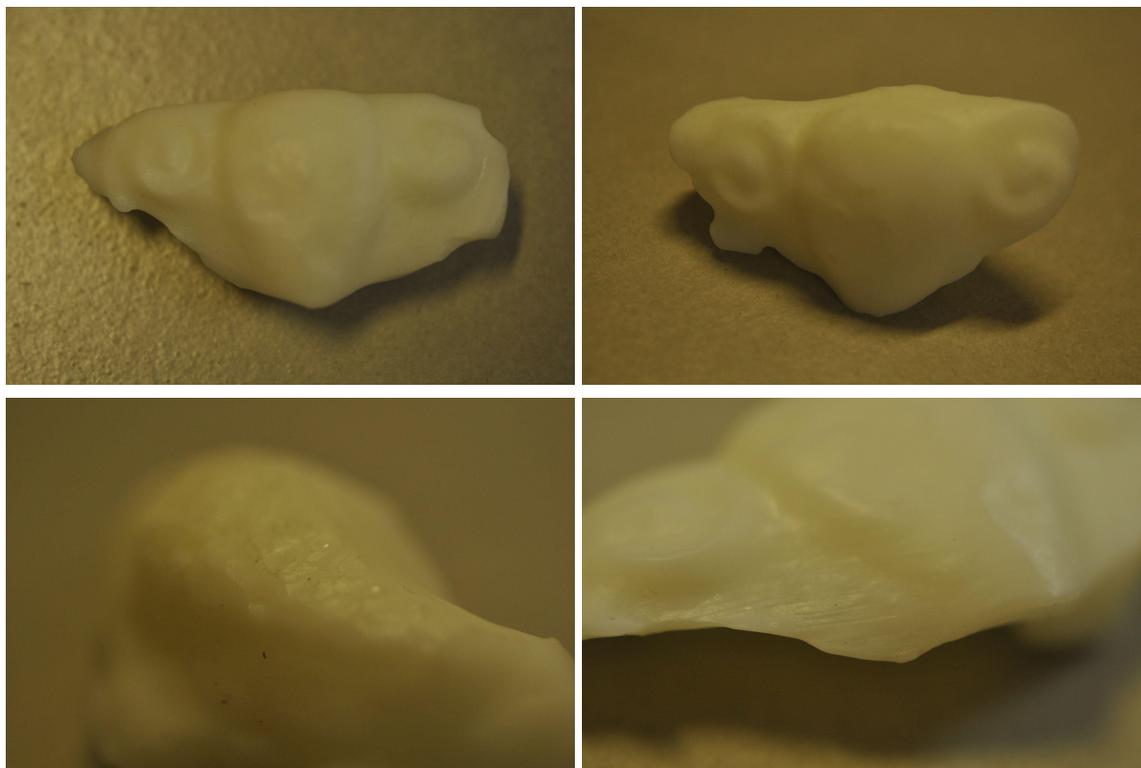


Figura 34: peças impressas por DLP para eventual fabricação de moldes. poste 1 à esquerda e poste 2 à direita. Em detalhe no zoom é possível observar imperfeições geradas pelo suporte de impressão e pelas finas linhas de camada. Fonte: Acervo do autor.

Para o processo de restauro, o objeto é fixado ao ornamento original utilizando pontos de solda, que são desbastados em seguida. As inconsistências de superfície no contorno do encaixe são preenchidas com massa corrida, e o acabamento é feito com camadas de tinta correspondente ao objeto original revestido com verniz fosco.

