



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

GLADYS ILKA KLEIN TAPARELLO

**ENSAIO DE PROTÓTIPOS HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS  
DE MADEIRAS BRASILEIRAS PARA O ENSINO DE ARQUITETURA  
PERFORMATIVA**

FLORIANÓPOLIS

2019

Gladys Ilka Klein Taparello

**ENSAIO DE PROTÓTIPOS HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS DE  
MADEIRAS BRASILEIRAS PARA O ENSINO DE ARQUITETURA  
PERFORMATIVA**

Dissertação submetido(a) ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Verzola Vaz

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Taparello, Gladys Ilka Klein  
ENSAIO DE PROTÓTIPOS HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS DE  
MADEIRAS BRASILEIRAS PARA O ENSINO DE ARQUITETURA  
PERFORMATIVA / Gladys Ilka Klein Taparello ; orientador,  
Carlos Eduardo Verzola Vaz, 2019.  
95 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Material  
higroscopicamente responsivo de madeira. 3. Arquitetura  
Performativa. 4. Ensino de arquitetura. I. Vaz, Carlos  
Eduardo Verzola. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e  
Urbanismo. III. Título.

Gladys Ilka Klein Taparello

**Ensaio de protótipos higroscopicamente responsivos de madeiras brasileiras para o ensino de arquitetura performativa**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.<sup>a</sup> Maristela Moraes de Almeida, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.<sup>a</sup> Regiane Trevisan Pupo, Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jarryer de Martino, Dr.  
Universidade Federal do Espírito Santo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

---

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal  
Coordenador do Programa

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Verzola Vaz  
Orientador

Florianópolis, 14 de agosto de 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e a mim mesma.

## AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que me acompanharam neste percurso, mas as principais, que sempre me apoiaram de todas formas, são meus pais, Carlos e Leanete. A eles, meu mais profundo obrigada por serem meu suporte em inúmeros momentos.

Agradeço ao meu orientador, prof. Carlos Vaz, por sua amizade e acolhimento, tão fundamentais quanto suas orientações.

Às novas amizades proporcionadas pelo mestrado, Arthur, Carolina, Gustavo, Leticia, Larissa, Maristela, Nallan, Thêmis e a todos com quem convivi nesses dois anos e contribuíram de alguma forma, em especial a Carla e Patrícia, pela parceria e ajuda tantas vezes. Muito obrigada!

Aos meus queridos amigos de muito tempo, Fernanda, Luiz Roberto e Sandra, por perdoarem minhas ausências e continuarem comigo, apesar da distância.

À Rosi, por me ajudar a encontrar o meu caminho.

À banca, tanto de qualificação quanto a final, pelas contribuições, e especialmente à prof. Regiane, sempre deixando as portas do Pronto 3D abertas. Aos bolsistas do Pronto 3D, Charles e Gabriela, pela ajuda nos procedimentos com as ferramentas de fabricação digital.

Ao pessoal da secretaria, Adriana, Carolina e Mariany, pela disposição em ajudar a resolver os problemas burocráticos, assim como ao Saulo, da maquetaria, por auxiliar no preparo de materiais para a pesquisa.

Aos professores que contribuíram com minha formação.

À Unochapecó, por ceder o espaço, e principalmente à prof. Luana Piaia, por ceder suas aulas para a conclusão desta pesquisa.

Aos alunos que participaram das oficinas, obrigada pela colaboração.

A Mimi, Marigold e Franz pela companhia constante.

Ao sr. Ênio, da Madeireira Baía Sul, pela doação de tábuas para os experimentos.

À CAPES, pela bolsa de financiamento que facilitou esta pesquisa.

*“Anything's possible if you've got enough nerve”.*  
(J. K. Rowling, 2005)

## RESUMO

Esta dissertação explora os usos de protótipos higroscopicamente responsivos de madeiras brasileiras no ensino de arquitetura performativa em ateliês. A performance na arquitetura pode estar relacionada tanto ao desempenho dos sistemas como às manifestações artísticas e interações entre usuários, ambiente e construção. Nesse contexto, os materiais responsivos são um meio de conciliar ambos os aspectos dessa abordagem arquitetônica. A responsividade se refere à capacidade de elementos arquitetônicos se adequarem a novas configurações do espaço no qual estão inseridos. A madeira, por ser um material higroscópico, tem potencial para ser utilizada como matéria-prima para a confecção de componentes responsivos a alterações da umidade relativa do ar. Apesar de ainda não ter seu uso consolidado, esses componentes podem ser aplicados como proteção de insolação e controle de privacidade em edificações. Este estudo analisou as formas e composições de seis espécies de madeiras brasileiras junto com alumínio de fotografia para a fabricação de elementos responsivos. Com base na experiência de Davidova e Sevaldson (2016), foram aplicadas três oficinas sobre arquitetura performativa e materiais responsivos com alunos da graduação de arquitetura e urbanismo, fazendo uso dos componentes higroscopicamente responsivos de madeira e alumínio como exemplo de material responsivo. Com a última turma, foi desenvolvido um protótipo, que foi empregado como revestimento de uma estrutura em escala 1:1 derivada de projeto *open source*, comprovando a viabilidade de uso do material em questão.

**Palavras-chave:** Arquitetura Performativa. Material higroscopicamente responsivo de madeira. Ensino de arquitetura.



## ABSTRACT

This dissertation explores the uses of hygroscopically responsive prototypes of Brazilian wood in the teaching of performative architecture in ateliers. The performance in the architecture can be related both to the performance of the systems as to the artistic manifestations and interactions between users, environment and construction. In this context, responsive materials are a means of reconciling both aspects of this new architectural approach. Responsiveness refers to the ability of architectural elements to adapt to new configurations of the space in which they are inserted. Wood, as a hygroscopic material, has the potential to be used as raw material for the preparation of components responsive to changes in relative humidity. Although not yet consolidated, these components can be applied as sun protection and privacy control in buildings. This study analyzed the forms and compositions of six Brazilian wood species together with photographic aluminum for the fabrication of responsive elements. Based on the experience of Davidova and Sevaldson (2016), three workshops on performative architecture and responsive materials were applied with undergraduate architecture and urbanism students, making use of hygroscopically responsive components of wood and aluminum as an example of responsive material. With the last group, a prototype was developed, which was used as cover of a structure derived from open source project, proving the feasibility of using the material in question.

**Keywords:** Performative architecture. Hygroscopically responsive wood material. Architecture teaching.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da estrutura da dissertação. ....	20
Figura 2 - Esquema de representação de diferenças entre fachadas, <i>building skins</i> e <i>building envelopes</i> . ....	25
Figura 3 - Esquema para classificações de arquitetura performativa. ....	26
Figura 4 - Evolução da complexidade da arquitetura performativa. ....	27
Figura 5 - Tipos de água na madeira. ....	29
Figura 6 - Esquema de componente higroscopicamente responsivo de madeira e material sintético. ....	31
Figura 7 - Tipos de desdobro de toras indicados: A) cortes tangenciais; B) laminação por torneamento. ....	31
Figura 8 - Exemplo de abertura responsiva impressa em 3D que se adapta às mudanças de umidade relativa (esquerda) e seu processo de fabricação (direita). ....	33
Figura 9 - Exemplos de amostras de dupla camada de pinheiro-larício, em diferentes espessuras, e fibra de vidro, depois de submetidas à variação de umidade. ....	34
Figura 10 - Prêmio de segundo lugar para <i>Bergen International Wood Festival 2010</i> e Pavilhão para <i>Oslo Architectural 2010</i> . ....	36
Figura 11 - Em sentido anti-horário, a partir da esquerda superior, Hygroskin, HygroScope e estruturas auto-formadoras e auto-rigidizantes. ....	37
Figura 12 - Protótipos da <i>Newcastle University</i> . ....	38
Figura 13 - Centro de visitantes em Kielder Forest, Northumberland, UK com componentes responsivos. ....	39
Figura 14 - Protótipos da <i>ETH Zürich</i> . ....	40
Figura 15 - Uso dos protótipos da <i>ETH Zürich</i> como proteção solar. ....	40
Figura 16 - Ambiente controlado e seu esquema de montagem. ....	41
Figura 17 - Esquema do método de avaliação de curvaturas dos componentes. ....	42
Figura 18 - <i>Loop Pavillion</i> , estrutura em escala real produzida na República Tcheca .....	43
Figura 19 - Esquema do método <i>hands on</i> . ....	44
Figura 20 - Simulação do comportamento das amostras no Grasshopper. ....	47
Figura 21 - Primeiros testes com duas camadas de lâmina de madeira - fibras no sentido longitudinal. ....	48

Figura 22 - Testes duas camadas de madeira - fibras na transversal. Combinações de lâminas das espécies angelim, cumaru, curupixá, garapeira, muiracatiara e tauari. ....	50
Figura 23 - Testes com espécies selecionadas e alumínio.....	51
Figura 24 - Amostras retornando à forma inicial após uma hora e meia. ....	51
Figura 25 - Produção de lâminas de madeira a partir de tábua. ....	53
Figura 26 - Tentativa de corte em CNC. ....	54
Figura 27 - Esquema das etapas das oficinas .....	55
Figura 28 - Aula teórica na oficina 1.....	56
Figura 29 - Exemplos de Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos apresentados: A) Hotel WZ Jardins; B) Bloom termal bimetals; C) Hexi responsive wall; D) Phototropia; E) Lightning Responsive Origami Façade; F) Al Bahar Towers.....	58
Figura 30 - Sequência de produção dos componentes durante oficina. ....	59
Figura 31 - Testes dos protótipos dos estudantes da terceira oficina. ....	60
Figura 32 - Concepção dos protótipos da terceira oficina: moldes de papel (A, B, C); desenhos à mão livre (D); maquetes eletrônicas (E). ....	61
Figura 33 - Protótipos com boa resposta da primeira oficina.....	63
Figura 34 - Protótipos com alterações não significativas.....	63
Figura 35 - Protótipos com composição em painel da primeira oficina.....	65
Figura 36 - Protótipos da primeira oficina sem resposta satisfatória. ....	66
Figura 37 - Protótipos de peça única da segunda oficina. ....	67
Figura 38 - Protótipos em painel da segunda oficina. ....	68
Figura 39 - Protótipos da terceira oficina – composição em painel: peça em painel único (C1); par coordenado (C2); e triângulos em linha (C5).....	70
Figura 40 - Protótipos da terceira oficina – composição em painel: triângulos radiais (C4) e pétalas radiais (C5).....	71
Figura 41 - Primeira versão dos elementos responsivos para revestimento.....	72
Figura 42 - Gráficos das respostas sobre compreensão do conteúdo e quais dificuldades enfrentadas pelos participantes na 2ª e 3ª oficinas. ....	75
Figura 43 - Gráfico das respostas sobre o tempo das oficinas. ....	76
Figura 44 - Preparação das peças da estrutura: corte na CNC e lixamento pós corte.....	77
Figura 45 - Projeto inicial da estrutura (A) e sua adaptação (B-D).....	78
Figura 46 - Primeira proposta de organização dos protótipos e avaliação da resposta em relação ao aumento de umidade - versão vazada e versão cheia. ....	79

