



**ENTRE O DIGITAL E O FÍSICO: MODELAGEM PARAMÉTRICA E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO  
DIGITAL NA INVESTIGAÇÃO DE OBJETOS ARQUITETÔNICOS**

João Gabriel Costa e Silva  
Prof. Associado Dr. Marcelo Tramontano

São Carlos, 2024  
Nomads.usp Núcleo de Estudos de Habitares Interativos  
Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos  
Universidade de São Paulo

**ENTRE O DIGITAL E O FÍSICO: MODELAGEM PARAMÉTRICA E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO DIGITAL NA INVESTIGAÇÃO DE OBJETOS ARQUITETÔNICOS**

Relatório final de atividades de Iniciação  
Científica apresentado ao Programa  
Unificado de Bolsas da Universidade de São  
Paulo

Bolsista: João Gabriel Costa e Silva  
Nº USP: 14673460  
[joaogcosta@usp.br](mailto:joaogcosta@usp.br)

Orientador: Prof. Associado Dr. Marcelo Tramontano  
[tramont@sc.usp.br](mailto:tramont@sc.usp.br)

## **RESUMO**

Esta pesquisa se insere no contexto dos projetos de bolsa de pesquisa universitária (PUB) realizados por João Gabriel Costa e Silva, aluno de graduação em Arquitetura e Urbanismo no Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP). Sob a orientação do Professor Associado Dr. Marcelo Claudio Tramontano, pesquisador principal do núcleo de pesquisa Nomads.usp, situado no campus USP São Carlos, o estudo é intitulado "Entre o Digital e o Físico: Modelagem Paramétrica e Processos de Fabricação Digital na Investigação de Objetos Arquitetônicos".

Este projeto acadêmico visa aprofundar o entendimento da arquitetura paramétrica e dos processos de fabricação digital, com foco na análise da lógica subjacente à geração de formas complexas na arquitetura contemporânea. O projeto se insere em um plano de pesquisa mais amplo concebido pelo referido núcleo de pesquisa, que inclui a concepção de um pavilhão arquitetônico utilizando componentes da linguagem paramétrica.

Além de investigar as características intrínsecas do pavilhão e seu processo de concepção, tais como montagem, desmontagem e vedação, a pesquisa se propõe a analisar a abordagem pedagógica empregada para instruir os participantes do programa acerca do projeto arquitetônico.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Pesquisador mestrando Caio Muniz cortando peças durante a capacitação	6
Figura 2: Modelo reduzido em <i>waffle</i> produzido durante a capacitação	6
Figura 3: Modelo reduzido do algoritmo de atração	7
Figura 4: Modelo reduzido do algoritmo de atração	7
Figura 5: Processo de corte das peças do modelo reduzido inspirado em Metropol Parasol	9
Figura 6: Testes realizados para fabricação dos chaveiros na impressora 3D	12
Figura 7: Processo de corte dos chaveiros Nomads.usp	12
Figura 8: Processo de impressão dos chaveiros com logo do IAU USP	13
Figura 9: Corte das peças em waffle de um dos grupos do curso de difusão	13
Figura 10: Poster de divulgação do segundo curso de difusão	15
Figura 11: Desenho esquemático do sistema de vedação do pavilhão	16
Figura 12: Desenvolvimento do sistema de vedação do pavilhão no <i>software Rhinoceros</i>	17
Figura 13: Verificação de escala dos moldes cortados em papel paraná	18
Figura 14: Peças das conchas 1 e 2 cortadas sobre o deck da maquetaria	18
Figura 15: Modelo reduzido do pavilhão fabricado pela impressora 3D	20
Figura 16: Modelo reduzido do pavilhão cortado em MDF pela cortadora a laser	21
Figura 17: Desenho esquemático das conexões estruturais do pavilhão	22
Figura 18: Fundação de uma das conchas pronta antes da fixação no solo	23
Figura 19: Processo de montagem do pavilhão	23
Figura 20: Progresso alcançado na montagem do pavilhão experimental	24

## **ÍNDICE**

<b>I INTRODUÇÃO: PLANO DE PESQUISA</b>	<b>1</b>
<b>II JUSTIFICATIVA</b>	<b>1</b>
<b>III OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>IV METODOLOGIA E ETAPAS</b>	<b>2</b>
<b>V DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</b>	<b>2</b>
5.1 ETAPAS DE TRABALHO	3
5.2 CRONOGRAMA	4
<b>VI APROXIMAÇÕES INICIAIS</b>	<b>5</b>
6.1 ESTUDOS PRELIMINARES	5
6.2 CAPACITAÇÃO NO USO DAS MÁQUINAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL	5
6.3 IMPLEMENTAÇÃO E PRODUÇÃO DE MODELOS FÍSICOS	7
6.3.1 Algoritmos de Mapeamento	7
6.3.2 Metropol Parasol	8
<b>VII CURSO I: “DO DIGITAL AO MATERIAL: MODELAGEM PARAMÉTRICA E FABRICAÇÃO DIGITAL NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA”</b>	<b>10</b>
7.1 INTRODUÇÃO AO PROJETO	10
7.2 PLANEJAMENTO	11
7.3 MONITORIA EM FABRICAÇÃO DIGITAL	11
7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	14
8.1 INTRODUÇÃO AO PROJETO	14
8.2 PLANEJAMENTO E CONCEITUAÇÃO	15
8.3 FABRICAÇÃO DIGITAL NA CONFECÇÃO DE MOLDES EM PAPEL PARANÁ	17
8.4 MODELOS REDUZIDOS DO PAVILHÃO	19
8.5 IMPRESSORA 3D	20
8.6 CORTADORA A LASER	20
8.7 MONTAGEM DO PAVILHÃO	21
<b>IX CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>24</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>26</b>

## I INTRODUÇÃO: PLANO DE PESQUISA

A pesquisa tem como princípio o estudo da arquitetura paramétrica com a exploração em algoritmos digitais que envolvem processos de lógica matemática. A revisão da literatura de autores pioneiros da área, como Woodbury (2010) e Nick Dunn (2012) fez-se necessária para maior compreensão do tema. O projeto acompanha outras pesquisas do Nomads.usp - Núcleo de Estudos de Habitações Interativos do IAU-USP ([www.nomads.usp.br](http://www.nomads.usp.br)) na formação de um grupo de pesquisadores que consiga cobrir todas as vertentes existentes na arquitetura paramétrica na fabricação e construção do projeto final, um pavilhão experimental.

No âmbito dos objetivos específicos, pretende-se inicialmente implementar algoritmos de modelagem paramétrica que possibilitem a geração e manipulação de modelos digitais com base em parâmetros variáveis. Isso permitirá uma abordagem flexível e iterativa no desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas, possibilitando ajustes e refinamentos em resposta a diferentes critérios de projeto. Em seguida, busca-se explorar os processos de fabricação digital e máquinas de controle numérico para a produção física dos modelos concebidos digitalmente. A utilização dessas tecnologias permitirá a materialização precisa e eficiente das formas geométricas complexas, possibilitando a realização de experimentações físicas e a visualização tangível dos conceitos projetuais.

Além disso, foram realizados dois cursos de difusão pelo núcleo de pesquisa Nomads.usp, nos quais pude participar ativamente como monitor e aplicar o conhecimento adquirido ao decorrer da pesquisa nas atividades realizadas durante os cursos. O primeiro curso, nomeado “Do Digital ao Material: Modelagem Paramétrica e Fabricação Digital na Concepção Arquitetônica” teve como principal objetivo o ensino de projeto com a implementação de algoritmos matemáticos e desenvolvimento de estruturas pavilhonianas de formas complexas. Já o segundo, intitulado “Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental” teve como atividade principal a participação dos pesquisadores e participantes inscritos no curso na construção de um pavilhão paramétrico experimental implantado no gramado da maquetaria do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP.

Este relatório apresenta a metodologia utilizada ao decorrer da pesquisa, o progresso alcançado, os desafios enfrentados e os passos tomados para alcançar os objetivos propostos. Através dessa pesquisa, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento e prática no campo da arquitetura digital, explorando novas formas de concepção e fabricação de estruturas arquitetônicas complexas.

## II JUSTIFICATIVA

A pesquisa tem como justificativa a necessidade de explorar as potencialidades da arquitetura paramétrica e dos processos de fabricação digital na contemporaneidade, avaliando sua relevância no contexto brasileiro. Diante do avanço tecnológico e da crescente influência dos meios digitais na prática arquitetônica, torna-se imperativo investigar como essas tecnologias podem informar e transformar o processo de design e construção de estruturas arquitetônicas complexas.

A assim chamada arquitetura paramétrica, aliada aos algoritmos digitais, oferece novas abordagens no desenvolvimento de projetos arquitetônicos, permitindo uma manipulação flexível e iterativa de formas. Isso resulta em maior eficiência e precisão no processo de design, além de possibilitar a criação de estruturas mais orgânicas e adaptáveis.

Os processos de fabricação digital, que se utilizam de máquinas de controle numérico, representam uma evolução na materialização dos projetos concebidos digitalmente. Essas tecnologias proporcionam a produção de formas geométricas complexas com precisão e eficiência, viabilizando experimentações físicas e a visualização tangível dos conceitos projetuais.

Além disso, a pesquisa busca contribuir para a formação de profissionais e estudantes de arquitetura, oferecendo *insights* sobre as novas possibilidades na integração entre o digital e o físico na prática arquitetônica. A divulgação dos resultados por meio de uma plataforma web dedicada visa promover a transparência e a colaboração no campo da arquitetura digital.

Portanto, a pesquisa espera responder à demanda por inovação e eficiência na prática

arquitetônica contemporânea, visando explorar novas abordagens de concepção e fabricação de estruturas arquitetônicas complexas e contribuir para o avanço do conhecimento e da prática no campo da arquitetura digital, no Brasil.