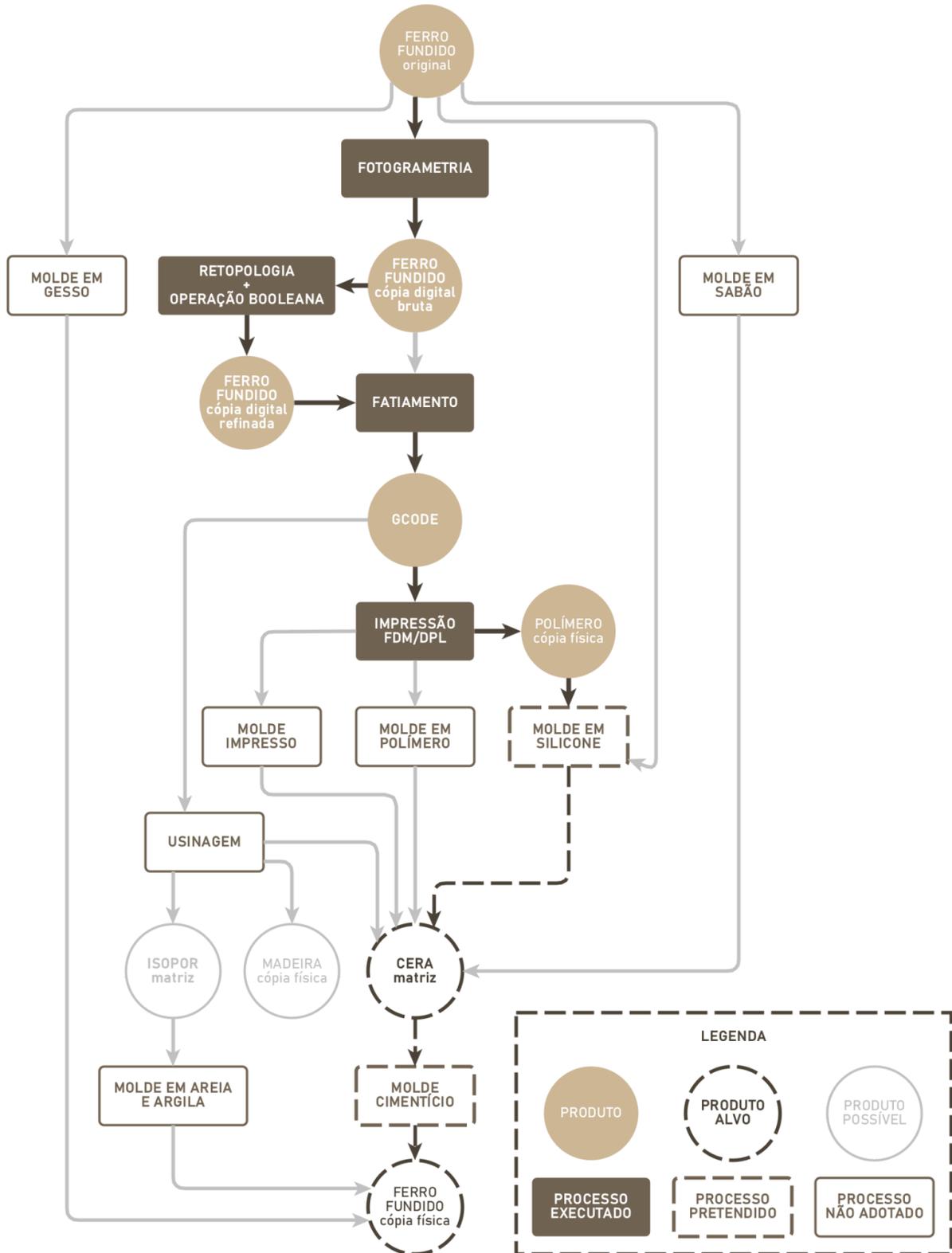


Figura 35: processo proposto para ferro fundido aplicado no contexto dos postes. Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparativamente, dentre os postes havia um exemplo cujo trabalho de restauro foi feito pelo artífice Frederico Barros, fazendo uso de técnicas convencionais. Na foto pode-se observar que a área degradada foi preenchida com massa corrida, e em seguida foi esculpida com o uso de uma microrretífica. Segundo Barros, em etapas posteriores o ornamento receberá acabamento com demãos de tinta e verniz fosco.