Figura 47 - Produção dos componentes em série. Em sentido anti-horário, do topo-esq.: corte a laser, colagem no alumínio, recorte do alumínio. ....	80
Figura 48 - Montagem da estrutura: conexão das partes dos pórticos e colocação dos travamentos.....	81
Figura 49 - Fixação das canaletas e colocação dos elementos responsivos. ....	82
Figura 50 - Estrutura concluída - UR 90%.....	82
Figura 51 - Estrutura concluída - UR 80%.....	83
Figura 52 - Estrutura concluída - UR 60%.....	83
Figura 53 - Estrutura concluída - UR 51%.....	84
Figura 54 - Estrutura concluída - UR 47%.....	84

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Materiais e ferramentas necessários para a oficina. ....	46
---------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Revisão para os temas Materiais responsivos de madeira e Arquitetura performativa.....	23
Tabela 2 - Resultados dos testes dos componentes de madeira e alumínio. ....	52
Tabela 3 - Avaliação da produção da primeira oficina. ....	62
Tabela 4 - Avaliação da produção da segunda oficina.....	66
Tabela 5 - Avaliação da produção da terceira oficina. ....	69
Tabela 6 - Resultados dos questionários da segunda e da terceira oficinas. ....	74

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DA RELEVÂNCIA E ABORDAGEM DO TEMA.....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.2.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>18</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
1.3	ESTRUTURA GERAL.....	19
<b>2</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA.....</b>	<b>21</b>
2.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	21
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
3.1	ARQUITETURA PERFORMATIVA E MATERIAIS RESPONSIVOS....	24
3.2	MADEIRA E HIGROSCOPIA .....	28
3.3	COMPONENTES HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS DE MADEIRA DE DUPLA CAMADA .....	30
3.3.1	<b>Aplicação dos componentes responsivos de madeira como <i>building skin</i></b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
4.1	USO DE ELEMENTOS RESPONSIVOS DE MADEIRA NO ENSINO DE ARQUITETURA PERFORMATIVA.....	43
4.2	MÉTODO APRENDER FAZENDO ( <i>HANDS ON</i> ) .....	44
4.3	ORGANIZAÇÃO DAS OFICINAS.....	45
<b>5</b>	<b>MATERIAL RESPONSIVO DE MADEIRA DE DUPLA CAMADA .....</b>	<b>47</b>
5.1	PRODUÇÃO E TESTE DAS AMOSTRAS .....	47
5.1.1	<b>Duas camadas de lâminas de madeira com fibras no sentido longitudinal</b>	<b>48</b>
5.1.2	<b>Duas camadas de lâminas de madeira com fibras no sentido transversal</b>	<b>49</b>
5.1.3	<b>Camada de lâmina de madeira com fibras transversais e camada de alumínio para fotografia .....</b>	<b>50</b>
5.1.4	<b>Camada de madeira a partir de tábuas e alumínio para construção civil</b>	<b>52</b>
5.1.5	<b>Corte da lâmina de madeira na CNC .....</b>	<b>53</b>

<b>6</b>	<b>OFICINAS SOBRE ARQUITETURA PERFORMATIVA E MATERIAIS RESPONSIVOS</b>	<b>55</b>
6.1	RESULTADOS DAS OFICINAS	61
6.1.1	Avaliação das Produções	62
6.1.2	Avaliação em relação à transmissão dos conceitos	73
<b>7</b>	<b>ESTRUTURA COM REVESTIMENTO DE MATERIAL RESPONSIVO DE MADEIRA E ALUMÍNIO</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO APLICADO AOS PARTICIPANTES DA SEGUNDA E DA TERCEIRA OFICINAS</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B – PLACA INFORMATIVA DA ESTRUTURA</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO DAS AMOSTRAS NO GRASSHOPPER E CÓDIGO C+ UTILIZADO</b>	<b>94</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa trata do ensino de conceitos de arquitetura performativa nos ateliês de projeto, por meio do uso de protótipos higroscopicamente responsivos de duas camadas, sendo a camada ativa composta de madeiras brasileiras. Esses componentes podem contribuir para uma abordagem diferente das relações espaciais na arquitetura em relação aos limites dos elementos arquitetônicos.

Os espaços costumam ser demarcados com os planos dos materiais, levando em consideração apenas os limites físicos que demarcam as fronteiras desses espaços. Assim, os limites espaciais e os limites físicos costumam ser entendidos como um conceito único, dando a ideia de ambientes estáticos e monolíticos, assim como os materiais que os constituem. Uma outra abordagem, dentro do contexto de limites da teoria da termodinâmica, vem sendo discutida, e trata os limites arquitetônicos de um modo mais fluido, como zonas de transição entre diferentes estados de energia (ADDINGTON; SCHODEK, 2005).

Nesse contexto se insere a *performative architecture*, em que Lenz e Celani (2015) partem das definições de Kolaveric (2005) para propor duas classificações para a performance arquitetônica:

Estática: aquela que busca um desempenho a partir da estrutura fixa do sistema, geralmente otimizada para um determinado estado do ambiente. Dinâmica: aquela que busca o desempenho a partir da reconfiguração do sistema, como resposta a variações no ambiente (LENZ; CELANI, 2015).

Os materiais responsivos, ou materiais inteligentes (*smart materials*) surgem para atender às demandas de desempenho dentro desta classificação de adaptação em relação ao espaço no qual se insere, ao adequarem suas características como resposta a estímulos do ambiente. Assim, os materiais são percebidos com um novo viés dinâmico, dissociando os limites espaciais dos limites físicos, tornando a arquitetura mais interessante por conta das novas relações que ocorrem com as variações destes através do tempo (ADDINGTON; SCHODEK, 2005).

Hensel (2011) questiona se os materiais responsivos são resultado de um mecanismo como um todo, considerando conexões eletromecânicas, ou de suas propriedades intrínsecas. E, ainda, se materiais responsivos precisam ser especificamente desenvolvidos, com componentes elétricos e tecnologias específicas, ou materiais existentes e atualmente desprezados como não-responsivos podem ser utilizados, explorando-se suas características de

comportamento e desempenho. A partir destas questões, o autor propõe que se analise os materiais tradicionais com novo foco, para que se repense suas propriedades e seu comportamento possa ser reavaliado de modo positivo e incorporado ao projeto arquitetônico.

Analisando, por exemplo, a madeira como um material que se adapta a estímulos do ambiente – como um material responsivo – o comportamento de contração por higroscopia<sup>1</sup> deixa de ser um defeito para ser sua principal característica (HENSEL, 2011). Com a industrialização dos processos construtivos, a busca por insumos cada vez mais homogêneos transformou a madeira, com suas características de anisotropia<sup>2</sup> e higroscopia, em um material subaproveitado, tendo sua reação intrínseca de contração e dilatação por umidade e temperatura atenuado de diversas formas – a orientação das fibras nas placas de OSB<sup>3</sup> é um exemplo disso (HENSEL, 2011).

O uso da madeira como um material responsivo ainda se encontra em estágio inicial, e sua inclusão no ensino de arquitetura é ainda mais restrita. A metodologia aplicada nas oficinas desta pesquisa foi fundamentada em experiências anteriores de ensino de arquitetura performativa com material responsivo de madeira, em três instituições da República Checa (DAVIDOVA; SEVALDSON, 2016). A proposta checa baseou-se em aulas teóricas sobre assuntos relacionados ao tema, com atividades práticas que resultaram na produção de protótipos. O conteúdo foi apresentado dentro de oficinas com duração de dois a quatro meses, com alunos da graduação (DAVIDOVA; SEVALDSON, 2016).

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA RELEVÂNCIA E ABORDAGEM DO TEMA

A arquitetura performativa, quando discutida em ateliê, tende a se restringir aos aspectos relacionados ao desempenho dos sistemas (ANDRADE, 2012). Questões como a interatividade entre usuários, arquitetura e ambiente são abordadas em contextos que requerem mais tecnologia, e maior conhecimentos dessas, do que as disponíveis nas universidades brasileiras.

Ao se incorporar um debate alternativo sobre as propriedades de materiais com os quais os alunos já estão familiarizados, como o proposto por Hensel (2011) em relação à madeira, pode-se tornar mais acessível a aplicação de conceitos de arquitetura performativa

---

<sup>1</sup> Higroscopia: propriedade dos materiais de absorverem água.

<sup>2</sup> Anisotropia: característica de certos materiais em que suas propriedades físico-mecânicas se alteram ao longo de seus eixos.

<sup>3</sup> *Oriented Strand Board*: placas compostas de camadas de lascas de madeiras orientadas em determinada direção para minimizar os efeitos higroscópicos e aumentar a resistência do componente

desde a concepção dos projetos, focando mais nos aspectos de interação entre arquitetura, usuários e ambiente do que no desempenho dos sistemas.

Considerando-se ainda a importância da produção de madeira no Brasil (VIDAL et al., 2015), que conta com usos diversos na arquitetura, engenharia e construção civil em geral, observa-se a relevância dos estudos que envolvam novas apropriações desse material, e se combinados ao uso de espécies brasileiras de florestas com manejo sustentável, pode contribuir para diminuir o impacto ambiental.