### III      OBJETIVOS

A presente pesquisa propõe **investigar o potencial e os desafios inerentes à utilização de algoritmos de modelagem paramétrica e processos de fabricação digital na produção de objetos arquitetônicos caracterizados por formas geométricas complexas**. O objetivo geral é **estudar como essas tecnologias podem ser integradas de maneira eficiente e inovadora no processo de design e fabricação arquitetônica, buscando otimizar não apenas a complexidade formal, mas também a viabilidade técnica e econômica dos projetos**.

No âmbito dos objetivos específicos, pretende-se, em primeiro lugar, implementar algoritmos de modelação paramétrica que permitam a geração e manipulação de modelos numéricos baseados em parâmetros variáveis. Isto permitirá uma abordagem flexível e interativa ao desenvolvimento de formas arquitetônicas complexas que podem ser adaptadas e refinadas de acordo com diferentes critérios de projeto.

Em seguida, busca-se explorar os processos de fabricação digital e máquinas de controle numérico para a produção física dos modelos concebidos digitalmente. A utilização dessas tecnologias permitirá a materialização precisa e eficiente das formas geométricas complexas, possibilitando a realização de experimentações físicas e a visualização tangível dos conceitos projetuais.

Por fim, será desenvolvida e mantida uma página web dedicada à pesquisa, hospedada no website do Nomads.usp, onde serão compartilhados publicamente os resultados parciais e finais do estudo, bem como os dados selecionados e produzidos ao longo da investigação. Essa plataforma servirá como um meio de disseminação do conhecimento gerado, promovendo a transparência e a colaboração no campo da arquitetura digital.

### IV      METODOLOGIA E ETAPAS

Em primeiro instante, foi utilizada a abordagem de pesquisa exploratória para maior familiarização com o assunto do tema de pesquisa, arquitetura e modelagem paramétrica, para que assim pudesse dominar o assunto e criar modelos a partir do conhecimento adquirido. Nessa etapa, a revisão bibliográfica foi muito importante para compreensão teórica das lógicas matemáticas e técnicas que seriam aplicadas nos programas computacionais do estudo.

Em seguida, após adquirir um entendimento sólido da teoria e dos meios digitais disponíveis, foi realizada uma fase de experimentação prática no aplicativo *Rhinoceros*, utilizando o *plug-in Grasshopper*. Durante esta etapa, foram desenvolvidos protótipos e modelos conceituais para explorar as possibilidades oferecidas pela arquitetura e modelagem paramétrica. Esses protótipos foram iterados e refinados com base em *feedbacks* obtidos por meio de revisões internas e externas, permitindo uma evolução gradual do processo de design.

Em paralelo, foram realizados estudos de caso e análises comparativas de projetos similares desenvolvidos com técnicas tradicionais de modelagem, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens da abordagem paramétrica em relação aos métodos convencionais. Estas análises contribuíram para embasar as decisões de projeto e fornecer insights sobre como otimizar o uso da modelagem paramétrica para atender aos requisitos específicos do projeto em questão.

Por fim, os resultados obtidos foram documentados e analisados criticamente, permitindo a identificação de lições aprendidas e áreas de aprofundamento para futuros projetos. Além disso, foram elaboradas recomendações para a aplicação eficaz da arquitetura e modelagem paramétrica em contextos diversos, visando maximizar os benefícios dessa abordagem e superar eventuais desafios enfrentados ao longo do processo.

### V      DETALHAMENTO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

## 5.1 ETAPAS DE TRABALHO

**Etapa 1. Criação de website da pesquisa e disponibilização de resultados parciais e finais.** Alimentação contínua de website da pesquisa hospedado no servidor <http://www.nomads.usp.br> para divulgação e disponibilização dos resultados parciais e finais da pesquisa;

**Etapa 2. Revisão bibliográfica.** Revisão da literatura técnica científica que estabelece conexões entre objetos arquitetônicos – especificamente pavilhões –, modelagem paramétrica e processos de fabricação digital;

**Etapa 3. Definição de projetos de pavilhões de interesse.** A partir da Revisão Bibliográfica e da exploração da base de dados sobre projetos de arquitetura produzido pelo Nomads.usp (ver item 2), foram selecionados, para estudo, projetos de pavilhões arquitetônicos cuja produção tenha envolvido modelagem paramétrica e processos de fabricação digital;

**Etapa 4. Estudo de projetos de pavilhões.** Estudo dos projetos selecionados na etapa 3 com o levantamento dos programas e recursos computacionais envolvidos na modelagem, bem como de parâmetros, questões arquitetônicas e tecnologias (digitais ou não) empregadas na sua produção e montagem;

**Etapa 5. Levantamento de scripts de modelagem paramétrica.** Foram levantados *scripts* de modelagem paramétrica para a produção de modelos digitais. Este levantamento foi realizado com base tanto na bibliografia proposta, quanto na busca em repositórios e bases de dados *online* de *scripts*;

**Etapa 6. Produção de modelos físicos e digitais.** Foram produzidos modelos físicos e digitais com a implementação de algoritmos de modelagem paramétrica. Os modelos têm base nos estudos de pavilhões e levantamentos realizados;

**Etapa 7. Avaliação dos resultados parciais.** Discussão e avaliação coletiva com pesquisadores do núcleo sobre os resultados parciais da pesquisa;

**Etapa 8. Relatório parcial.** Produção de relatório parcial de atividades.

**Etapa 9. Entrevistas.** Entrevistas com pesquisadores externos da área, visando ampliar a compreensão do bolsista sobre os assuntos tratados, e também com o objetivo de avaliar preliminarmente os resultados parciais obtidos;

**Etapa 10. Experimento.** Participação no experimento de produção de um pavilhão arquitetônico, junto a outros pesquisadores e profissionais da área da arquitetura e do urbanismo, envolvendo o planejamento, as discussões e a escolha e implementação de algoritmos, bem como na fabricação de componentes e montagem do pavilhão;

**Etapa 11. Análise dos resultados finais.** Discussão e avaliação coletiva dos resultados finais da pesquisa em conjunto com o professor orientador e outros pesquisadores do Nomads.usp que tenham pesquisas relacionadas;

**Etapa 12. Divulgação científica (SIICUSP).** Apresentação do trabalho no Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP) como parte das atividades de avaliação por pares, bem como atividade de divulgação científica. Note-se que o mês da pesquisa em que deverá ocorrer a atividade está condicionado ao cronograma a ser

definido pela Universidade de São Paulo para o evento, de modo que sua posição no cronograma é apenas uma previsão;

**Etapa 13. Produção de artigo acadêmico.** Produção de artigo em formato acadêmico a partir das atividades desenvolvidas, avaliações e resultados finais obtidos. Em co-autoria com outros pesquisadores do Nomads.usp, esta etapa, faz parte das atividades de avaliação por pares e divulgação da pesquisa;

**Etapa 14. Produção de Relatório Científico final.** Produção do relatório final e atualização final do website e divulgação nas páginas do Nomads.usp em redes sociais.

## 5.2 CRONOGRAMA

	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Etapa 1</b> WEBSITE												
<b>Etapa 2</b> REVISÃO												
<b>Etapa 3</b> DEFINIÇÃO												
<b>Etapa 4</b> ESTUDO												
<b>Etapa 5</b> SCRIPTS												
<b>Etapa 6</b> MODELOS												
<b>Etapa 7</b> RESULTADOS												
<b>Etapa 8</b> RELATÓRIO												
<b>Etapa 9</b> ENTREVISTAS												
<b>Etapa 10</b> EXPERIMENTO												
<b>Etapa 11</b> RESULTADOS												
<b>Etapa 12</b> DIVULGAÇÃO												
<b>Etapa 13</b> ARTIGO												
<b>Etapa 14</b> RELATÓRIO												

## VI APROXIMAÇÕES INICIAIS

### 6.1 ESTUDOS PRELIMINARES

Em primeiro instante, foi utilizada a abordagem de pesquisa exploratória para maior familiarização com o assunto do tema de pesquisa, arquitetura e modelagem paramétrica, para que assim pudesse dominar o assunto e criar modelos a partir do conhecimento adquirido. Nessa etapa, a revisão bibliográfica foi muito importante para compreensão teórica das lógicas matemáticas e técnicas que seriam aplicadas nos programas computacionais do estudo.

O estudo de pavilhões que utilizam formas complexas geradas por algoritmos possibilitou uma maior compreensão do tema para a elaboração final do pavilhão experimental. Em seguida, após adquirir um entendimento sólido da teoria e dos meios digitais disponíveis, foi realizada uma fase de experimentação prática no aplicativo *Rhinoceros*, utilizando o *plug-in Grasshopper*. Durante esta etapa, foram desenvolvidos protótipos e modelos conceituais para explorar as possibilidades oferecidas pela arquitetura e modelagem paramétrica. Esses protótipos foram iterados e refinados com base em *feedbacks* obtidos por meio de revisões internas e externas, permitindo uma evolução gradual do processo de design.

Em paralelo, foram realizados estudos de caso e análises comparativas de projetos similares desenvolvidos com técnicas tradicionais de modelagem, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens da abordagem paramétrica em relação aos métodos convencionais. Dentre os pavilhões estudados nesse momento, o Metropol Parasol de Sevilha serviu como inspiração para a fabricação de um modelo físico reduzido em *Waffle*, utilizando *scripts* computacionais pelo *Grasshopper*. Estas análises contribuíram para embasar as decisões de projeto e fornecer insights sobre como otimizar o uso da modelagem paramétrica para atender aos requisitos específicos do projeto em questão.

Por fim, os resultados obtidos foram documentados e analisados criticamente, permitindo a identificação de lições aprendidas e áreas de aprofundamento para futuros projetos. Além disso, o conhecimento adquirido durante o estudo teórico serve para a aplicação eficaz da arquitetura e modelagem paramétrica em contextos diversos, visando maximizar os benefícios dessa abordagem e superar eventuais desafios enfrentados ao longo do processo.