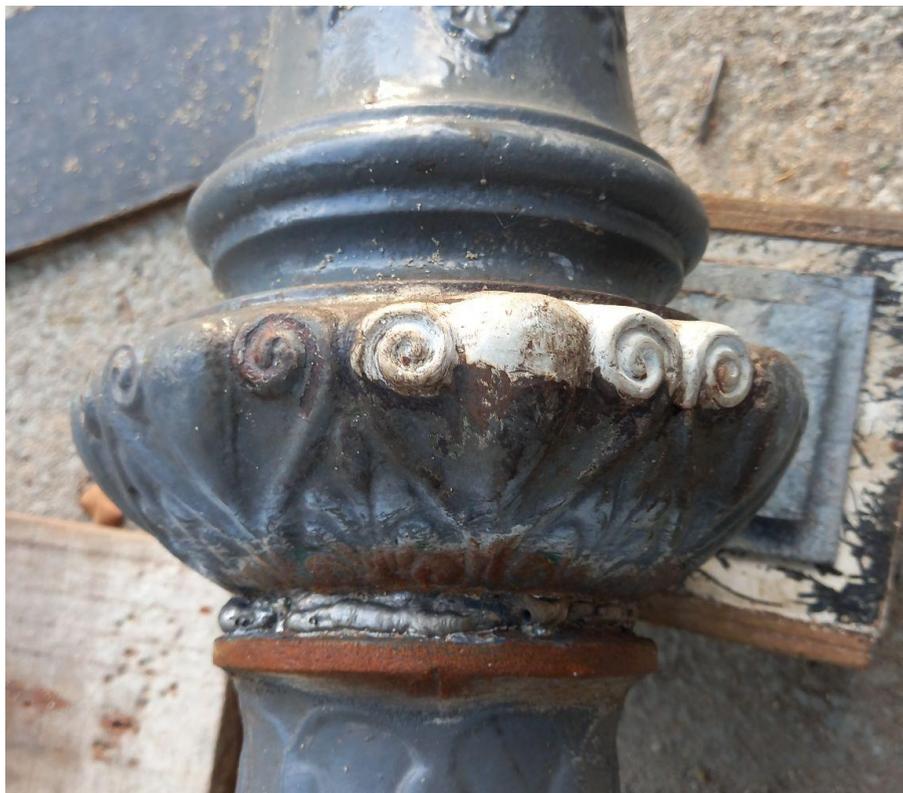


Figura 36: Poste em processo de restauro. Fonte: Acervo do autor.

Ornamento em Argamassa na Fachada da Farmácia Oswaldo Cruz

A respeito do edifício, ele é descrito no site institucional da Secretaria da Cultura do Estado do Ceará (SECULT-CE) da seguinte forma:

A farmácia foi construída no estilo eclético, na primeira metade do século XX, a farmácia ocupava uma posição de destaque na área comercial, situada em plena Praça do Ferreira, lugar de efervescência cultural e social na época de então. Ali, por muito tempo, até a década de 70, tinha-se o costume das reuniões nas calçadas dos mais variados grupos,

para discussão de temas diversos, que iam da trivialidade ao erudito, e onde aconteceu a tão famosa vaia ao sol, que consta no anedotário cearense.

A edificação reflete, através de sua fachada ornamentada e a mixagem de elementos decorativos, a inquietação de uma arquitetura na busca de uma nova linguagem, que surge no ecletismo como forma de reviver a arquitetura antiga, mas com uso dos novos avanços tecnológicos da engenharia do século XIX (FORTALEZA-CE, 2015).



Figura 37: Fachada principal da Farmácia Oswaldo Cruz. (Fortaleza-CE, 2015)

Diferente dos casos anteriores, este ensaio se empenha apenas no isolamento da forma do ornamento e na experimentação dos processos de tradução da sua forma utilizando ao máximo as técnicas disponíveis e ferramentas disponíveis.

O edifício da farmácia apresenta vários ornamentos ao longo da sua fachada, mas para a produção dos protótipos, foi elencado o brasão em argamassa que coroa a fachada. O processo de captura da fachada também foi um teste da inclusão de um drone com câmera montada no processo de captura fotográfica.

Enquanto os demais experimentos informaram mais quanto a questões de aplicação dos processos em projeto, este informa mais sobre particularidades dos projetos em si, em virtude de ser o objeto de estudo desse trabalho que teve o maior número de protótipos produzidos (estes, todos em escala).



Figura 38: foto do ornamento capturado na fachada da farmácia (superior) e modelo reconstruído no software Reality Capture.

Fonte: Acervo do autor.

Testes iniciais na Fresadora CNC foram feitos com uma placa de isopor (poliestireno). Como o material apresenta pouca resistência mecânica, pôde-se usinar o relevo da peça numa única camada de desbaste.



Figura 39: protótipo usinado em isopor. Fonte; Acervo do autor.

A forma final ficou fiel ao modelo, no entanto a textura da superfície ficou com uma camada de “plumagem”, e como as passadas foram rápidas e distantes entre si, as linhas de passagem da fresa ficaram evidentes na superfície do objeto. Outra dificuldade identificada na usinagem deste material, são as definições de velocidade de trajeto e rotação da fresa. Ao longo da usinagem, partículas de isopor se fundiam (reflexo da temperatura da fresa e fricção com o material) e lentamente se acumulavam na fresa, e acrescentaram à dificuldade de obter um desbaste limpo do material.

Uma segunda usinagem foi feita, dessa vez com uma placa de XPS (poliestireno extrudado). Como XPS é um material mais compactado que isopor, não se obteve a mesma "plumagem" do teste anterior. No entanto, problemas com material fundindo e se acumulando na fresa foram maiores e causaram dano superficial à peça e dificuldades durante a usinagem. Salvo alguns artefatos, o acabamento da superfície apresentou ganho de qualidade substancial em relação ao teste anterior.



Figura 40: protótipo usinado em XPS (poliestireno extrudado). Fonte: Acervo do autor.

Testes de **impressão por FFF** foram feitos para teste, e adicionalmente com a intenção de serem utilizados como base em processo de **moldagem em silicone** e em eventuais testes de **termoformagem**.