Assim, o desenvolvimento de componentes baseados nas propriedades de adaptação à umidade do ambiente da madeira pode ser uma solução simples e financeiramente viável. A aplicação prática de conceitos por meio de atividades manuais, apoiada por ferramentas de fabricação e prototipagem digitais, alia o desenvolvimento das habilidades dos estudantes com a inserção de novas tecnologias no repertório projetual desses. Os componentes responsivos de madeira podem ser utilizados como elementos de revestimento que promovem controle de sombreamento e permeabilidade visual, assim como a reconfiguração espacial.

Diante do exposto, esta pesquisa procura explorar métodos práticos para incorporar conceitos de arquitetura performativa, com base na seguinte pergunta:

Como introduzir o tema 'performance na arquitetura' nos ateliês de projeto, de modo a destacar os seus aspectos de interação com o ambiente e as pessoas, utilizando a madeira como material responsivo?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral é explorar o uso de protótipos higroscopicamente responsivos de madeiras brasileiras selecionadas no ensino de arquitetura performativa em ateliês de projeto, utilizando protótipos produzidos com madeira como material responsivo em componentes higroscopicamente responsivos de dupla camada.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

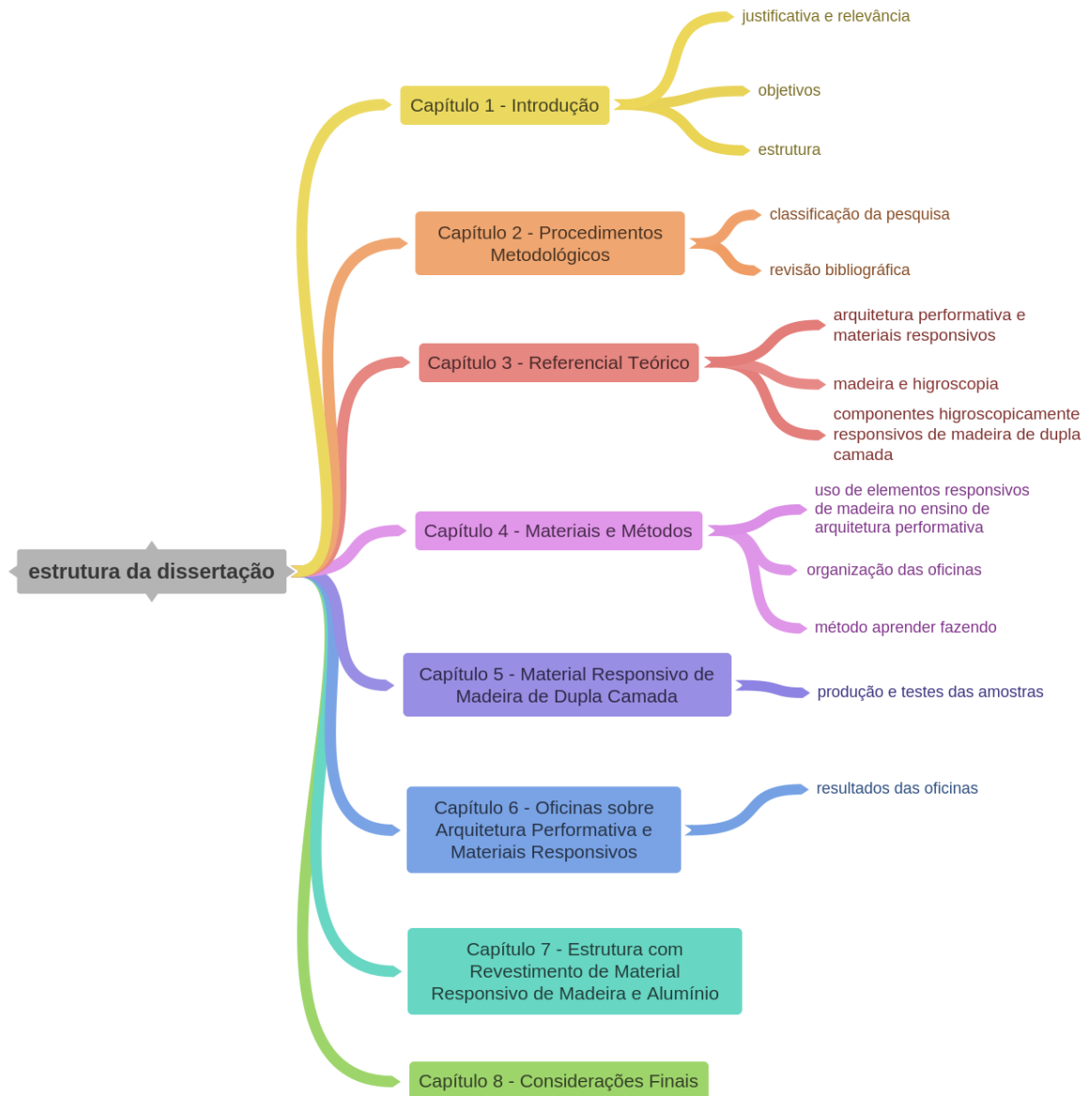
- Identificar a base teórica sobre arquitetura performativa e materiais responsivos, especialmente os que se utilizam de madeira como material;

- Analisar a forma e composição de elementos responsivos de madeira e seu comportamento com o aumento da umidade em ambiente controlado;
- Verificar a aplicação do material responsivo de madeira como ferramenta para ensino de arquitetura performativa e materiais responsivos;
- Investigar o uso do material como elemento de revestimento da arquitetura.

### 1.3 ESTRUTURA GERAL

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, mais as REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS e os Apêndices. A Introdução apresentou a justificativa e relevância do tema e os objetivos geral e específicos. Os Procedimentos Metodológicos tratam dos métodos para coleta e avaliação de dados, e da classificação da pesquisa. O Referencial Teórico fundamenta a investigação, separado em três temas: Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos, Madeira e Higroscopia, e Componentes Higroscopicamente Responsivos de Madeira de Dupla Camada. Em Materiais e Métodos são apresentadas as metodologias para realização dos experimentos e das oficinas, assim como ferramentas e materiais utilizados nesta pesquisa. O Capítulo 5 expõe os resultados da primeira etapa da pesquisa, sobre Material Responsivo de Madeira e Alumínio de Dupla Camada, e o Capítulo 6 apresenta a aplicação do material em questão em oficinas sobre arquitetura performativa e materiais responsivos. No Capítulo 7 é relatada uma proposta de uso para o material, em uma estrutura fabricada digitalmente coberta com elementos responsivos de madeira e alumínio. Por fim, são apresentadas as Considerações Finais sobre a pesquisa.

Figura 1 - Esquema da estrutura da dissertação.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

## 2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Em relação aos objetivos, esta investigação classifica-se como exploratória, por buscar "maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito" (GIL, 2010, p. 27). Foi dividida em quatro momentos: a revisão bibliográfica para compor o Referencial Teórico, os testes experimentais com Material responsivo de madeira de dupla camada, a aplicação de Oficinas sobre arquitetura performativa e materiais responsivos, e a construção de uma Estrutura com revestimento de material responsivo de madeira e alumínio. A revisão bibliográfica, explicada a seguir, envolveu os temas Arquitetura Performativa, Materiais Responsivos, Madeira e Higroscopia, e Materiais Responsivos de Madeira de Dupla Camada.

A etapa de estudos do comportamento higroscópico de componentes de dupla camada de madeira e alumínio ocorreu por meio de procedimentos experimentais, que consistem em "determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto" (GIL, 2010, p. 32). Nessa etapa foram realizados testes com protótipos de dupla camada em madeira e alumínio em um ambiente controlado, para compreensão dos efeitos.

Em seguida aplicou-se o conhecimento anterior em oficinas para alunos da graduação, baseando-se em estudos de casos, que é o "estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento [...], adequado para investigação de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real" (GIL, 2010, p.37). A descrição do contexto em que se situa a aplicação das oficinas, no qual se estudam situações reais de aplicação didática de novos conceitos arquitetônicos, propicia a escolha deste procedimento (GIL, 2010).

A última etapa buscou validar a proposta de uso do material em questão em uma estrutura.

### 2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi elaborada com base em dois métodos: a revisão narrativa e a integrativa. A revisão narrativa é a revisão bibliográfica tradicional, que parte de uma busca sem uma questão específica precisa (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011; CORDEIRO et al., 2007). Tende a ser mais aberta e flexível do que os outros tipos de revisão, por não ter uma

metodologia de pesquisa de referências estabelecida, fontes de informação, critérios de avaliação e seleção de trabalhos. Os resultados obtidos dependerão da percepção subjetiva de quem faz a pesquisa. A revisão narrativa contextualiza o assunto em questão, contribuindo para a formação de um quadro de estado da arte (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011; CORDEIRO et al., 2007).

A revisão integrativa é um método menos rígido de revisão sistemática, pois embora ainda tenha a mesma organização, a integrativa abrange outras fontes além de artigos científicos, como teses, dissertações e livros (POMPEO; ROSSI; GALVÃO, 2009). Este método possibilita sintetizar e analisar o conhecimento de certo tema até o momento. Os passos para uma revisão integrativa são os seguintes (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011):

1. Identificação do tema e seleção da pergunta de pesquisa;
2. Estabelecimento de critérios de seleção de fontes bibliográficas;
3. Identificação dos estudos pré-selecionados;
4. Categorização dos estudos selecionados;
5. Análise e interpretação dos resultados; e
6. Apresentação da síntese do conhecimento.

A última etapa deve apresentar todos os procedimentos que foram tomados para a obtenção dos principais resultados, de modo que a pesquisa possa ser refeita por outros pesquisadores (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011).

A coleta de informações iniciou-se a partir de uma revisão manual sobre materiais responsivos de madeira em agosto de 2017. Com os principais artigos encontrados, foi executada uma revisão de outros trabalhos dos autores dos artigos selecionados, assim como do referencial teórico do material em questão. Para melhor entendimento de assuntos correlatos, fez-se uma pesquisa, com base no referencial teórico dos artigos selecionados, sobre o tema madeira e higroscopia, encontrando-se dois livros sendo citados com frequência.

Para arquitetura performativa, procedeu-se da mesma maneira, executando-se uma revisão narrativa com os termos “*performative architecture*” e “*responsive architecture*” em janeiro de 2018. Neste primeiro momento, de busca mais aberta e sem critérios, procurou-se observar em termos gerais quais são as abordagens do tema e suas definições. Com os resultados dessa primeira pesquisa, partiu-se para uma revisão integrativa dos temas materiais responsivos de madeira e arquitetura performativa.