### 6.2 CAPACITAÇÃO NO USO DAS MÁQUINAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

No início das atividades de pesquisa, foram feitos exercícios de prática usando as máquinas de fabricação digital do Laboratório de Fabricação Digital e do Nomads.usp, com o uso dos algoritmos exploratórios, o que gerou os protótipos gerados durante a pesquisa. Tal etapa, considerada a base para a capacitação definitiva que visa garantir a maestria do pesquisador nas máquinas a serem utilizadas no projeto final, provou-se eficiente na qualidade obtida nos protótipos fabricados.

Visto isso, após a etapa 5 de exploração teórica, percebeu-se um maior nível de complexidade no próximo grande projeto a ser desenvolvido pelos pesquisadores. Logo, o mestrandinho Maurício José da Silva tomou a iniciativa de organizar uma capacitação em fabricação digital envolvendo todos os pesquisadores que estão envolvidos no projeto, além de pesquisadores interessados do Nomads.usp. Essa capacitação foi realizada em dois dias, sendo o dia 07/08/23 voltado para a explicação das instruções de uso da impressora 3D, localizada na sede do núcleo de pesquisa. Nesse dia, foram levados *scripts* pré-definidos, os quais foram oferecidos aos presentes para alterações dos parâmetros pré-existentes a fim de obtermos formas diferenciadas para diferentes estudos e visualização dos amplos resultados capazes de se obter com um único algoritmo.

No dia seguinte, 08/03/2024, foi realizada a capacitação técnica para as máquinas de corte a laser. Neste dia, não pude estar presente por coincidir com as aulas da graduação. Todavia, fui informado das atividades realizadas durante a capacitação. Os participantes utilizaram o *script waffle*, que consiste na fabricação de diferentes chapas que se encaixam com base nas fendas pré-definidas com base no tipo de material e no seu uso. Durante a capacitação foi novamente disponibilizado um

algoritmo pelo mestrando Maurício, o qual envolvia a técnica *waffle* e nos foi ensinado a criar superfícies curvas usando essa técnica mesmo usando chapas retas. Seguem abaixo algumas imagens dos resultados obtidos durante a capacitação.

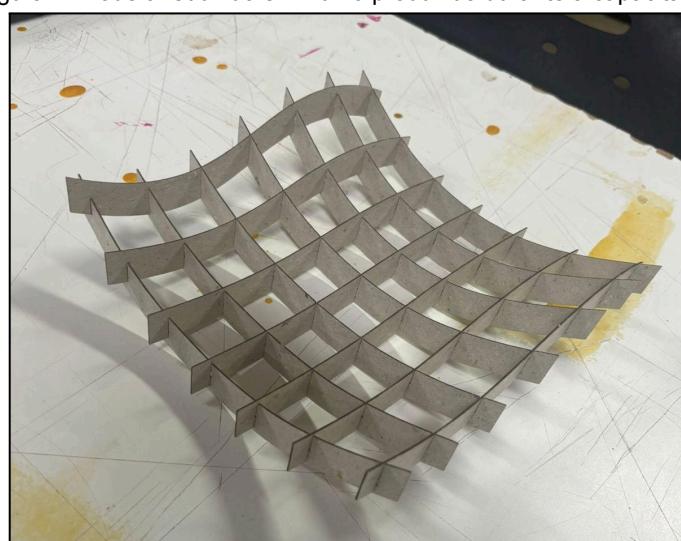
Figura 1: Pesquisador mestrando Caio Muniz cortando peças durante a capacitação



Fonte: Nomads.usp, 2023

Além da capacitação geral disponibilizada para todos os interessados no núcleo de pesquisa, os encontros semanais conduzidos pelo pesquisador Maurício — pesquisador na área de modelagem paramétrica e fabricação digital — foram de fundamental importância para o aprofundamento do conhecimento sobre o funcionamento das máquinas. Esses encontros abordaram detalhadamente as particularidades dos equipamentos, bem como os procedimentos essenciais para a manutenção rotineira e a limpeza adequada das máquinas.

Figura 2: Modelo reduzido em *waffle* produzido durante a capacitação



Fonte: Nomads.usp, 2023

## 6.3 IMPLEMENTAÇÃO E PRODUÇÃO DE MODELOS FÍSICOS

### 6.3.1 Algoritmos de Mapeamento

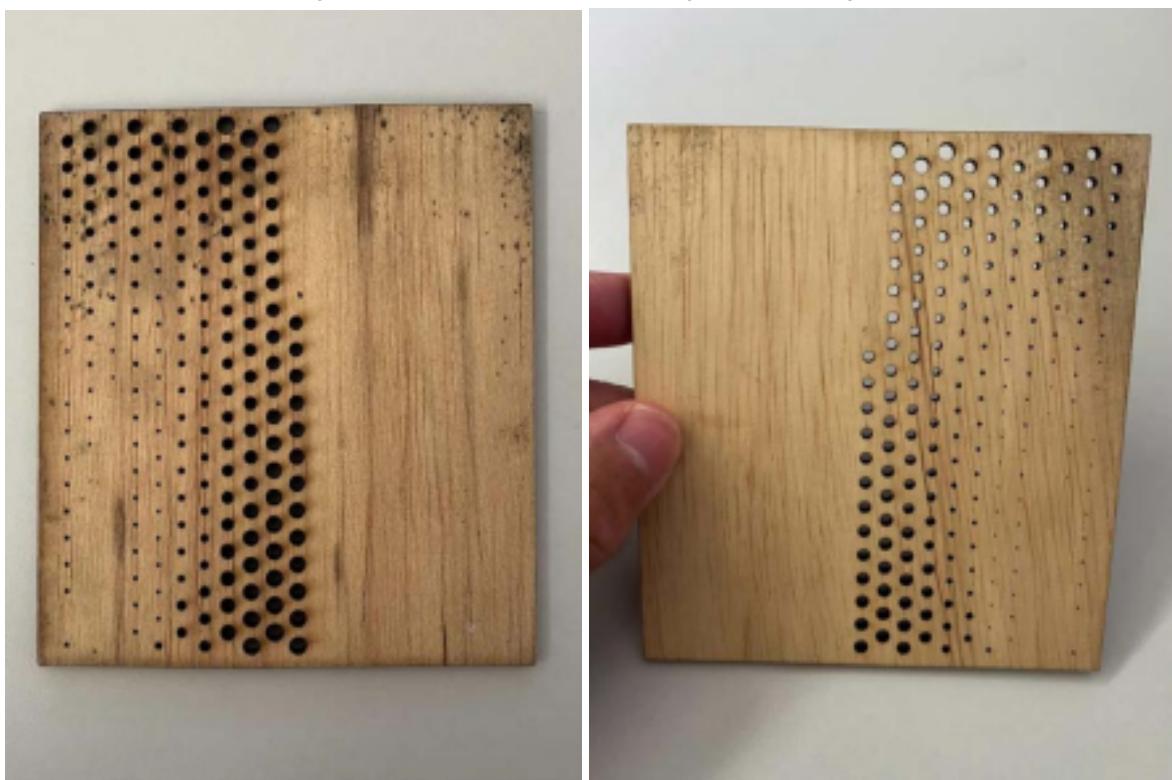
Foram realizados alguns modelos físicos como forma de aprendizado durante a pesquisa. A princípio, os algoritmos básicos explorados no início da pesquisa foram os escolhidos para a prototipagem. Dessa forma, o *script* básico de mapeamento de superfície foi o primeiro experimento prático feito durante a pesquisa, devido à sua simplicidade de execução e entendimento.

O processo que antecede a fabricação do protótipo consistiu numa breve pesquisa teórica sobre o funcionamento da lógica de mapeamento de superfície no *Grasshopper*, seguida de uma simples experiência no Laboratório de Ensino Informatizado do Instituto. Após decidir o melhor modelo para o protótipo, o arquivo foi salvo e direcionado para a cortadora a laser.

Antes do início da fabricação, o mestrandinho Maurício que me acompanhava durante o processo de estudo me orientou sobre como utilizar a máquina de fabricação digital, informando os dados corretos a serem inseridos no programa da cortadora para prevenir a danificação da mesma. Além do auxílio de uma pessoa capacitada, o próprio laboratório contém um manual físico específico para a cortadora, onde constam as informações a serem usadas no corte de diferentes tipos de madeiras.

Durante o processo de corte, a cortadora inusitadamente falhou enquanto cortava a peça, o que resultou em um protótipo incompleto. No entanto, o erro inesperado não prejudicou o resultado final da pesquisa, apenas resultou num protótipo incompleto, mas inteligível.

Figuras 3 e 4: Modelo reduzido do algoritmo de atração



Fonte: Autor, 2023

Em síntese, a investigação aprofundada dos algoritmos de mapeamento demonstrou uma importância crucial para o progresso da pesquisa, ao proporcionar uma compreensão fundamental das estruturas subjacentes aos softwares empregados ao longo do estudo. A análise desses algoritmos, que se situam na categoria de algoritmos lógicos de nível inicial, desempenhou um papel essencial na elucidação dos princípios básicos de operação desses sistemas computacionais.

Através da implementação e experimentação com modelos reduzidos gerados a partir dos algoritmos de mapeamento, foi possível desvendar progressivamente os mecanismos envolvidos na modelagem paramétrica e na subsequente fabricação dos resultados.

Este processo de desmistificação não se limitou à compreensão teórica, mas estendeu-se à prática, permitindo uma apreciação mais clara das interações entre os componentes dos algoritmos e os produtos finais obtidos. A pesquisa evidenciou que, ao manipular e ajustar os parâmetros dos algoritmos, os pesquisadores foram capazes de observar e analisar as variações e implicações resultantes, o que facilitou a obtenção de insights mais profundos sobre a eficiência e a precisão dos modelos paramétricos.