Foram impressas peças em ABS e PLA, dois polímeros que têm resistências térmicas diferentes, e criariam comparativos de teste interessantes em processos de termoformagem (por limitações do trabalho, no entanto, ao publicar deste trabalho não foi possível realizar estes testes).

Em virtude da geometria complexa desses modelo, o processo de impressão gerou quantidade substancial de fiapos plásticos, gerando pequenos artefatos e superfícies ásperas. Este processo é comum quando o cabeçote de uma impressora FDM tem que saltar com frequência entre detalhes, e acaba deixando esses fiapos como pequenas trilhas de plástico fundido.

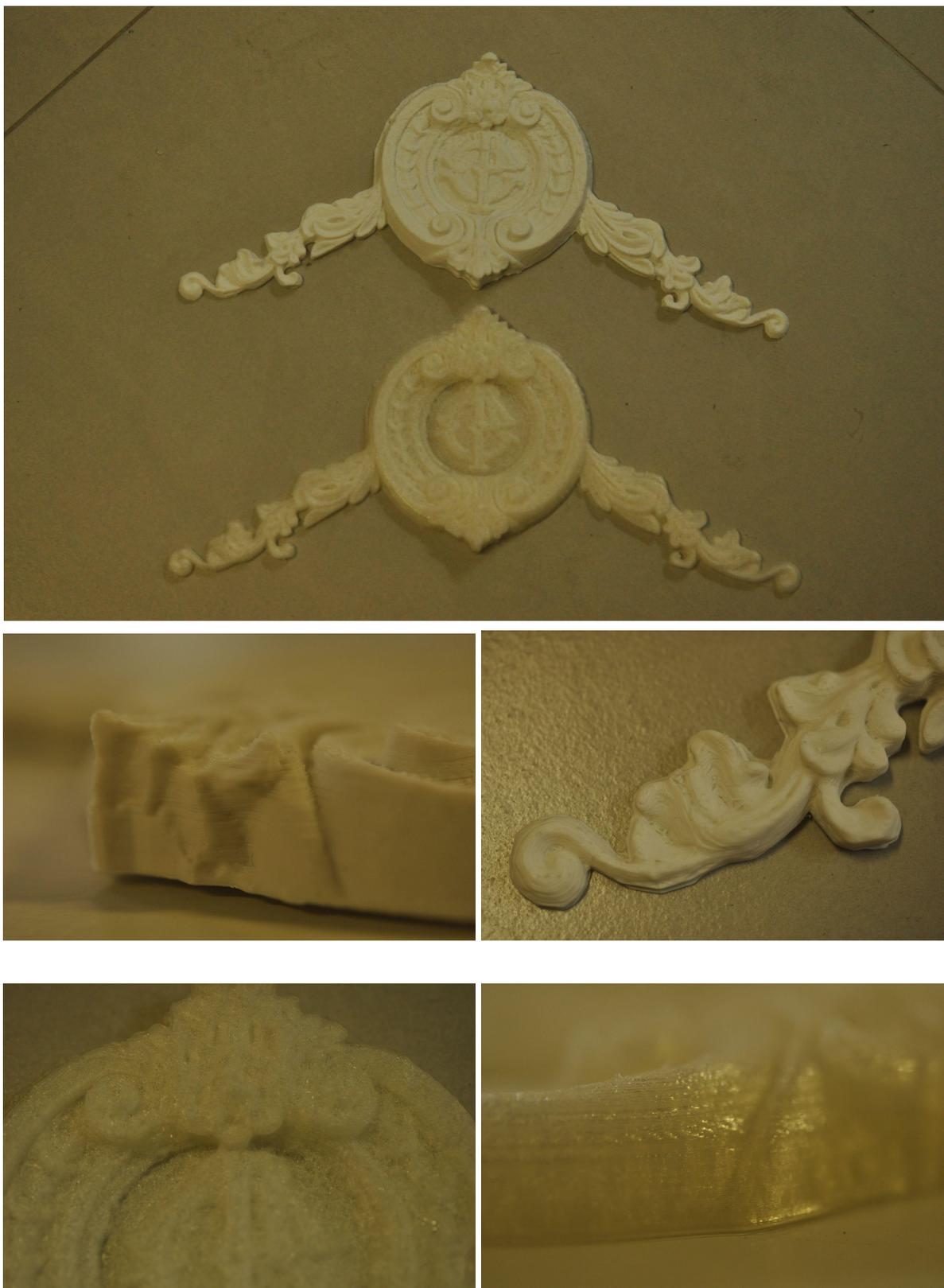


Figura 41: Protótipos impressos por FFF, em ABS (superior na foto superior) e PLA (inferior na foto superior), nas imagens abaixo, podem-se observar detalhes e imperfeições de impressão, como fiapos e as linhas de camada visíveis. Fonte: Acervo do Autor.