A revisão integrativa sobre materiais responsivos de madeira foi realizada com o objetivo de identificar exemplos de pesquisas com componentes higroscopicamente responsivos de madeira de dupla camada que pudessem ter aplicação prática. Essa busca foi

realizada em janeiro de 2018, pelo Portal de Periódicos CAPES, utilizando as palavras-chave “*hygroscopic wood*” AND “*responsive*”, com o recorte de artigos revisados por pares nos últimos cinco anos. Foram encontrados um total de 116 artigos; pela leitura do título e resumo e a análise da introdução, dois foram selecionados. Além das revisões, procurou-se seguir as publicações dos autores relevantes sobre o assunto para acompanhar o desenvolvimento das pesquisas.

Em relação ao tema arquitetura performativa, a revisão integrativa foi efetuada em março de 2018, para aprofundar as definições sobre o assunto. Usando o Portal de Periódicos CAPES, com o recorte de artigos revisados por pares nos últimos dez anos, a procura pela palavra-chave “*performative architecture*” retornou 59 resultados, e com “*responsive architecture*” foram 78 resultados, sendo que com o último termo os resultados foram mais relevantes. Com nove resultados selecionados pelo título e resumo, destes, três foram incluídos na análise final. A Tabela 1 relaciona os resultados da revisão para os temas abordados. Em março de 2019, uma nova revisão narrativa adicionou mais três trabalhos para os temas arquitetura performativa e materiais responsivos.

Tabela 1 - Revisão para os temas Materiais responsivos de madeira e Arquitetura performativa.

**Tema: Materiais responsivos de madeira**

<b>Tipo de revisão</b>	<b>Trabalhos selecionados</b>	<b>Total de trabalhos selecionados</b>
Revisão integrativa	2	10
Revisão manual	8	
<b>Tema: Arquitetura performativa</b>		
Revisão integrativa	3	11
Revisão manual	8	
		<b>21</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2019).



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico aborda os principais temas desta pesquisa, que foram divididos em três grupos, para facilitar a organização. São eles: Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos; Madeira e Higroscopia; e Componentes higroscopicamente responsivos de madeira de dupla camada. A construção do referencial teórico foi elaborada a partir da revisão bibliográfica, detalhada no capítulo Procedimentos Metodológicos.

#### 3.1 ARQUITETURA PERFORMATIVA E MATERIAIS RESPONSIVOS

Na arquitetura, a definição dos espaços costuma estar vinculada aos planos das superfícies dos materiais. A relação entre interior e exterior é determinada pelos limites físicos estabelecidos por esses planos, que podem ser lidos como uma barreira a ser cruzada entre os espaços, e também um modo estático e preciso para definir o que é dentro e o que é fora (ADDINGTON; SCHODEK, 2005; HENSEL, 2011).

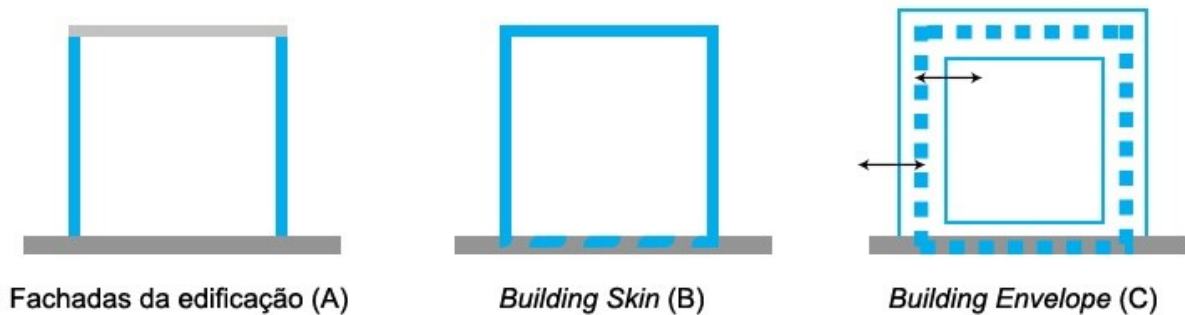
Nesse contexto, as fachadas de uma construção (Figura 2 A) se tornam uma representação da arquitetura, o limite que interrompe as trocas entre ambientes, diminuindo ou até ignorando a importância do lugar em que se insere o elemento arquitetônico (DERAKHSHI, 2017). A relação interior-exterior fica reduzida a aspectos tecnológicos na busca por soluções de menor consumo energético para literalmente isolar os ambientes. As trocas entre os espaços – fluxos de energia e pessoas – ficam então comprometidas, uma vez que as soluções propostas concedem aos planos de limites características que restringem essas trocas, como solidez e opacidade (HENSEL, 2011).

O conceito de *building skins* (Figura 2 B) acrescenta complexidade às definições de limites espaciais, uma vez que as alterações ocorridas externamente influenciam no ambiente interno. A barreira delimitadora torna-se mais flexível, permitindo certas trocas entre os espaços, embora ainda seja constituída de elementos físicos (DERAKHSHI, 2017).

Por sua vez, os *building envelopes* (Figura 2 C) incorporam os conceitos de fachadas e *building skins* para serem interpretados como uma zona espacial que os usuários podem experimentar, de modo interativo, a performance arquitetônica (DERAKHSHI, 2017), assim como o proposto por Addington e Schodek (2005), ao se apropriarem da definição de limites da termodinâmica, que são descritos como zonas de mudança de energia. Assim, os limites tornam-se mais flexíveis e dinâmicos, porque não são mais determinados por objetos físicos tidos como imutáveis, mas agora funcionam como áreas de transição, em que há uma progressão

de um estado para outro (ADDINGTON; SCHODEK, 2005). Com isso, um espaço de transição que comunica o interno e o externo é gerado, e nesse contexto as características do local ganham destaque, e o enfoque passa a ser nas atmosferas criadas e que se entrelaçam, dissolvendo-se de um espaço (externo) para outro (interno), criando o caráter do elemento arquitetônico (DERAKHSHI, 2017).

Figura 2 - Esquema de representação de diferenças entre fachadas, *building skins* e *building envelopes*.



Fonte: DERAKHSHI, 2017, adaptado pela autora.

A arquitetura performativa insere-se neste contexto de transformações e adaptações, envolvendo desde a busca por otimização de desempenho até interações sociais promovidas por intervenções artísticas, indicando as mudanças culturais que surgem na sociedade. Os recentes avanços tecnológicos, assim como o crescente interesse em alternativas sustentáveis e temas sociais, trouxe destaque à performance como um novo método de desenvolvimento de projeto (KOLAREVIC, 2005).

O significado do termo performance e sua associação com as artes tem origem em um movimento de meados do século XX, a virada performativa, que teve a contribuição de pensadores de diferentes áreas das ciências sociais e artes, permitindo múltiplas interpretações do conceito, mas tendo em comum os aspectos espaciais e temporais, assim como elementos sociais e culturais (NISEBAUM, 2016; HENSEL, 2013a).

Por ser a princípio um meio de interpretação do comportamento humano, a performance pode ser relacionada ao conceito de agência, que pode ser definido como a intenção de ação de uma pessoa no mundo. Para que a abordagem de performance possa ser incorporada à arquitetura, deve-se levar em consideração uma definição de agência mais ampla, que envolva a ação de objetos (HENSEL, 2013b).

Derakhshi (2017) apresenta os conceitos de agente ativo, que modifica o estado de um sistema ao executar uma ação, e agente passivo, que está à espera de uma ação para ser configurado. Assim, a experiência dos espaços arquitetônicos é feita com a integração das

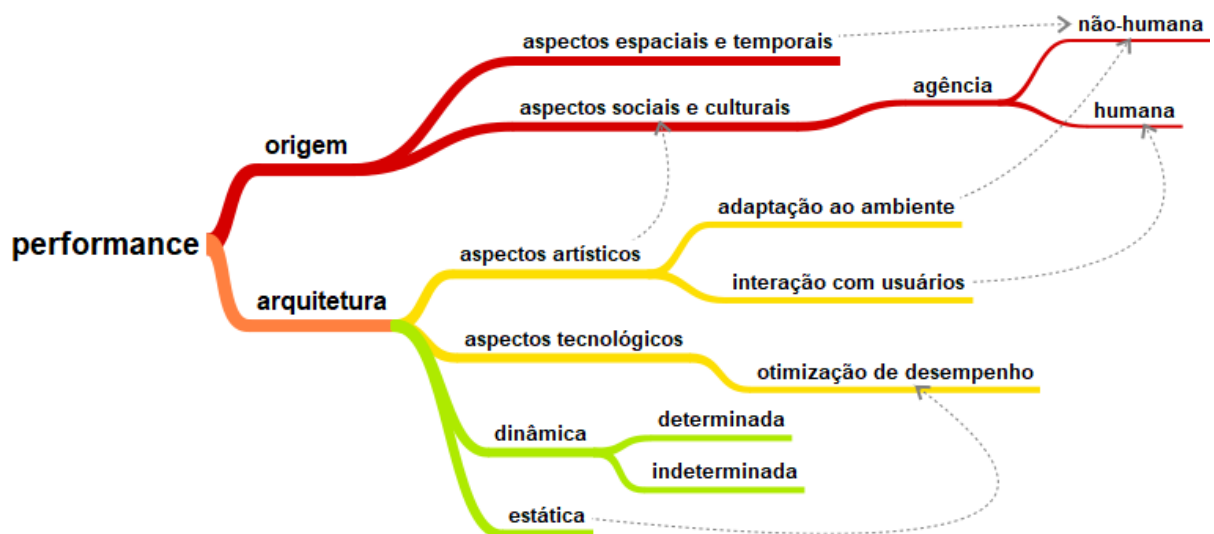
peças com os elementos não-humanos, sejam objetos construtivos ou elementos do meio ambiente.