Além disso, o estudo revelou a importância de uma abordagem metodológica sistemática e fundamentada na implementação dos algoritmos, evidenciando a necessidade de uma integração harmoniosa entre teoria e prática. A experiência acumulada durante a pesquisa destacou a relevância de compreender os fundamentos lógicos dos algoritmos, bem como a necessidade de um processo contínuo de refinamento e validação dos modelos. Assim, a investigação sobre os algoritmos de mapeamento não apenas contribuiu para a compreensão dos softwares utilizados, mas também possibilitou avanços significativos na modelagem paramétrica e na fabricação associada, evidenciando o impacto profundo que o domínio dos fundamentos algorítmicos pode ter na eficácia e na precisão das soluções desenvolvidas.

### 6.3.2 Metropol Parasol

Durante a pesquisa foi realizado um estudo sobre o modelo de construção waffle com a utilização do programa *Rhinoceros* e seu *plug-in Grasshopper*. Foram analisados projetos que utilizam do mesmo método de fabricação, em especial o pavilhão Metropol Parasol, em Sevilha. O pavilhão foi estudado levando em consideração sua forma e o modo como foi fabricado e implementado no local, além do modo como suas peças foram separadamente projetadas pensando no modo como irão ser encaixadas umas nas outras.

Em primeiro instante, o estudo consistiu na análise de algoritmos pré-existentes disponíveis em fóruns relacionados à fabricação digital. Após a exploração e teste de diferentes algoritmos foi definido um modelo ideal para a fabricação, algo que remetesse o formato do modelo em estudo, mas que pudesse ser fabricado em pequena escala sem perder as características marcantes do pavilhão.

O estudo da técnica de waffle demandou mais tempo, devido à grande margem de experimentação existente na criação de formas utilizando este modelo. Foram criados modelos genéricos com a técnica a fim de definir uma forma interessante para prototipagem. Diante da dúvida na definição de uma forma waffle a ser estudada profundamente, o mestrandinho Maurício apresentou o pavilhão Metropol Parasol, em Sevilha e sugeriu a criação do mesmo de forma autônoma no programa *Rhinoceros* de modelagem 3D. Diante disso, o estudo do pavilhão foi feito no *Rhinoceros* sem nenhuma dificuldade, devido à ausência de parametrização em sua configuração. Contudo, foi proposta a criação da mesma forma sem a utilização de geometria livre como feito anteriormente. O pavilhão teria que ser totalmente parametrizado no software *Grasshopper*, enquanto o *Rhinoceros* seria usado apenas para visualização da forma.

Assim, foi desenvolvido um *script* de *waffle* que permitisse controle de todos os parâmetros da forma desejada, ideal para o estudo. Com a finalização do algoritmo e a definição de uma forma que se assemelhasse ao pavilhão em estudo, o processo de prototipagem foi iniciado, começando com a planificação da forma e separação de cada uma das peças a serem cortadas.

Figura 5: Processo de corte das peças do modelo reduzido inspirado em Metropol Parasol



Fonte: Autor, 2023

Após o corte, com todas as peças do projeto cortadas e organizadas, a montagem foi feita manualmente juntando cada uma delas pelas frestas definidas no algoritmo, levando em consideração a espessura da madeira utilizada no projeto – MDF (Medium Density Fiberboard) 3mm. A montagem foi simples e rápida devido à prévia organização das peças no *software* de corte a laser seguindo a ordem de montagem e demandou apenas cola instantânea para sua finalização.

O estudo realizado com base no pavilhão em questão revelou-se de extraordinária relevância e interesse para a pesquisa, principalmente devido ao fato de que envolveu a aplicação de um algoritmo significativamente mais avançado e à criação autônoma de um *script* desenvolvido por mim. O pavilhão em análise adota a técnica de Waffle, uma abordagem frequentemente utilizada na modelagem paramétrica e na arquitetura, conhecida por sua aparente simplicidade visual. No entanto, uma exploração mais aprofundada do algoritmo subjacente e a iniciativa de desenvolver uma alternativa desde os fundamentos possibilitaram uma compreensão mais detalhada do funcionamento desta técnica estrutural.

A modelagem de *waffle*, embora visualmente acessível e amplamente empregada, apresenta uma complexidade intrínseca que se torna mais evidente quando se investiga seu funcionamento a um nível mais profundo. O processo de desenvolvimento de um *script* do zero permitiu-me não apenas analisar a implementação técnica da abordagem Waffle, mas também compreender os desafios e as nuances associadas à sua aplicação em contextos paramétricos. Este aprofundamento revelou as particularidades da técnica e elucidou como projetistas que utilizam programas paramétricos abordam e resolvem problemas estruturais complexos, possibilitando um aprimoramento contínuo e refinamento das técnicas utilizadas.

O pavilhão Metropol Parasol destacou-se como um dos elementos mais significativos para o avanço da pesquisa devido a vários fatores inter-relacionados. Em primeiro lugar, a escolha deste pavilhão não foi apenas uma decisão estética, mas estratégica, uma vez que sua utilização da técnica

de Waffle proporcionou um campo fértil para a experimentação e avaliação crítica. Além disso, o Metropol Parasol, ao representar uma das estruturas mais emblemáticas e inovadoras da arquitetura contemporânea, serviu como um modelo exemplificativo para a exploração dos algoritmos e suas aplicações práticas.

O impacto da análise deste pavilhão超越了技术应用本身，提供了一种更广阔的观点，即如何通过先进的算法来优化和创新建筑项目。该研究不仅促进了对Waffle技术的深入理解，还提供了宝贵的见解，探讨了算法在参数化建模和建筑设计中的潜力。

Em conclusão, o estudo do pavilhão Metropol Parasol e o desenvolvimento do *script* associado representaram uma experiência enriquecedora que permitiu um aprofundamento significativo no entendimento da técnica de Waffle e das práticas associadas à modelagem paramétrica. Esta investigação destacou a importância de uma abordagem detalhada e crítica na aplicação de técnicas avançadas, bem como o papel fundamental da inovação e da experimentação no avanço da arquitetura contemporânea e das ferramentas de design paramétrico.

## VII CURSO I: “DO DIGITAL AO MATERIAL: MODELAGEM PARAMÉTRICA E FABRICAÇÃO DIGITAL NA CONCEPÇÃO ARQUITETÔNICA”

### 7.1 INTRODUÇÃO AO PROJETO

Um dos objetivos delineados para a presente pesquisa envolvia a participação no desenvolvimento de dois cursos especializados nas áreas de modelagem paramétrica e fabricação digital, bem como em outras disciplinas interligadas da arquitetura e urbanismo, todas dentro do escopo do núcleo de pesquisa. O primeiro curso, intitulado "Do Digital ao Material: Modelagem Paramétrica e Fabricação Digital na Concepção Arquitetônica," tinha como meta primordial a implementação de um processo de projeto arquitetônico para um pavilhão de dimensões reduzidas. Este curso englobou tanto a modelagem paramétrica quanto a fabricação digital, enfatizando a integração de princípios matemáticos na formulação da lógica algorítmica para a criação de formas complexas através de meios digitais.

Inicialmente, o plano para o curso previa que os pavilhões projetados pelas equipes participantes seriam posteriormente combinados em uma única estrutura no segundo curso. No entanto, ao longo do desenvolvimento das atividades, a proposta inicial sofreu uma reavaliação e os resultados obtidos passaram a seguir direções distintas das inicialmente previstas. O curso foi realizado em maio de 2023 e contou com a participação de 14 indivíduos, que incluíam alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) da Universidade de São Paulo (USP), bem como estudantes de outras universidades e mestrandos vinculados ao mesmo instituto. A equipe docente e de monitoria era composta por seis monitores pesquisadores do Nomads.usp, incluindo a minha pessoa, além do Prof. Dr. Assoc. Marcelo Tramontano, um dos pesquisadores principais do núcleo, além da participação voluntária de outros pesquisadores do núcleo de pesquisa, o que foi fundamental para o andamento do curso durante as monitorias e registro das atividades.

O curso foi estruturado em quatro aulas, cuja proposta pedagógica visava a aplicação prática das teorias desenvolvidas pelos monitores pesquisadores na concepção dos pavilhões projetados por todas as equipes. As equipes foram organizadas de forma equitativa, com base no nível de conhecimento prévio dos softwares a serem utilizados. Para o desenvolvimento das formas dos pavilhões, as equipes participaram de um sorteio que determinou o algoritmo a ser utilizado, que variava entre um algoritmo voltado para a geração de gráficos de funções e outro focado na função matemática propriamente dita.

O curso também abordou aspectos específicos relacionados ao desenvolvimento dos pavilhões, dividindo-se em duas vertentes principais: um grupo concentrou-se no sistema de montagem e desmontagem do pavilhão, um tema de pesquisa de Caio Muniz, mestrandando e

pesquisador do Nomads; enquanto outro grupo focou no sistema de vedação do pavilhão, tema de pesquisa do pesquisador Euler Morais. Durante as aulas, desempenhei o papel de monitor e fui responsável pelo manejo das máquinas de fabricação digital disponíveis para os participantes. Ofereci suporte na fabricação de modelos reduzidos dos projetos, o que possibilitou a visualização prática dos mesmos. Esta abordagem foi bem-sucedida, com vários grupos manifestando interesse e conseguindo fabricar protótipos de seus projetos.

A experiência adquirida durante este curso não apenas contribuiu para o desenvolvimento das habilidades dos participantes em modelagem paramétrica e fabricação digital, mas também proporcionou uma plataforma valiosa para a exploração e refinamento de técnicas e conceitos dentro da arquitetura contemporânea. A integração das teorias e práticas abordadas durante o curso demonstrou a importância de uma abordagem prática e colaborativa na formação acadêmica e no avanço da pesquisa na área de arquitetura e urbanismo.

## 7.2 PLANEJAMENTO

O planejamento teve início com uma série de reuniões estratégicas nas quais todos os pesquisadores participaram ativamente. Essas reuniões desempenharam um papel crucial na definição e coordenação das etapas do curso, garantindo uma abordagem unificada e consistente. Um dos pontos essenciais discutidos foi a atribuição de responsabilidades para cada pesquisador na supervisão. As tarefas foram designadas com base nos temas de pesquisa de cada membro da equipe, assegurando que todas as áreas do curso fossem adequadamente abordadas e que as atividades fossem bem conduzidas.