O teste de fabricação do molde em borracha de silicone funcionou, e produziu um modelo de teste satisfatório para os propósitos deste estudo. No entanto, é um processo "volátil". O silicone líquido, após seu preparo, pode variar seu tempo de cura ou acumular bolhas com muita facilidade, podendo causar certa imprevisibilidade no processo para quem não é acostumado com o manuseio.

A produção da réplica foi feita com água e aglutinantes como cimento e gesso, e também gerou resultado satisfatório. Algumas observações quanto ao resultado:

- Algumas bolhas de material surgiram devido ao acúmulo de bolhas de ar no molde.
- Partes frágeis da peça quebraram no processo de desenformar. Uma maneira fácil de prevenir este problema é aumentando a espessura da peça, ou dividindo o modelo e criando moldes individuais para as partes frágeis.
- É vantajoso um bom conhecimento de materiais, foram testadas algumas proporções diferentes de aglutinantes, e cada mistura apresentou particularidades. As peças variaram bastante entre si no que diz respeito a tempo de cura, e resistência mecânica.

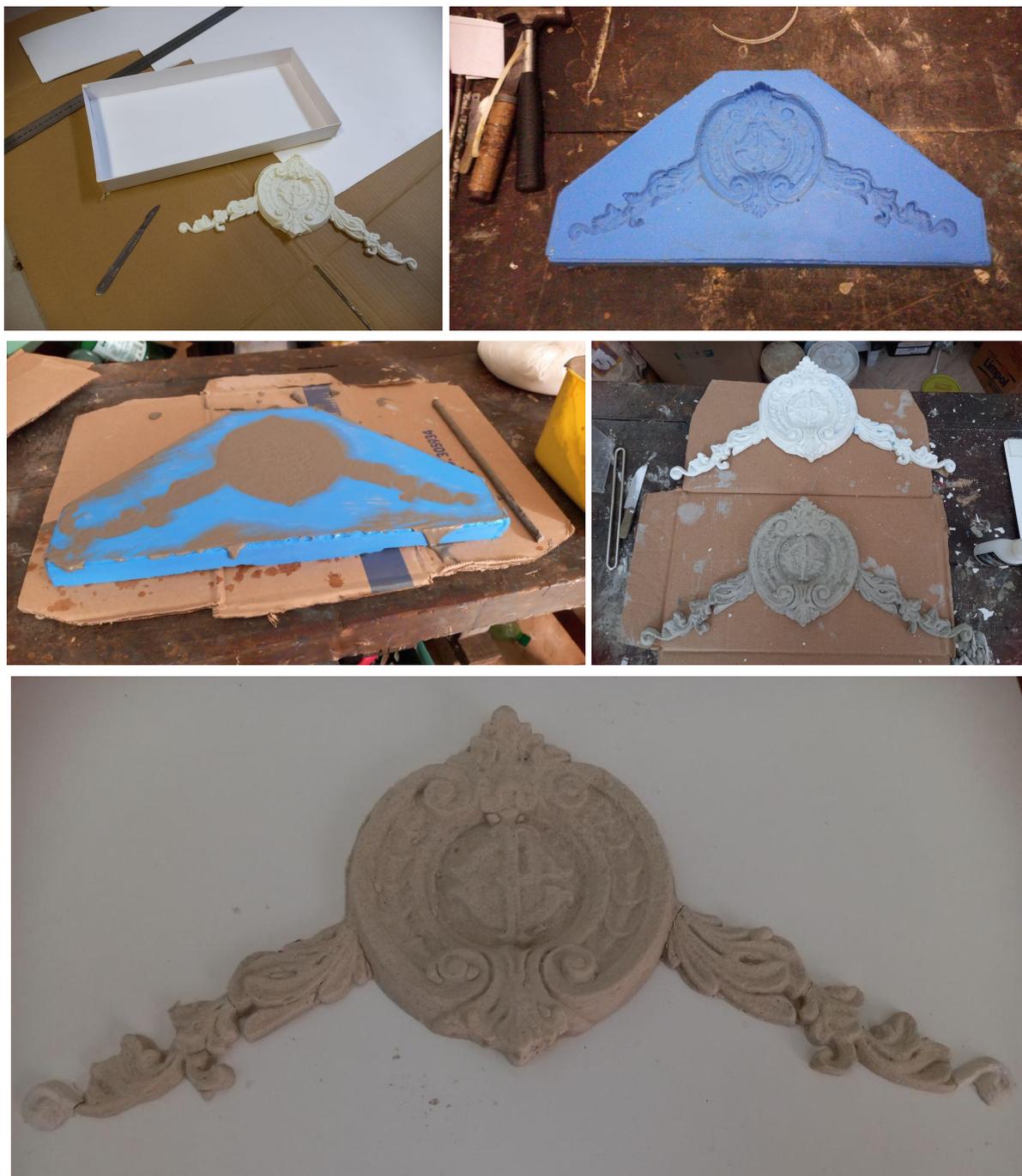


Figura 42: Processo de fabricação de protótipo em argamassa, desde a manufatura do molde utilizando uma impressão de ABS como mestre, até a remoção da peça. Fonte: Acervo do Autor.