A performance na arquitetura pode estar associada tanto à melhoria de desempenho de um sistema, como ser uma manifestação artística, com interações com os usuários ou respostas a variações ambientais, ainda que os dois conceitos não sejam mutuamente excluídos (LENZ; CELANI, 2015). O aspecto artístico surge com a experimentação da arquitetura pelos usuários, sendo mais perceptível com a presença de características cinéticas. O movimento das pessoas interagindo com o espaço ou o movimento de adaptação dos componentes a mudanças no ambiente transformam o elemento arquitetônico, com alterações fisicamente perceptíveis, que impulsionam diferentes experiências dos usuários em relação ao lugar (KOLAREVIC, 2005).

Na busca pelo melhor desempenho, a arquitetura performativa pode ter características dinâmicas ou estáticas. A performance estática tem seu foco em melhorar o desempenho de algum aspecto construtivo (desempenho térmico, lumínico, estrutural, entre outros) dentro dos conceitos arquitetônicos vigentes sobre as relações de espaço e materiais (LENZ; CELANI, 2015). Essa noção aproxima-se mais do sentido de desempenho da arquitetura, que tem se desenvolvido com os processos de projeto baseados em desempenho (ANDRADE, 2012).

Por sua vez, uma arquitetura performativa dinâmica também tem como objetivo a melhoria da edificação, mas por meio dos conceitos mais inovadores, que trazem novas formas de abordar os espaços, os materiais e os usuários. Kolarevic (2005) afirma, sobre a dinâmica na arquitetura performativa, que essa pode ocorrer de modo determinado, quando há um planejamento anterior e os movimentos são pré-programados, ou pode ser indeterminado, acontecendo de forma a responder a mudanças no ambiente.

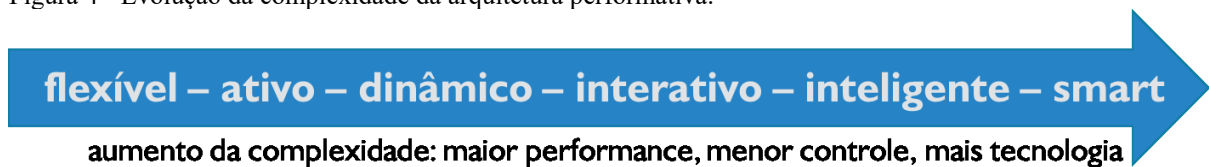
Figura 3 - Esquema para classificações de arquitetura performativa.



A arquitetura contemporânea, com seu foco em performance, tem procurado compreender as relações dos materiais de novas maneiras, concentrando-se mais no seu comportamento e como respondem a variações de estímulos do que somente em suas propriedades físico-mecânicas (ADDINGTON; SCHODEK, 2005), de modo que a escolha dos materiais e a concepção formal do objeto arquitetônico estejam interligados desde o início do processo de projeto (KOLAREVIC, 2005). A pesquisa a respeito dos *smart materials*, ou materiais responsivos, fornece subsídios para essa área, ao estudar as relações entre as alterações de estímulos e a composição dos materiais e seu comportamento de acordo com tais mudanças (ADDINGTON; SCHODEK, 2005).

Lelieveld (2013) apresenta a evolução de complexidade da arquitetura performativa, relacionando as especificações de controle, performance e tecnologia requerida para cada categoria (Figura 4). O primeiro nível, flexível, necessita de uma tecnologia mecânica para apresentar mudanças em uma única função. Sua ativação é feita externamente pelo usuário, de modo manual.

Figura 4 - Evolução da complexidade da arquitetura performativa.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Um sistema ativo também apresenta mudanças em uma única função, mas requer uma fonte de energia para funcionamento de um sistema tecnológico em que é pré-definida uma reação a um comando específico. O acionamento ainda é ativado pelo usuário (LELIEVELD, 2013).

Um componente dinâmico é programado para ter certa mudança de acordo com alterações captadas por seus sensores, por isso uma tecnologia mais avançada é necessária para o seu funcionamento. Sua atuação é desempenhada de modo autônomo, não necessitando da intervenção das pessoas (LELIEVELD, 2013).

A interatividade ocorre quando um sistema reage de modo imediato a uma transformação no ambiente ou com uma interação das pessoas. A mudança ainda é em uma função, mas com maior variedade de modos (LELIEVELD, 2013).

Um componente inteligente é formado por uma rede de subsistemas conectados para otimizar o desempenho da construção como um todo. Pode, então, agir em múltiplas funções, ao interagir com o usuário e o ambiente. "O sistema pode detectar, processar, decidir se deve

reagir, como reagirá e quando [e tem] a capacidade de tomar a iniciativa de se adaptar e como se adaptar" (LELIEVELD, 2013, p. 41).

*Smart architecture* é um nível acima dos sistemas inteligentes por ser parte da vida e comportamentos tanto dos usuários como do ambiente, por serem baseados em inteligência artificial e tecnologias de materiais, algumas ainda não atualmente disponíveis. Tem a capacidade de evoluir por si próprio, e eventualmente poderá reagir até às emoções humanas, tornando-se cada vez mais parecido com interações humanas (LELIEVELD, 2013).

Em se tratando de materiais responsivos, falta um consenso sobre a estrutura geral destes, uma vez que podem ser desde uma estrutura molecular até um conjunto de sistemas. Addington e Schodek (2005) citam as principais características presentes em materiais responsivos:

- Resposta imediata: que ocorre assim que há a variação do estímulo;
- Transitoriedade: quando há resposta para mais de um estado ambiental;
- Auto atuação: por não haver necessidade de mecanismos externos ao sistema para ativação da resposta;
- Seletividade: quando a resposta é única e previsível para determinado estímulo;
- Exatidão: quando a resposta ocorre no local onde ocorreu o efeito ativador.

Com base nas propriedades listadas acima, Hensel (2011) propõe o uso de materiais comuns, abordados por um novo viés, que explora as propriedades físico-mecânicas e seus comportamentos de modo a obter um melhor aproveitamento do material, e não mais encarando como defeitos o que são respostas a variações ambientais, como as deformações que ocorrem com a madeira conforme as alterações de umidade relativa do ar.

### 3.2 MADEIRA E HIGROSCOPIA

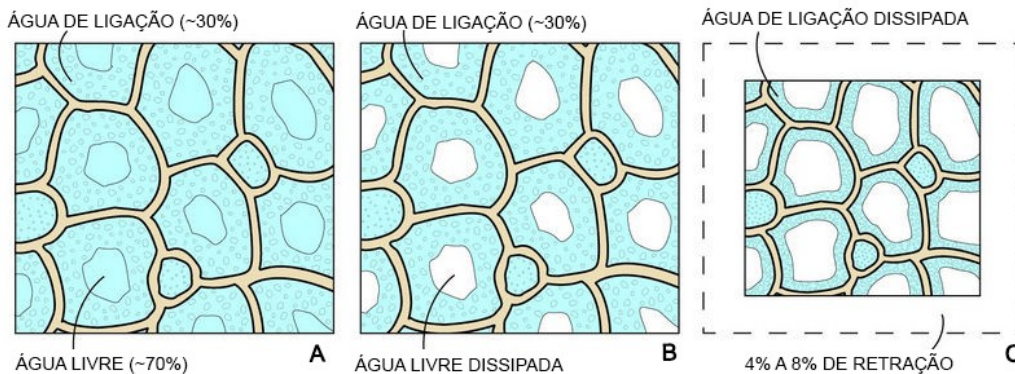
Diferente de outros materiais normalmente utilizados na arquitetura, a madeira é um produto natural, de fonte renovável, composto pelos tecidos lenhosos de árvores. A composição de cada tecido determinará a função por eles exercida quando a madeira ainda é parte da árvore, e essa composição resultará em propriedades macroscópicas diferentes no momento em que a madeira for utilizada como um material de construção (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Nas relações entre madeira e água, as estruturas celulares constituídas por moléculas de celulose desempenham importante papel, uma vez que são as fibras de celulose nas paredes

celulares que absorvem e liberam água, provocando os movimentos macroscópicos de dilatação e contração por diferença de umidade (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015; HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2017).

Quando é recém cortada, a madeira possui água em estado líquido e em vapor dentro das células, e nas paredes celulares (Figura 5 A). Os diferentes estados da água proporcionam diferentes níveis de tensões entre as moléculas, que, por sua vez, definem a estabilidade da água no interior da madeira, o quão rápido acontecerá a troca de água com o ambiente (SKAAR, 1988). A água líquida dentro das células, chamada também de água livre, possui menor ligação molecular com os componentes das células, e por isso é a primeira a evaporar no momento de secagem da madeira. A água presente nas paredes celulares e em forma de vapor, chamada de água de ligação, possui maior atração molecular e permanece por mais tempo no interior da madeira. Quando toda a água livre é evaporada e resta apenas a água de ligação, diz-se que a madeira está com suas fibras saturadas (Figura 5 B) (SKAAR, 1988; WALKER, 2006).

Figura 5 - Tipos de água na madeira.



Fonte: ENGLER, 2009<sup>4</sup>, adaptado pela autora.

Skaar (1988) cita a existência de cerca de quinze métodos para a medição da quantidade de água na madeira, o mais usado é o método gravitacional, em que a amostra é inicialmente pesada ( $M_0$ ), sendo colocada para secar em uma estufa ventilada a  $103^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$  e pesada a intervalos regulares, até que o peso seja constante em medições seguidas. O peso final ( $M_s$ ) é diminuído do peso inicial ( $M_0$ ), e o resultado é dividido pelo peso inicial ( $M_0$ ) e multiplicado por 100%, resultando no teor de umidade da madeira (Equação 1).

Equação 1: Teor de umidade da madeira.

$$T_u = [(M_0 - M_s) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

<sup>4</sup> ENGLER, Nick. **Workshop Companion: Wood movement**. 2009. Disponível em: <[http://workshopcompanion.com/KnowHow/Design/Nature\\_of\\_Wood/2\\_Wood\\_Movement/2\\_Wood\\_Movement.htm](http://workshopcompanion.com/KnowHow/Design/Nature_of_Wood/2_Wood_Movement/2_Wood_Movement.htm)>. Acesso em: 5 ago. 2018.

A madeira é considerada seca quando atinge o ponto de saturação das fibras, quando toda a água livre foi evaporada e resta apenas a água de ligação. Costuma-se adotar um valor em torno de 30% de teor de umidade como o ponto de saturação das fibras (WALKER, 2006).