Além disso, testes preliminares foram realizados nas máquinas de fabricação digital que seriam utilizadas durante o curso alguns dias antes. Esses testes visavam garantir o perfeito funcionamento dos equipamentos e sua prontidão para atender às demandas práticas dos participantes. A realização desses testes foi fundamental para antecipar e solucionar possíveis problemas operacionais, certificando-se de que as máquinas estivessem totalmente preparadas para o curso, embora tenham ocorrido contratemplos na utilização das máquinas, evidenciando a instabilidade das mesmas e a importância de contar com uma equipe qualificada para lidar com os problemas surgidos.

O acompanhamento do desenvolvimento e da aplicação dos algoritmos utilizados no curso também foi uma parte crucial do planejamento. Foi necessário validar os algoritmos para assegurar que estivessem alinhados com os objetivos pedagógicos e fossem adequados para os projetos a serem desenvolvidos pelos participantes. A revisão contínua e o ajuste dos algoritmos foram essenciais para garantir que as ferramentas oferecidas fossem eficazes e contribuissem para o sucesso dos projetos. Os algoritmos foram revisados e reformulados antes, durante e após o curso para análise do que poderia ter ocorrido com maior eficácia e aperfeiçoamento para projetos futuros.

O planejamento do curso envolveu ainda a elaboração de materiais de apoio e recursos didáticos, a definição de cronogramas de atividades e a coordenação logística dos aspectos operacionais. A abordagem colaborativa e meticulosa adotada durante o planejamento e a execução do curso foi fundamental para o seu sucesso.

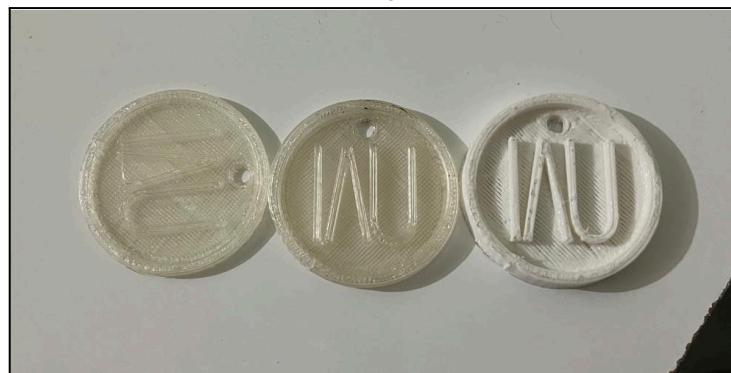
## 7.3 MONITORIA EM FABRICAÇÃO DIGITAL

Durante o curso "Do Digital ao Material: Modelagem Paramétrica e Fabricação Digital na Concepção Arquitetônica," desempenhei a função de monitor, que consistiu principalmente na documentação das atividades relacionadas à fabricação digital e ao uso das máquinas de corte a laser e impressora 3D, além de fornecer suporte geral aos participantes em relação a qualquer questão que surgisse. A capacitação prévia no uso dessas máquinas, adquirida no início da minha pesquisa, foi crucial para garantir que eu pudesse atender de maneira eficaz às necessidades das equipes durante o curso.

No primeiro dia do curso, fui incumbido de cortar chaveiros com a logo do Nomads.usp usando a cortadora a laser. No entanto, durante o processo de corte, a máquina apresentou falhas

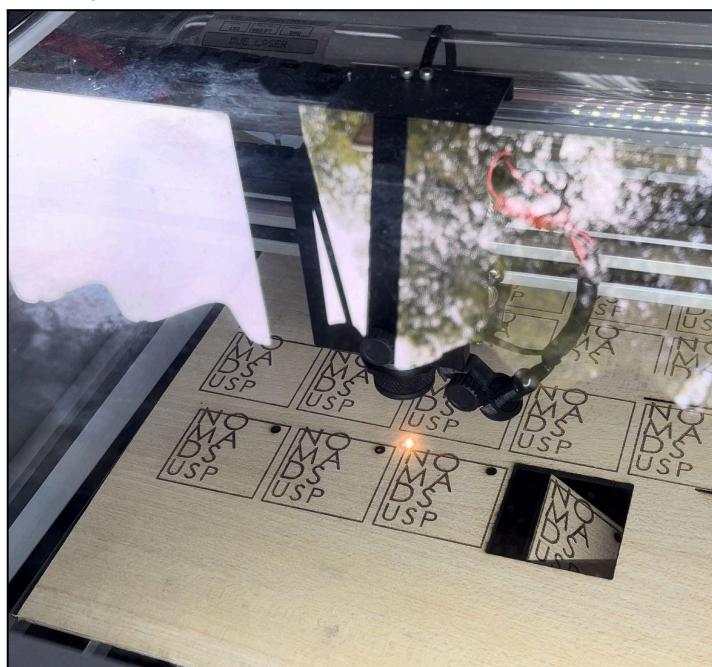
técnicas, interrompendo o processo antes da conclusão de todos os chaveiros. Isso impediu a entrega completa dos chaveiros até o final do expediente, que se deu às 18:00. Devido a essa situação, decidi que seria mais prudente aguardar até o dia seguinte para finalizar o corte dos chaveiros restantes e distribuí-los adequadamente. Além disso, para complementar a distribuição, desenvolvi um modelo 3D de chaveiro com a logo do IAU-USP e imprimi cerca de 30 cópias antes do início do segundo dia do curso. A impressora 3D funcionou de forma eficiente, permitindo a preparação dos chaveiros adicionais que foram entregues no segundo dia, junto com aqueles que foram finalizados com a cortadora a laser.

Figura 6: Testes realizados para fabricação dos chaveiros na impressora 3D



Fonte: Autor, 2024

Figura 7: Processo de corte dos chaveiros Nomads.usp



Fonte: Autor, 2024

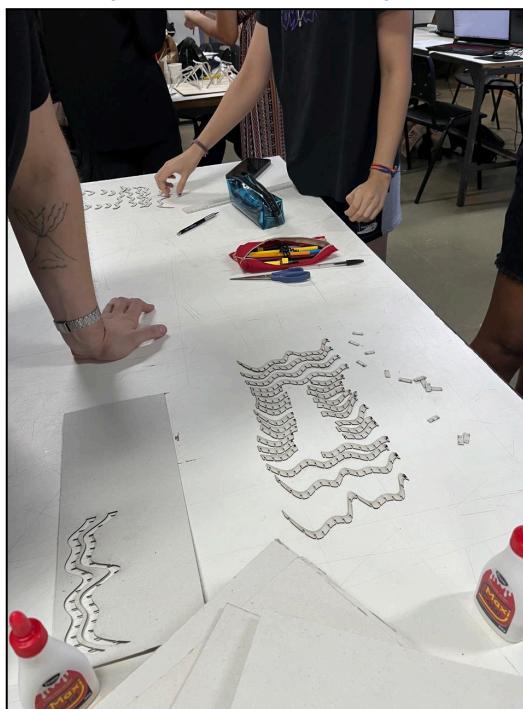
Figura 8: Processo de impressão dos chaveiros com logo do IAU USP



Fonte: Autor, 2024

No segundo dia, à medida que os grupos começaram a alcançar resultados substanciais em seus projetos de pavilhões, houve uma demanda crescente para a fabricação de modelos reduzidos que facilitassem a visualização e a compreensão dos processos de projeto em andamento. A primeira solicitação que recebi foi para o corte de um modelo de pavilhão em waffle na cortadora a laser. Graças à resolução dos problemas técnicos da cortadora no primeiro dia, consegui realizar o corte com sucesso.

Figura 9: Corte das peças em waffle de um dos grupos do curso de difusão



Fonte: Nomads.usp, 2024

Contudo, um dos grupos que estava trabalhando no pavilhão com sistemas de vedação desenvolveu um design que impossibilitava a fabricação com a técnica de waffle. Diante dessa dificuldade, sugeri a utilização da impressora 3D como alternativa. Entretanto, ao realizar testes preliminares na impressora antes de preparar o arquivo para aquele grupo, percebi que a impressora

não estava operando corretamente. A impressora era um modelo antigo que estava em uso no Nomads há vários anos, e a falha estava relacionada à movimentação dos eixos do bico extrusor. Tentamos várias técnicas de manutenção padrão, sem sucesso. O técnico especializado do instituto diagnosticou que o problema estava no microchip interno da impressora. Como a impressora era de um modelo descontinuado, não havia mais suporte técnico disponível, e, portanto, sua utilização foi descontinuada devido à falta de alternativas de substituição no instituto naquele momento.

Em resumo, apesar das dificuldades enfrentadas, conseguimos completar os modelos reduzidos de dois dos grupos utilizando a cortadora a laser. Embora as etapas de fabricação digital no primeiro curso tenham sido desafiadoras, as lições aprendidas foram valiosas e contribuíram para um desempenho mais eficiente no segundo curso. Essas experiências sublinharam a importância da manutenção e da preparação adequada dos equipamentos, bem como a necessidade de soluções alternativas quando surgem problemas técnicos, resultando em uma execução mais satisfatória das atividades de fabricação digital no curso subsequente.

#### 7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do curso "Do Digital ao Material: Modelagem Paramétrica e Fabricação Digital na Concepção Arquitetônica," minha experiência como monitor e participante integral no processo revelou-se extremamente enriquecedora para minha trajetória acadêmica e de pesquisa. A responsabilidade assumida no gerenciamento e suporte às atividades do curso proporcionou uma compreensão profunda do potencial pedagógico e prático da modelagem paramétrica e da fabricação digital.