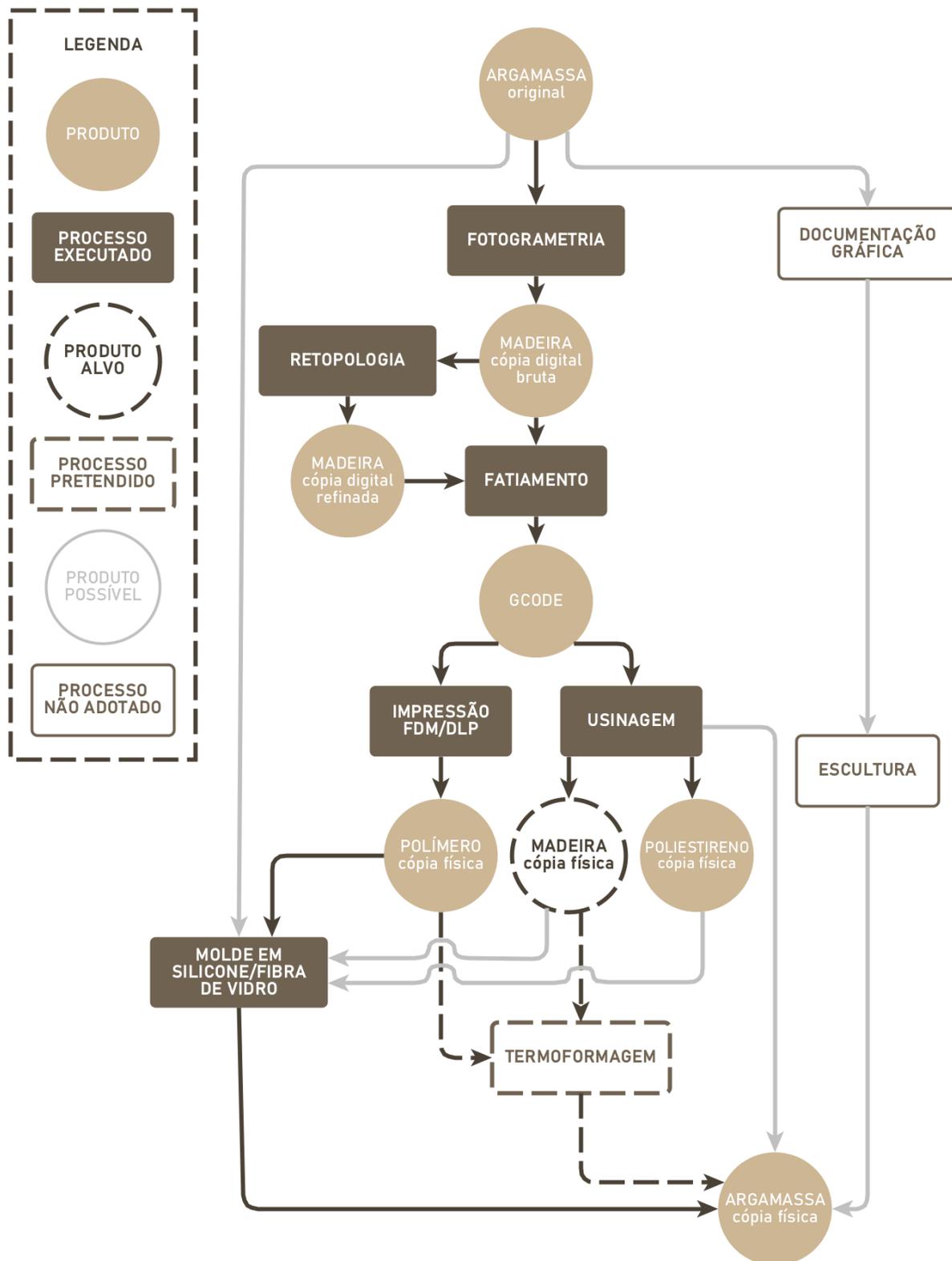
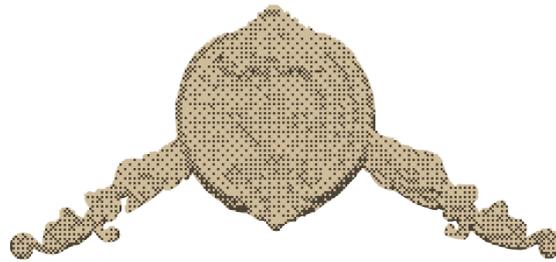


Figura 43: Processo proposto a ornamentos de argamassa aplicado ao ornamento da fachada da Farmácia Oswaldo Cruz. Fonte:

Elaborado pelo autor.