As propriedades mecânicas da madeira apresentam melhora nos seus índices quando o teor de umidade está abaixo dos 30%, e é com as variações do teor de umidade abaixo desse valor que a madeira apresenta as deformações por contração e dilatação, que são imperceptíveis antes desse valor, devido à troca de água com o ambiente (Figura 5 C) (SKAAR, 1988).

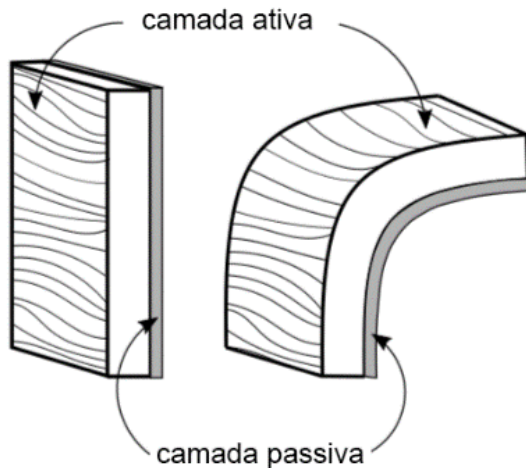
A madeira seca tem uma tendência a entrar em equilíbrio higroscópico com o ambiente no qual está inserida, ainda que demorem semanas e meses para que esse equilíbrio seja atingido. Se submetida a ciclos repetidos de variações de umidade, em curtos espaços de tempo, a madeira não terá tempo de atingir o equilíbrio com o ambiente, desse modo, as deformações causadas serão reversíveis (SKAAR, 1988).

### 3.3 COMPONENTES HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS DE MADEIRA DE DUPLA CAMADA

A observação do comportamento de elementos da natureza, como pinhas e sementes de plantas, inspirou a busca por um sistema de sombreamento de fachadas com menor impacto ambiental e sem consumo energético (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Analisando as propriedades de higroexpansão da madeira pelo viés dos materiais responsivos (HENSEL; 2011), foi proposto um sistema semissintético de dupla camada, com uma camada de material higroscopicamente inerte e uma camada de madeira, que reage a partir das alterações da umidade relativa do ambiente (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015).

Nesse sistema, a madeira funciona como elemento ativo, respondendo às alterações de umidade no ambiente, pelas suas relações com a água. Com a dilatação ocorrida pela absorção de água, a madeira provoca uma curvatura no componente, que volta ao seu estado original assim que o ambiente retorna às condições anteriores (Figura 6). O material sintético potencializa os efeitos de curvatura, além de absorver parte dos esforços decorrentes da deformação da madeira (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015). Exemplos de sua aplicação são apresentados no item 3.3.1 Aplicação dos componentes responsivos de madeira como *building skin*.

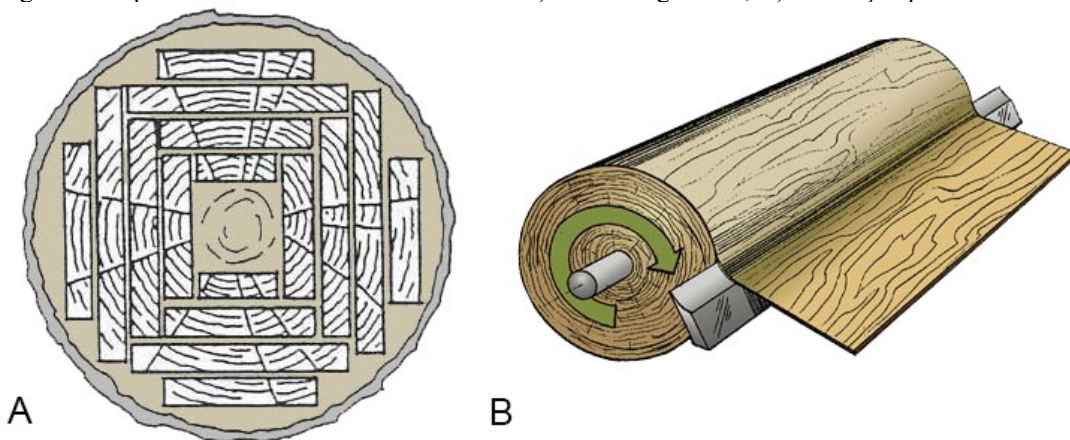
Figura 6 - Esquema de componente higroscopicamente responsivo de madeira e material sintético.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A orientação das fibras tem grande importância, pois a maior curvatura ocorre no sentido perpendicular às fibras. As fibras de celulose absorvem e liberam água, dilatando-se e contraindo-se no seu sentido transversal. Madeiras com pouca variação nas fibras, poucos defeitos, como nós, e madeiras do cerne apresentam melhor desempenho por possuírem maior uniformidade em suas propriedades (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Holstov, Bridgens e Farmer (2015) indicam a escolha de lâminas oriundas de desdobros de toras com cortes tangenciais (Figura 7A) ou de laminação por torneamento (Figura 7B), já que esses cortes favorecem a orientação perpendicular das fibras. No entanto, a viabilidade comercial das espécies costuma ser o fator preponderante na escolha, e a disponibilidade local das madeiras acaba sendo a razão decisiva na hora de se definir a espécie.

Figura 7 - Tipos de desdobro de toras indicados: A) cortes tangenciais; B) laminação por torneamento.





Fontes: A) COLIN, 2011<sup>5</sup> B) MURPHY, 2017<sup>6</sup>.

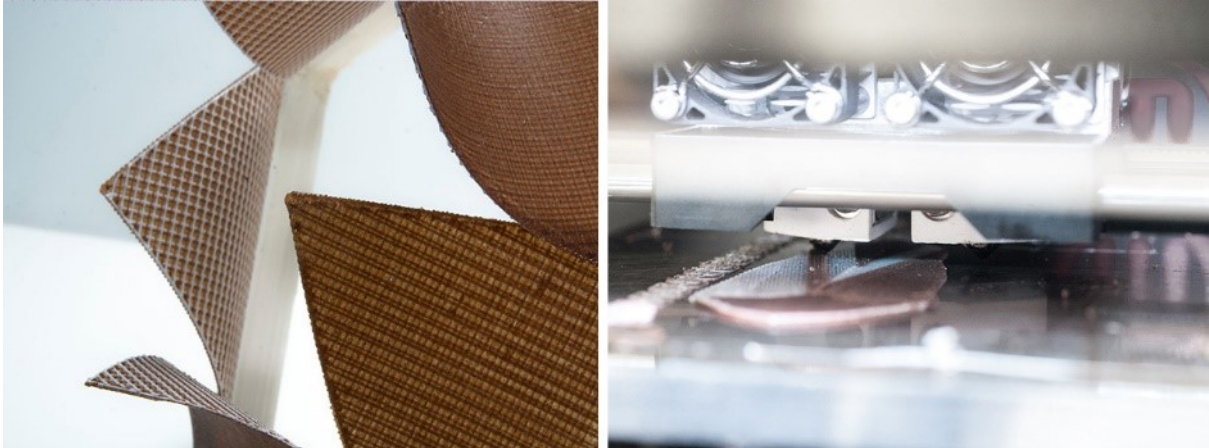
A camada passiva deve ser de um material de menor coeficiente de higroexpansão do que o da madeira, pois a resposta às variações de umidade relativa deve ocorrer na camada ativa, e a camada passiva serve como um suporte para absorver as tensões da curvatura e melhorar a resposta do componente. Pode ser usada lâmina de madeira na camada passiva, de mesma espécie ou não, mas com orientação das fibras perpendicular à camada ativa, embora possam verificar-se curvaturas em dois planos do componente, causando esforços internos desnecessários (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015). O uso de materiais sintéticos e com baixa resposta higroscópica, como polímeros, fibras de vidro reforçadas, resinas, etc., garante a estabilidade do componente (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Os materiais da camada passiva devem ser capazes de suportar sucessivas flexões sem manifestar alterações que comprometam seu desempenho, como fissuras, fragilidade, e outras deformações em geral, além de apresentarem alta durabilidade e resistência à degradação aos raios UV (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015). A camada passiva pode ser aplicada diretamente sobre a lâmina de madeira, por meio de impressão 3D com materiais como PLA e PET, em que a madeira serve de apoio direto para as camadas de filamento que atuarão como camada passiva do componente responsivo (DUIGOU et al., 2016). Outra opção é o uso de resinas epóxi, que podem ser aplicadas juntamente com outros materiais, como fibra de vidro (HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2016). No caso da impressão 3D, as fibras de madeira podem também estar misturadas no filamento, resultando em um novo material com propriedades de resposta higroscópica (Figura 8). Nesse caso, as linhas de deposição de material terão comportamento análogo às fibras da madeira, em relação a sua orientação (DUIGOU et al., 2016; ZULUAGA; MENGES, 2015).

---

<sup>5</sup> COLIN, Silvio. Coisas da Arquitetura: A madeira em tempos de sustentabilidade - II. 2011. Disponível em: <<https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2011/04/24/a-madeira-em-tempos-de-sustentabilidade-ii/>>. Acesso em: 17 set. 2017.

<sup>6</sup> MURPHY: Veneer Company. Veneer Company. 2017. Disponível em: <<http://murphyplywood.com/hardwood/veneer/>>. Acesso em: 5 ago. 2018.

Figura 8 - Exemplo de abertura responsiva impressa em 3D que se adapta às mudanças de umidade relativa (esquerda) e seu processo de fabricação (direita).



Fonte: CORREA, 2014<sup>7</sup>.

A espessura das camadas passivas e ativas influencia tanto na velocidade da resposta quanto na intensidade da curvatura (Figura 9). Camadas ativas mais espessas levam mais tempo para sentir as alterações no ambiente, portanto, apresentam deformações mais lentamente (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Mas é a proporção de espessuras entre as camadas, e a proporção de rigidez dos materiais das camadas que estão diretamente relacionadas ao melhor desempenho dos componentes. Holstov, Bridgens e Farmer (2015) afirmam que, quando a proporção de espessura entre as camadas passiva e ativa (Equação 2) for igual a 1, para que se obtenha a melhor resposta - maior curvatura em menor tempo -, é necessário que a proporção de rigidez entre as camadas (Equação 3) também seja igual a 1. Outra combinação de materiais para que se possa conseguir a melhor resposta é quando uma das camadas tiver maior rigidez (material com maior módulo de elasticidade) e menor espessura, e a outra, ao contrário (menor rigidez e maior espessura).