O curso foi marcado por resultados satisfatórios de todos os grupos envolvidos, apesar dos desafios técnicos enfrentados com as máquinas de fabricação digital. Embora tenhamos encontrado dificuldades operacionais, tais como falhas nas máquinas e problemas com a impressora 3D, a capacidade de adaptação e a busca por soluções alternativas permitiram que contornássemos esses obstáculos. Desenvolvemos novas abordagens que possibilitaram a utilização eficaz da infraestrutura disponibilizada pelo Nomads, assegurando que todos os participantes pudessem beneficiar-se dos recursos oferecidos.

A experiência de monitoria na área de fabricação digital foi particularmente valiosa. Destaca-se a contribuição do pesquisador Maurício Filho, cuja orientação foi fundamental para meu desenvolvimento acadêmico. Desde o início da minha pesquisa, Maurício Filho desempenhou um papel crucial, fornecendo treinamento especializado no manuseio das máquinas e no entendimento dos algoritmos e *scripts* necessários para a transcrição desses dados para outros softwares de fabricação digital.

Em síntese, o curso não apenas consolidou meu conhecimento e habilidades na fabricação digital e na modelagem paramétrica, mas também evidenciou a importância da inovação e da resolução criativa de problemas em contextos educacionais e práticos. A experiência adquirida contribuirá significativamente para o avanço da minha carreira acadêmica e de pesquisador, reforçando o valor do aprendizado contínuo e da adaptação em ambientes de alta tecnologia e complexidade.

### VIII CURSO II: "CONSTRUIR COM FABRICAÇÃO DIGITAL: PAVILHÃO EXPERIMENTAL"

#### 8.1 INTRODUÇÃO AO PROJETO

O segundo curso relacionado à pesquisa, intitulado "Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental," deu continuidade ao enfoque estabelecido no primeiro curso, mas com uma orientação mais prática e direcionada. Enquanto o primeiro curso tinha um caráter mais conceitual e exploratório, introduzindo os participantes aos fundamentos da modelagem paramétrica e da fabricação digital, o segundo curso concentrou-se na aplicação direta desses conceitos por meio da construção de um pavilhão experimental. O objetivo principal deste curso foi a realização prática da fabricação e montagem de um pavilhão projetado com base em algoritmos paramétricos.

O curso, realizado em junho de 2024, envolveu a fabricação de um pavilhão experimental criado a partir de algoritmos computacionais de ordem paramétrica. As práticas do curso foram centradas na produção e montagem do pavilhão utilizando uma abordagem híbrida que combinou métodos de fabricação digital com técnicas construtivas convencionais. As peças do pavilhão foram produzidas por meio de processos digitais, incluindo o uso de cortadoras a laser disponíveis no instituto. Para peças maiores, que não podiam ser cortadas nas máquinas do instituto, foram empregadas ferramentas de construção convencionais.

O processo de montagem do pavilhão envolveu a participação ativa dos participantes do curso, assim como dos monitores e pesquisadores do núcleo de pesquisa. Esses pesquisadores, que haviam atuado como monitores no curso anterior, desempenharam um papel crucial na supervisão e orientação durante as atividades de fabricação e montagem. Adicionalmente, outros pesquisadores se voluntariaram para auxiliar nas atividades desenvolvidas durante o curso, bem como nos intervalos entre as aulas, quando parte significativa do trabalho foi adiantada.

Esse curso enfatizou a integração prática dos conceitos de modelagem paramétrica e fabricação digital, proporcionando aos participantes uma experiência direta na construção de um projeto complexo. A abordagem híbrida adotada no curso permitiu uma compreensão mais profunda das interações entre a modelagem digital e as práticas construtivas tradicionais, além de evidenciar a importância da colaboração entre diferentes membros da equipe para o sucesso do projeto.

Figura 10: Poster de divulgação do segundo curso de difusão



Fonte: Nomads.usp, 2024

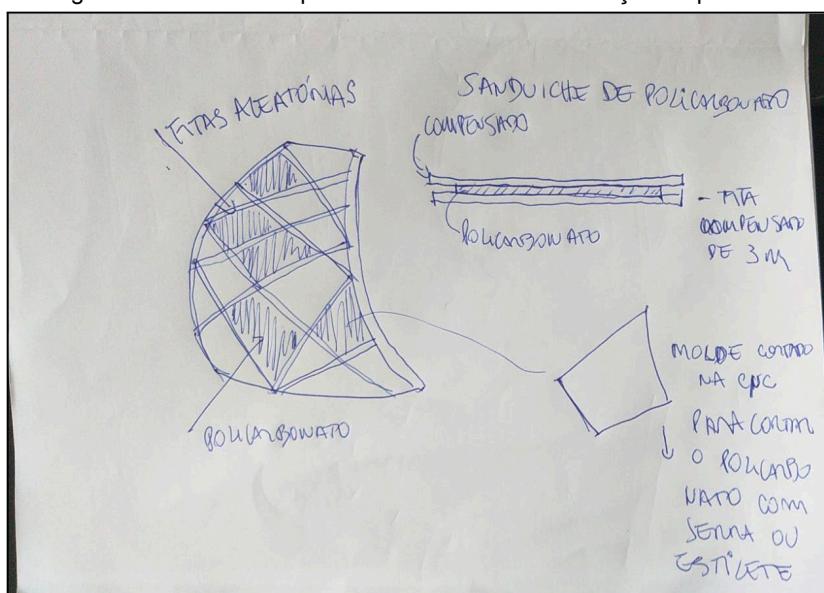
## 8.2 PLANEJAMENTO E CONCEITUAÇÃO

A etapa de revisão e planejamento do segundo curso, intitulado "Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental," foi conduzida com a participação de todos os pesquisadores envolvidos no projeto. Esse processo incluiu múltiplas reuniões semanais para alinhar os detalhes do desenvolvimento e execução do curso de difusão. Entre os aspectos abordados nas reuniões, destacou-se a elaboração de um orçamento detalhado, que, desta vez, foi significativamente mais complexo do que o do primeiro curso. Isso se deve ao fato de que o segundo curso envolvia a construção de uma estrutura de pavilhão com 2,3 metros de altura, confeccionada em compensado de madeira. Este projeto exigiu a aquisição e gestão de diversos materiais e ferramentas, como

conectores, cantoneiras, parafusos, ferramentas de construção, fitas adesivas para marcação, e canetas, entre outros utensílios necessários para a montagem.

O planejamento inicial focou na discussão projetual para definir a forma desejada do pavilhão. Este processo foi particularmente delicado e demorado, pois o pavilhão precisava incorporar os temas de seis pesquisas distintas do núcleo. Entre essas pesquisas, quatro eram de mestrado, abordando áreas específicas: a de Caio Muniz, sobre estruturas itinerantes para montagem e desmontagem; a de Euler Morais, sobre sistemas de vedação em estruturas pavilhonianas; a de Júlia Menin, que tratava da metodologia no ensino de projetos complexos; e a de Maurício José, que se concentrava no estudo de algoritmos matemáticos na modelagem paramétrica, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento do algoritmo utilizado para o pavilhão. Outros pesquisadores também contribuíram significativamente para o desenvolvimento do algoritmo, como Caio Muniz e Thamyres Lobato, que se voluntariou para participar tanto do primeiro quanto do segundo curso.

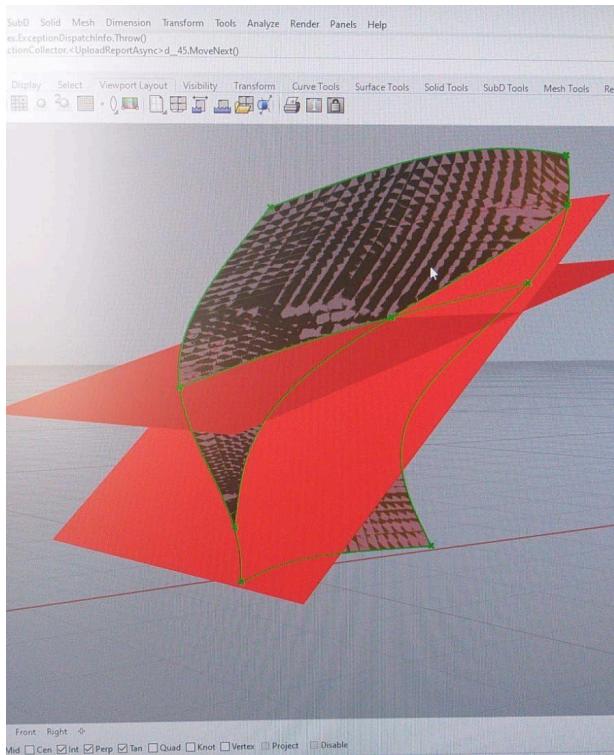
Figura 11: Desenho esquemático do sistema de vedação do pavilhão



Fonte: Nomads.usp, 2024

Após várias reuniões e discussões, foi definida a forma final do pavilhão: três “conchas” cuja base era formada por uma curva senoidal, com a curvatura ajustada por um algoritmo de atração a um ponto focal no plano. A estrutura do pavilhão foi projetada para ser totalmente em madeira compensada, com uma fundação rasa porém resistente. A montagem incluía uma estrutura tipo waffle, onde as travessas laterais se encaixavam com os montantes verticais por meio de sulcos feitos na madeira. Uma imagem do software ilustrando o desenvolvimento do pavilhão está disponível para visualização.

Figura 12: Desenvolvimento do sistema de vedação do pavilhão no software Rhinoceros



Fonte: Nomads.usp, 2024

O planejamento do segundo curso iniciou imediatamente após a conclusão do primeiro curso e continuou até o início do segundo, exigindo um esforço intensivo por parte dos pesquisadores do núcleo para garantir que todos os temas de pesquisa fossem abordados dentro do prazo estipulado. Apesar dos avanços significativos durante o intervalo entre os cursos, a vedação completa não pôde ser concluída em todas as conchas do pavilhão; apenas uma das conchas passou pelo processo completo de vedação.