Considerações Finais

Para além do aspecto social e humanitário, a presença da pandemia do coronavírus durante o período da elaboração deste trabalho foi um revés frequente. Gerando uma série de dificuldades, seja para comunicação, visitas para realização de levantamentos, organização de maquinário e testes, etc. Não obstante, conseguiu-se agregar uma quantidade razoável de testes, validar a maioria dos processos propostos, e levantar uma série de questionamentos a serem levados em diante.

Ao longo de um trabalho com tantas ferramentas e processos, é custoso buscar alternativas e desenvolver comparativos categóricos para cada um. Somado a isso, há a infinidade de possíveis formas das peças estudadas, que são outro fator determinante nas dificuldades de cada processo, e o surgimento constante de novas ferramentas. Num fluxo tantas variáveis, há muito que ainda se pode esmiuçar em cada processo individual.

Scoppigno et al. (2017) apresentam um levantamento compreensivo de várias técnicas de fabricação digital aplicadas especificamente ao patrimônio cultural, que informaram esse trabalho nos seus estágios iniciais.

Techniques	Cost	Ease of use	Geometric freedom	Material adequacy to CH	Precision	Working size
<i>Subtractive Techniques</i>						
2.5D CNC Carving	low/medium	low	low	high	high	mm to m
6-Axis CNC Carving	high	very low	medium	high	high	mm to m
<i>Additive Techniques</i>						
FDM	very low/medium	medium/high	medium	low	medium/high	cm to dm
LOM	medium	medium	low	medium	medium	cm to dm
Gypsum binding	medium	medium	very high	medium/high	medium/high	cm to dm
Metal Sintering	very high	low	very high	medium	medium/high	mm to cm
Plastic Sintering	very high	medium	very high	medium	medium/high	mm to dm
Photopolymerization	high	medium/high	medium	low	high/very high	mm to dm

Figura 44: Tabela comparativa entre as técnicas de fabricação digital aplicadas ao patrimônio cultural. (Scoppigno et al., 2017)

Este comparativo, agora ao fim do trabalho levantou a questão do levantamento de outros comparativos que ainda não foram explorados neste trabalho, principalmente na escala específica do ornamento: Compatibilidade de formas de ornamentos com processos de fabricação, compatibilidade de métodos de fabricação entre si, análises de custos, etc.

Existe também outra discussão possível de ser levantada sobre quais são os graus de abstração de um objeto levantado por uma reconstrução automática. Principalmente quando se põe em perspectiva o produto que é o modelo poligonal de um ornamento com uma textura fotográfica sobreposto à ideia do ornamento original. Como cada etapa altera forma e materialidade mas transpõe o signo do objeto. E em que ponto se perde a ideia do objeto.

Por fim, é fato que este é um tema longe de estar esgotado, tanto no que diz respeito à técnica, quanto conceitualmente.

Referências Bibliográficas

3DFLOW. **3DF Zephyr Photography guide**. Disponível em:

<https://www.3dflow.net/technology/documents/photogrammetry-how-to-acquire-pictures/> Acesso em: 9/02/2022

ALICEVISION. **Meshroom Manual**. Disponível em:

<https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/capturing/capturing.html>. Acesso em: 02 abr. 2021.

ALSHAWABKEH, Yahya; HAALA, Norbert. Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing** v. 35, p. B5 , 2004.

BRASIL. Decreto nº 9377, de 17 de maio de 2018. . Distrito Federal.

CASTRO, José Liberal De. Arquitetura eclética no Ceará. In: FABRIS, Annateresa (Org.). . **Ecletismo na Arquitetura Brasileira**. São Paulo: Nobel, 1987. p. 208–255.

COELHO, Francisco Carvalho de Arruda; MONTEIRO, Livia Maria de Sousa. ASPECTOS HISTÓRICOS E ESTADO DE CONSERVAÇÃO DA IGREJA DE ALMOFALA-CEARÁ (BRASIL). In: CONGRESO IBEROAMERICANO Y XI JORNADA DE TÉCNICAS DE REPARACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO, 3., 2013, La Plata. **Artigo**. La Plata: Sedici, 2013. p. 1-10.