Equação 2 - Proporção de espessura entre as camadas passiva e ativa.

$$m = t_p/t_a, \text{ sendo } t_p \text{ a espessura da camada passiva, e } t_a, \text{ da camada ativa(2)}$$

Equação 3 - Proporção de rigidez entre as camadas

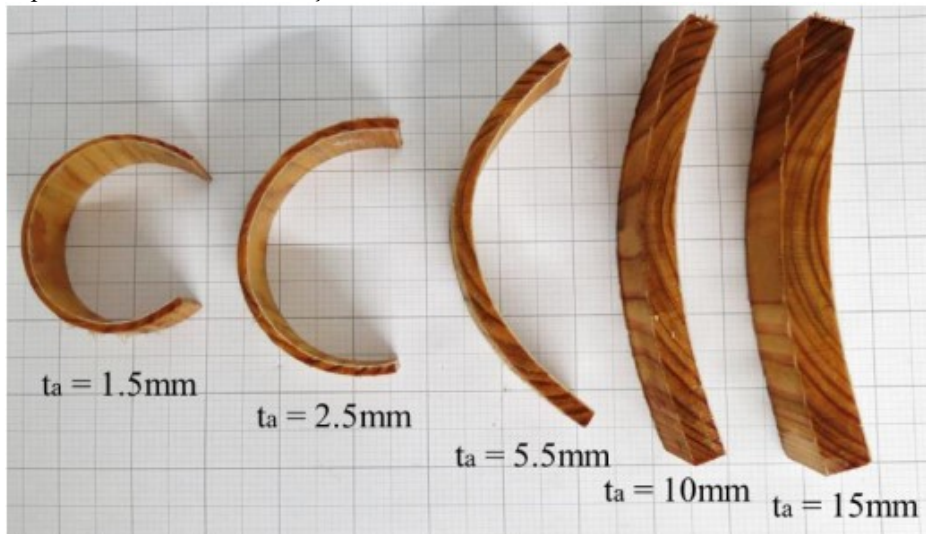
$$n = E_p/E_a, \text{ sendo } E_p \text{ o módulo de elasticidade da camada passiva, e } E_a, \text{ da camada ativa}$$

(3)

---

<sup>7</sup> CORREA, David. **3D printed Hygroscopic Programmable Material Systems**. 2014. Disponível em: <<https://icd.uni-stuttgart.de/?p=11933>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

Figura 9 - Exemplos de amostras de dupla camada de pinheiro-larício, em diferentes espessuras, e fibra de vidro, depois de submetidas à variação de umidade.



Fonte: HOLSTOV et al., 2015.

As camadas podem ser unidas por meio de adesivos, por métodos mecânicos, ou a camada passiva pode ser aplicada diretamente sobre a lâmina de madeira, no caso de resinas e fibras de vidro (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). A escolha do método de ligação das camadas deve considerar materiais com propriedades de resistência à água, flexibilidade para repetidas curvaturas, resistência mecânica para transferência dos esforços entre as camadas, fácil disposição no fim do uso e baixa toxicidade (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015). Vários tipos de adesivos já foram testados, como silicones, colas a base de poliuretano, resinas poliésteres, resinas epóxis, compósitos de fibra de vidro, etc. As resinas e os compostos de fibras de vidro atuam também como camada passiva. De modo geral, as colas a base de poliuretano apresentam bom desempenho e têm sido utilizadas em experimentos com camadas passivas sintéticas e com madeira (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015; RÜGGERBERG; BURGERT, 2015). Colas viscosas apresentam melhores resultados com madeiras com teor de umidade abaixo de 30%, pois o excesso de água na madeira altera a viscosidade da cola, diminuindo sua capacidade de adesão (HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2017).

Para camadas ativas com espessuras maiores que 3 mm, podem ser usados métodos de fixação mecânica, como parafusos e rebites, uma vez que a camada mais espessa apresenta maior resistência e permite a furação para colocação das peças. A vantagem desse modo de união é a permeabilidade da face em contato com a camada passiva, o que não ocorre nos métodos em que as camadas são unidas por meio de colas ou resinas, aumentando a superfície

livre para troca de umidade com o ambiente, o que pode aumentar a velocidade de resposta (HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2016).

A forma geométrica dos componentes vai influenciar na amplitude de curvatura (HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Peças mais alongadas no sentido perpendicular às fibras apresentam curvaturas mais acentuadas, e formas mais triangulares deformam-se mais que formas retangulares, pois “especula-se que [seja] devido à diminuição da resistência à flambagem em direção à ponta da forma” (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015, p. 60).

Para a fabricação de componentes com movimentos pré-programados é necessário ter conhecimento sobre o comportamento do material conforme as variações no ambiente em relação à umidade e temperatura do ar (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015). Para tal, é preciso realizar um controle dessas variações ambientais, de modo que os movimentos possam ser mensurados e relacionados com as mudanças ocorridas no ambiente.

Pode-se, como exemplo, alterar o resultado da curvatura final de um elemento quando submetido às variações de umidade, com os seguintes modos (HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2016):

- 1) Expondo a madeira a determinado teor de umidade antes de usá-la, ao invés de utilizar apenas a madeira seca;
- 2) Moldando a forma inicial dos componentes com fôrmas, em oposição à utilização da madeira em seu formato original;
- 3) Aplicando pressão na camada ativa, de maneira a alterar a sua capacidade de absorção de umidade;
- 4) Uma combinação dos três métodos anteriores.

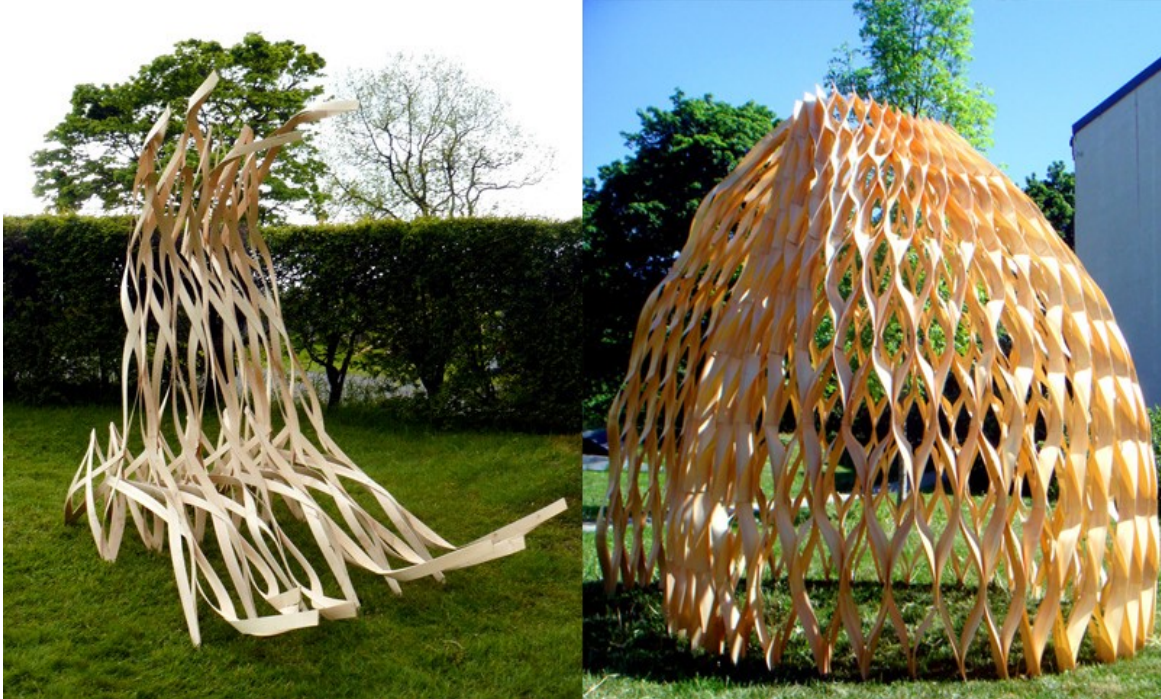
### **3.3.1 Aplicação dos componentes responsivos de madeira como *building skin***

Os componentes responsivos têm como principal uso a aplicação em *building envelopes*, que compõe uma área de transição entre espaços externo e interno, como apresentado no item 3.1 Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos (DERAKHSHI, 2017; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015).

Os estudos dos grupos de pesquisa que serviram para esse referencial teórico resultaram em protótipos em escala real de elementos arquitetônicos. Na Noruega, a *Oslo School of Architecture and Design*, com seu grupo *Responsive Wood Architecture*, produziu

dois protótipos com lâminas de pinheiro unidas quando submetidas à alta pressão com alto teor de umidade, conforme Figura 10 (HENSEL, 2011).

Figura 10 - Prêmio de segundo lugar para *Bergen International Wood Festival 2010* e Pavilhão para *Oslo Architectural 2010*.



Fonte: HENSEL; HENSEL, [2012]<sup>8</sup>.

O *Institute for Computational Design and Construction* (ICD), na Alemanha, é dedicado ao ensino e pesquisa de design computacional e processos de fabricação assistida por computador em arquitetura, e entre os resultados de suas pesquisas com materiais responsivos, destacam-se as estruturas Hygroskin, um protótipo responsivo ao clima montado na cidade de Orleans, França; Hygroscope, uma instalação responsiva no Centro Pompidou, em Paris, França; (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015) e estruturas responsivas auto-formadoras e auto-rigidizantes (WOOD et al., 2016) (Figura 11).

---

<sup>8</sup> HENSEL, Michael U.; HENSEL, Defne Sunguroglu. RESPONSIVE WOOD ARCHITECTURES. [2012]. Disponível em: <[http://www.rcat.no/index.php?option=com\\_content&view=article&id=63&Itemid=105](http://www.rcat.no/index.php?option=com_content&view=article&id=63&Itemid=105)>. Acesso em: 13 set. 2017.

Figura 11 - Em sentido anti-horário, a partir da esquerda superior, HygroSkin, HygroScope e estruturas auto-formadoras e auto-rigidizantes.