### 8.3 FABRICAÇÃO DIGITAL NA CONFECÇÃO DE MOLDES EM PAPEL PARANÁ

Antes do início do curso, foram preparados moldes de papel paraná utilizando a cortadora a laser Mettalforma, localizada no laboratório de fabricação digital do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP. Estes moldes foram essenciais para a etapa subsequente de corte dos montantes e travessas do pavilhão, que foi realizado com o uso de uma serra tico-tico. Cada molde tinha aproximadamente 1 metro de comprimento, o que era insuficiente para cortar uma peça inteira de compensado de madeira. Portanto, foi necessário utilizar cerca de três moldes para cada peça completa. Os moldes eram conectados entre si com fita crepe para assegurar sua estabilidade e evitar o desmantelamento durante o processo de corte das peças.

O processo de corte dos moldes iniciais foi realizado ao longo de duas noites no laboratório de fabricação digital, e contou com a participação dos pesquisadores Caio Muniz, Euler Moraes, João Gabriel Costa e Thamyres Lobato. A execução deste procedimento foi desafiadora e demorada, principalmente porque as únicas máquinas disponíveis no laboratório eram a cortadora a laser e a fresadora, que não estavam disponíveis para utilização no momento. Se a fresadora estivesse em operação, o uso de moldes de papel paraná poderia ter sido evitado, permitindo que o corte das peças fosse feito diretamente no compensado de madeira.

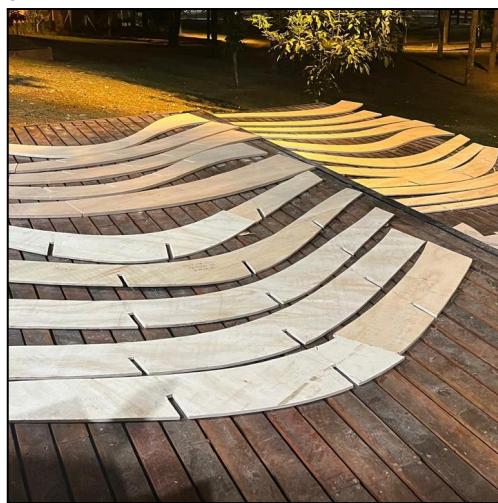
Figura 13: Verificação de escala dos moldes cortados em papel paraná



Fonte: Nomads.usp, 2024

Portanto, a utilização da cortadora a laser para a confecção dos moldes de papel parana e a subsequente serra tico-tico para o corte das peças foi uma solução necessária, embora menos eficiente comparada ao potencial uso da fresadora. Esse método, embora eficaz, impôs um ritmo mais lento ao processo de fabricação, sublinhando a necessidade de considerar as limitações e recursos disponíveis no laboratório durante a execução do projeto.

Figura 14: Peças das conchas 1 e 2 cortadas sobre o deck da maquetaria



Fonte: Nomads.usp, 2024

#### 8.4 MODELOS REDUZIDOS DO PAVILHÃO

Após o início das aulas do curso "Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental," foram produzidos modelos reduzidos do pavilhão utilizando tanto a impressora 3D quanto a cortadora a laser. Esses modelos desempenharam um papel crucial na identificação de problemas que surgiram durante a montagem do pavilhão. No entanto, ao serem fabricados, muitos dos componentes do pavilhão já haviam sido cortados a partir dos moldes e do compensado de madeira, o que limitou a capacidade de corrigir os problemas detectados.

O principal problema identificado foi o desencontro de algumas travessas com os montantes do pavilhão, bem como o desalinhamento dos montantes verticais em relação à base e, por conseguinte, à fundação do pavilhão. Esse desalinhamento foi observado em duas das três "conchas" do pavilhão. Embora o problema tenha causado um desencontro visível entre várias peças, ele não impediu a montagem final do pavilhão.

Essa experiência sublinha a importância fundamental de realizar a fabricação de modelos reduzidos antes da construção completa de estruturas pavilhonianas. A confecção antecipada de modelos reduzidos teria possibilitado a identificação e a correção dos problemas estruturais antes da fabricação das peças em escala real, resultando em um ajuste mais preciso e na obtenção de um resultado final mais satisfatório.

Em resumo, a produção de modelos reduzidos revelou-se uma etapa indispensável no processo de construção, proporcionando a oportunidade de detectar e resolver questões estruturais antes da montagem final. Este processo demonstrou que a antecipação e a verificação através de modelos reduzidos são essenciais para garantir a precisão e a integridade estrutural em projetos complexos de fabricação digital e modelagem paramétrica.

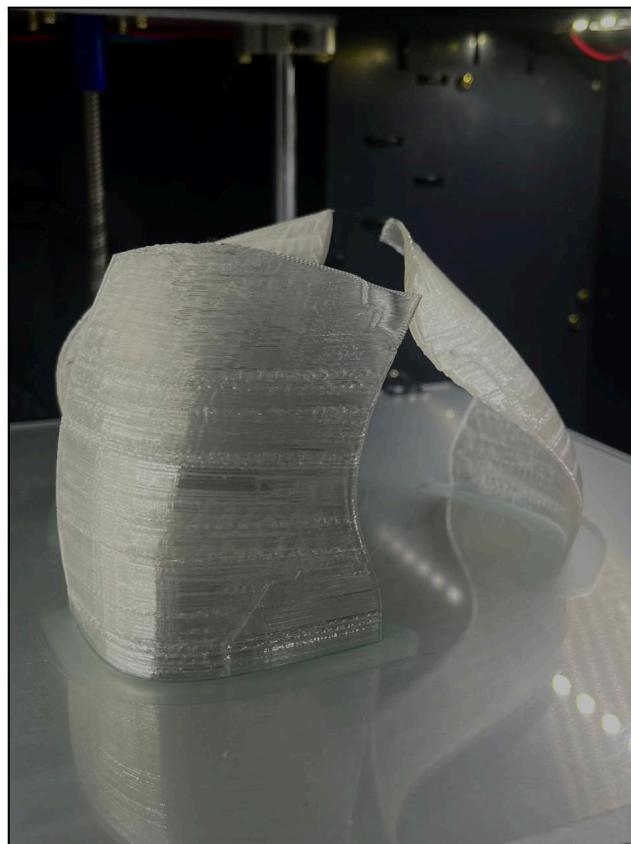
#### 8.5 IMPRESSORA 3D

No segundo dia do curso "Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental," foi realizada a impressão de um modelo reduzido do pavilhão utilizando a nova impressora 3D recentemente adquirida pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP. Esta nova impressora 3D foi introduzida para substituir a impressora MakerBot Replicator 2, que havia sido utilizada anteriormente no núcleo de pesquisa Nomads e que se revelou comprometida durante o primeiro curso, inviabilizando o uso da impressão 3D nesse período.

No início, a equipe do Nomads enfrentou dificuldades na operação da nova impressora 3D devido às diferenças substanciais em relação ao modelo anterior. No entanto, com a assistência do técnico especializado responsável pela manutenção da impressora no instituto, bem como o apoio de colaboradores externos, foi possível familiarizar-se com os novos comandos e procedimentos operacionais. Após a capacitação inicial, foi gerado um arquivo digital que incluía o modelo reduzido das três conchas do pavilhão em escala apropriada, o qual foi então enviado para a impressão.

A impressão dos modelos reduzidos foi bem-sucedida, permitindo a visualização precisa da forma desejada para o pavilhão. A utilização da nova impressora 3D revelou-se crucial para validar o design e facilitar a identificação de possíveis ajustes necessários na construção final do pavilhão. A imagem abaixo ilustra o modelo reduzido do pavilhão experimental produzido pela impressora 3D, destacando a fidelidade ao projeto e a eficácia da impressão na representação da estrutura planejada.

Figura 15: Modelo reduzido do pavilhão fabricado pela impressora 3D



Fonte: Nomads.usp, 2024

#### 8.6 CORTADORA A LASER

A confecção de modelos reduzidos em MDF de 3 mm utilizando a cortadora a laser foi iniciada no primeiro dia do curso "Construir com Fabricação Digital: Pavilhão Experimental". Neste processo, três grupos distintos foram formados, e cada grupo foi responsável pela produção das peças do pavilhão em estrutura de waffle. A tarefa inicial envolveu o corte das peças na cortadora a laser, seguido pela montagem dos protótipos de pavilhão pelos respectivos grupos.

Durante a fase de montagem dos protótipos, foram observados pequenos erros e desalinhamentos nas peças. No entanto, inicialmente, esses problemas foram considerados como desvios mínimos resultantes da margem de erro associada à espessura dos sulcos em cada peça de MDF, uma vez que as peças apresentavam variações em suas espessuras. Este problema foi interpretado como uma limitação tolerável para os protótipos reduzidos e não foi imediatamente considerado crítico para a montagem do pavilhão em escala real.

Contudo, conforme a montagem do pavilhão avançava, ficou evidente que esses erros nos protótipos reduzidos refletiam questões mais significativas que impactariam a montagem do pavilhão em escala real. Isso reforçou a importância de realizar a fabricação de modelos reduzidos antes e durante o processo de montagem, conforme discutido anteriormente na pesquisa.