DRAP, Pierre; GRUSSENMEYER, Pierre; HARTMANN-VIRNICH, Andreas. Photogrammetric stone-by-stone survey and archeological knowledge: an application on the Romanesque Priory Church Notre-Dame d' Aleyrac. In: VAST2000 EUROCONFERENCE, 2000, Provence. **Anais...** Provence: [s.n.], 2000. p.139–145. 978-0-7493- 9764-7.

FORTALEZA-CE. ANDRÉ QUINTINO. **Parque da Liberdade - Cidade da Criança**. 2017. Disponível em: <https://mapacultural.secult.ce.gov.br/espaco/277/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

FORTALEZA-CE. ANDRÉ QUINTINO. **Farmácia Oswaldo Cruz**. 2015. Disponível em: <https://mapacultural.secult.ce.gov.br/espaco/241/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

GROETELAARS, Natalie Johanna. **CRIAÇÃO DE MODELOS BIM A PARTIR DE "NUVENS DE PONTOS"**: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. 2015. 372 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

ICOMOS. **Carta de Veneza**. . [S.l: s.n.]. , 1964

ICOMOS GENERAL ASSEMBLY, 11., 1996, Sofia, Bulgaria. **PRINCIPLES FOR THE RECORDING OF MONUMENTS, GROUPS OF BUILDINGS AND SITES**. Charenton-Le-Pont, França: Icomos, 1996. 4 p. Disponível em: <https://www.icomos.org/charters/archives-e.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2021.

MACHADO, Jesus. **IMAGEM ESPAÇO. IMAGEM OBJETO – TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA REPRESENTAÇÃO DO PROJETO ARQUITETÔNICO**. *In*: Encontro de Iniciação Científica, XXXIX., 2021, Fortaleza-CE. Pôster Digital... Fortaleza-CE: Universidade Federal do Ceará, 2021. Disponível

em:<https://eu2020.ufc.br/t/imagem-espaco-imagem-objeto-tecnologias-digitais-para-representacao-do-projeto-arquitetonico/>

MOREIRA, Eugênio et al. Documentation and digital fabrication methods for restoration of eclectic metal ornaments. In: CELANI, Gabriela; KANOUN, Olfa (Orgs.). . **Frontiers of Science and Technology**. Berlin, Boston: De Gruyter, 2017.

NOGUEIRA, Fabiano Mikalauskas de Souza. **A Representação de Sítios Históricos: documentação arquitetônico digital**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

NOGUEIRA, João Lucas Vieira. **Fortaleza mestiça**: aquém dos ideais, além das saudades. 2019. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Comunicação e Semiótica, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2019. Cap. 1.

NOGUEIRA, João Lucas Vieira *et al.* Uso da fabricação digital nos processos de restauração: o retábulo do altar da Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário de Russas - CE. In: 3º SIMPÓSIO CIENTÍFICO DO ICOMOS BRASIL, 2019, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2019. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/iii-simposio-icomos-brasil/148863-uso-da-fabricacao-digital-nos-processos-de-restauracao-o-retabulo-do-altar-da-igreja-matriz-de-nossa-senhora-do-/>. Acesso em: 21 nov. 2019.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. **A documentação como Ferramenta de Preservação da Memória**: Cadastro, Fotografia, Fotogrametria e Arqueologia. Brasília: IPHAN/Programa Monumenta, 2008.

PEDRONI, Fabiana. Por uma definição do ornamento publisher: Unicamp Campinas, SP. In: IX ENCONTRO DE HISTÓRIA DA ARTE, 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2013. p.80–85.

PONTE, Sebastião Rogério. **Fortaleza Belle Époque**: reforma urbana e controle social. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2014.

SCOPIGNO, R. *et al.* Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey: Fabrication Techniques for Cultural Heritage. **Computer Graphics Forum** v. 36, n. 1, p. 6–21 , jan. 2017.

TOLENTINO, Mônica Martins Andrade. **A utilização do HBIM na documentação, na gestão e na preservação do Patrimônio Arquitetônico**. 2018. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

TOLENTINO, Mônica Martins Andrade. A utilização do HBIM na documentação, na gestão e na preservação do Patrimônio Arquitetônico. In: XX CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 2016, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires, Argentina: Editora Blucher, 2016. p.510–518. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/24842>>. Acesso em: 01 set. 2021.

VARELA, Pedro Azambuja; SOUSA, José Pedro De. Digital Flow in Stone Heritage Buildings: the Nasoni Keystone Experiment. In: ECAADE 2015, 2015, Vienna, Austria. **Anais...** Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 2015. p.717–726.