Figura 16: Modelo reduzido do pavilhão cortado em MDF pela cortadora a laser



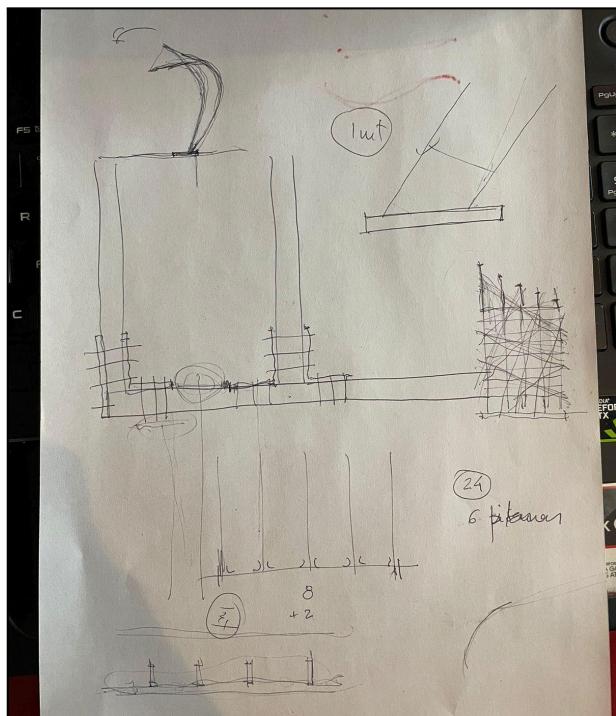
Fonte: Nomads.usp, 2024

Nos últimos dias do curso, foi decidido fabricar um modelo reduzido mais preciso, que refletisse fielmente o design do pavilhão planejado. Este modelo reduzido foi utilizado para identificar e visualizar os possíveis desalinhamentos que poderiam ocorrer na montagem do pavilhão em tamanho real. O processo de fabricação digital do modelo reduzido, realizado com a cortadora a laser, foi bem-sucedido e livre de problemas técnicos, permitindo que todos os participantes se envolvessem na montagem dos modelos reduzidos.

#### 8.7 MONTAGEM DO PAVILHÃO

A montagem do pavilhão teve início formalmente no segundo dia do curso, sendo o primeiro dia reservado para a introdução dos participantes e para a familiarização com a metodologia e com as atividades a serem desenvolvidas. A participação ativa de todos os monitores, pesquisadores e participantes foi fundamental para a execução das tarefas. O curso, com duração de quatro tardes, revelou-se insuficiente para alcançar todos os objetivos propostos inicialmente. O tempo disponível limitou a capacidade de concluir todas as etapas planejadas dentro do período estipulado.

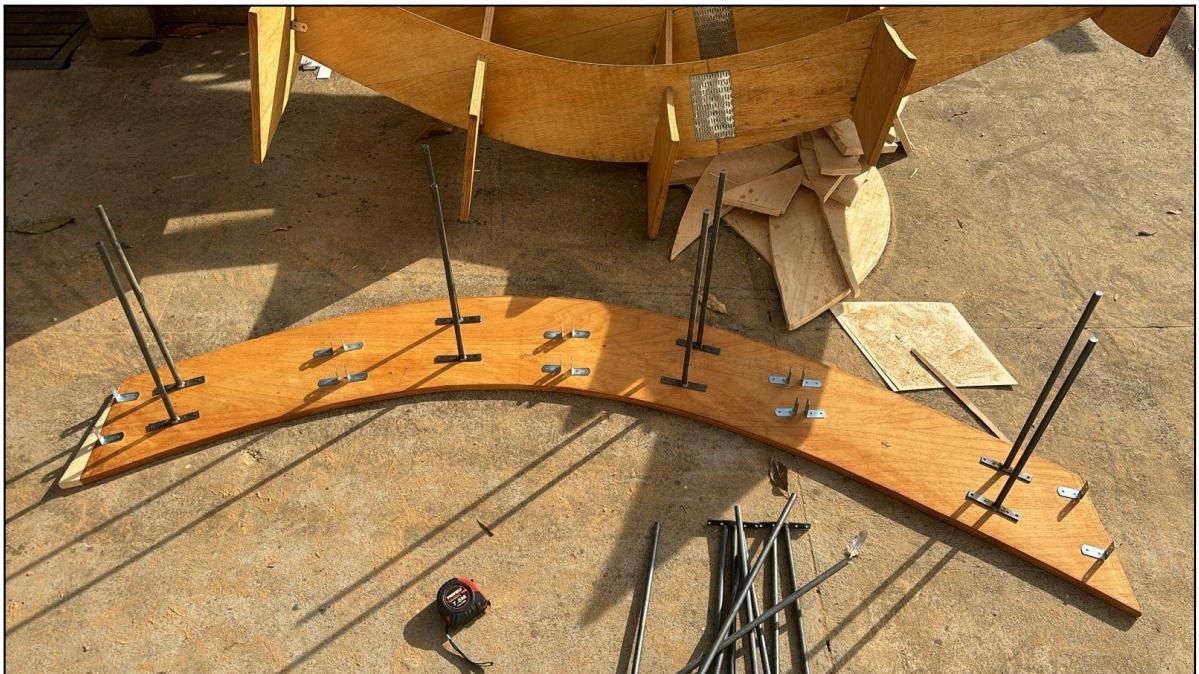
Figura 17: Desenho esquemático das conexões estruturais do pavilhão



Fonte: Nomads.usp, 2024

O processo de montagem do pavilhão envolveu a execução de diversas etapas. Primeiramente, foram instaladas as fundações, que constituíram as primeiras estruturas do pavilhão. Subsequentemente, as três conchas foram colocadas sobre suas respectivas fundações. Para garantir a fixação adequada, foi necessário que pessoas sustentassem as conchas enquanto eram parafusadas nas fundações. Após a conclusão da montagem da estrutura principal, estava prevista a instalação da vedação, a qual seria realizada com placas de policarbonato cortadas de acordo com um padrão gerado por um software de modelagem paramétrica. Este software utilizou um algoritmo para criar um padrão aleatório sobre a superfície do pavilhão, com o objetivo de conferir um efeito estético uniforme e inovador. As placas de policarbonato deveriam ser fixadas com pregos e fitas de PVC ao redor das bordas para garantir um acabamento adequado e prevenir infiltrações. Contudo, devido à limitação temporal do curso, não foi possível concluir a vedação das três conchas. O processo de instalação e fabricação da vedação foi iniciado apenas no terceiro dia, e foi realizado em uma das conchas, deixando todas as outras sem vedação completa ao final do curso.

Figura 18: Fundação de uma das conchas pronta antes da fixação no solo



Fonte: Nomads.usp, 2024

Figura 19: Processo de montagem do pavilhão



Fonte: Nomads.usp, 2024

Após o término do curso, foi decidido que a montagem do pavilhão e a fabricação das placas de vedação seriam continuadas na semana seguinte. Na terça-feira seguinte ao encerramento do curso, dirigi-me à maquetaria do instituto para cortar os moldes em papel paraná necessários para o corte das peças de policarbonato. Com a colaboração da pesquisadora Thamyres, o corte foi

realizado com sucesso em uma única tarde. Na sequência, outros pesquisadores cortaram as placas de policarbonato com base nos moldes e realizaram a instalação das mesmas na estrutura. Esta etapa foi concluída com êxito, resultando na vedação completa de uma das três conchas do pavilhão.

Figura 20: Progresso alcançado na montagem do pavilhão experimental



Fonte: Nomads.usp, 2024

Dado o desafio enfrentado durante a execução do projeto, particularmente no que diz respeito ao processo de vedação, decidiu-se prorrogar o prazo de montagem do pavilhão até o mês de setembro. Esta extensão permitirá que toda a vedação seja concluída antes do início do estudo de montagem e desmontagem, assegurando que o projeto atenda aos padrões estabelecidos e aos objetivos definidos.

## IX CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir este relatório, constata-se a importância da pesquisa no campo da arquitetura, com ênfase na modelagem paramétrica e nos processos de fabricação digital. A investigação aprofundada dos objetos arquitetônicos, conduzida por meio dessas metodologias, proporcionou uma compreensão mais detalhada e técnica das estruturas complexas envolvidas. Esse aprofundamento foi fundamental para a materialização de uma estrutura específica, um resultado direto do rigor acadêmico aplicado ao longo da pesquisa. A colaboração com outros pesquisadores do grupo Nomads foi imprescindível, resultando em uma troca de conhecimentos que contribuiu tanto para o avanço deste estudo quanto para o enriquecimento das pesquisas conduzidas por esses colegas. Tal abordagem colaborativa evidencia a relevância da integração de saberes e a interdependência entre diferentes áreas de especialização na arquitetura contemporânea.

Os resultados obtidos durante a pesquisa, que incluem a produção de modelos reduzidos, a documentação detalhada dos cursos de difusão monitorados, a construção de um pavilhão e sua subsequente análise crítica, foram elementos centrais para a conclusão exitosa deste estudo. Cada um desses resultados não apenas valida as hipóteses inicialmente formuladas, mas também demonstra a eficácia e aplicabilidade dos processos de modelagem e fabricação digital dentro do contexto arquitetônico. Esses achados destacam o potencial das técnicas investigadas para a inovação no campo, além de sugerirem direções futuras para pesquisas que possam expandir ainda mais o conhecimento em modelagem paramétrica e fabricação digital. A continuidade deste tipo de investigação se mostra essencial para o avanço das práticas arquitetônicas, oferecendo novas possibilidades de exploração e desenvolvimento tecnológico.

## **REFERÊNCIAS**

- DUNN, N. Digital fabrication in architecture. Londres: Laurence King, 2012.
- NOJIMOTO, C.; SOARES, J. P.; VENTURA, A., TRAMONTANO, M. Fabricação digital: o controle do que é variável. In: NOMADS.USP. Territórios Híbridos: ações culturais, espaços públicos e meios digitais. São Carlos: IAU-USP, 2013.
- NOJIMOTO, C.; TRAMONTANO, M.; ANELLI, R. L. S. Design paramétrico: experiência didática. In: XV CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 15., 2011, Santa Fé. Proceedings [...]. Santa Fé: SIGraDI, 2011. P. 456-460.
- POTTMAN, H.; ASPERL, A.; HOFER, M.; KILIAN, A. Architectural Geometry. Exton: Bentley Institute Press. 2007.
- ROMCY, N. M. S.; CARDOSO, D. R. A introdução da abordagem paramétrica no ensino de projeto arquitetônico: relato de uma experiência. PARC Pesq. em Arq. e Constr., Campinas, SP, v.10. 2019.
- WOODBURY, R. Elements of parametric design. Nova Iorque: Routledge, 2010. 19