Fontes: MENGES, [2013]<sup>9</sup>; MENGES, [2012]<sup>10</sup>; WOOD et al., 2016.

No Reino Unido, a *Newcastle University* possui um grupo de pesquisa sobre materiais responsivos, com o desenvolvimento de vários protótipos para uso em fachadas (Figura 12). Está em desenvolvimento a construção de um centro de visitantes em um parque florestal em Kielder Forest, Northumberland, UK, com a utilização de elementos responsivos de madeira, ilustrado na Figura 13 (BRIDGENS; HOLSTOV; FARMER, 2017).

<sup>9</sup> MENGES, Achim. **HygroSkin**: Meteorosensitive Pavilion. [2013]. Disponível em: <<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>>. Acesso em: 1 maio 2018.

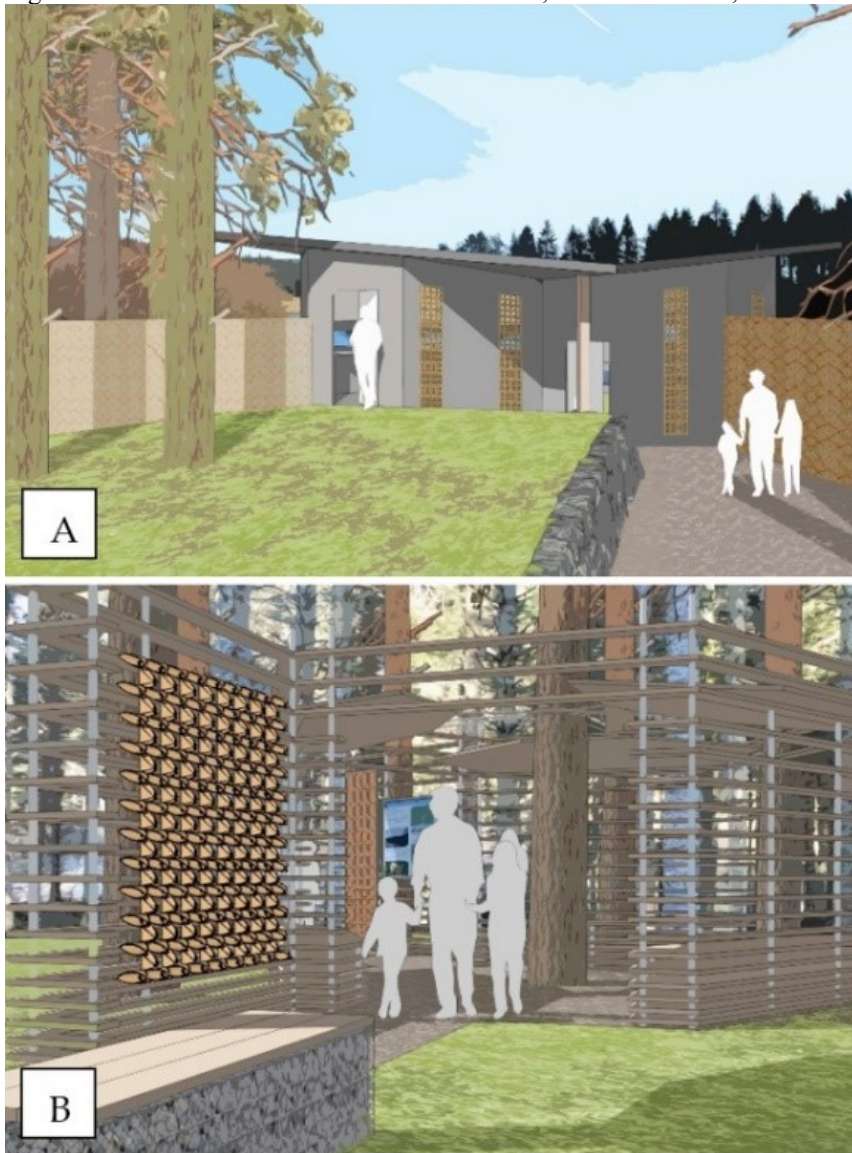
<sup>10</sup> MENGES, Achim. **HygroScope**: Meteorosensitive Morphology. [2012]. Disponível em: <<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=7291>>. Acesso em: 1 maio 2018.

Figura 12 - Protótipos da *Newcastle University*.



Fonte: HOLSTOV; FARMER; BRIDGENS, 2017.

Figura 13 - Centro de visitantes em Kielder Forest, Northumberland, UK com componentes responsivos.

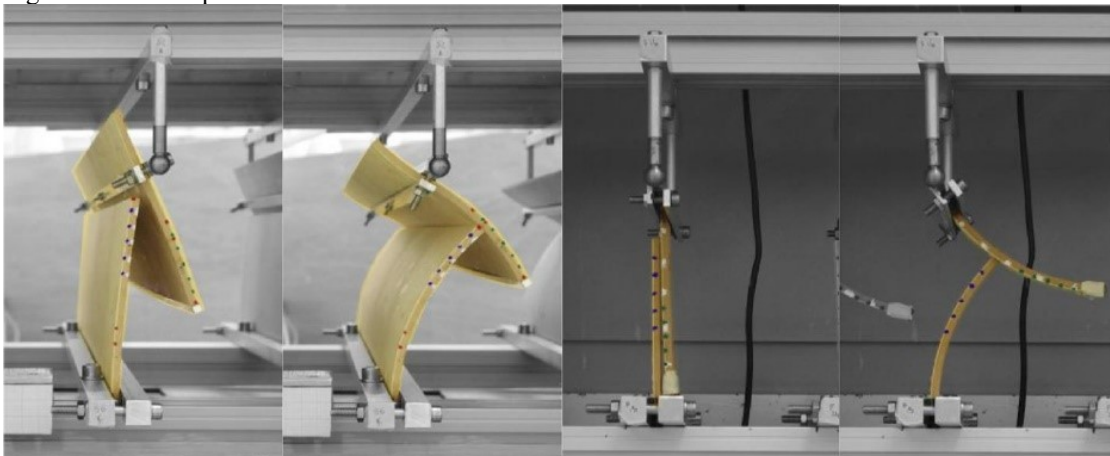


Fonte: BRIDGENS; HOLSTOV; FARMER, 2017.

A *ETH Zürich*, na Suíça, conta com um grupo de pesquisa sobre as propriedades da madeira e seu uso como material responsivo, o *Wood Actuation & Mechanics*. O grupo busca desenvolver protótipos em maior tamanho do que os já desenvolvidos, com espessuras maiores (VAILATI et al., 2018). Na Figura 14, protótipos em teste em ambiente controlado com diferentes configurações para exibir movimentos diferentes. A Figura 15 apresenta uma proposta de uso dos componentes como proteção contra insolação, fixados em uma estrutura metálica.

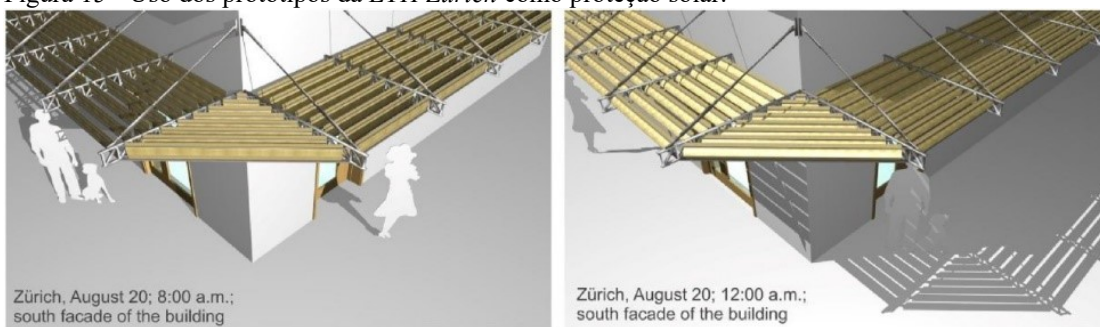


Figura 14 - Protótipos da *ETH Zürich*.



Fonte: VAILATI et al., 2018

Figura 15 - Uso dos protótipos da *ETH Zürich* como proteção solar.

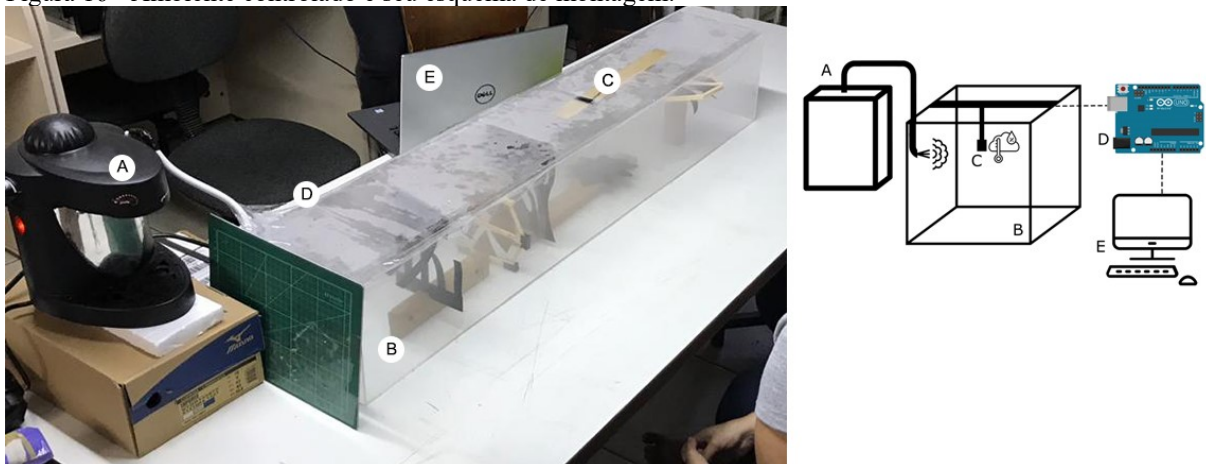


Fonte: VAILATI et al., 2018.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para possibilitar a avaliação do comportamento das amostras em função das mudanças da umidade relativa, verificou-se a necessidade de construir-se um ambiente controlado em relação às variáveis ambientais que influenciam no processo de resposta higroscópica, que são, em primeiro lugar, a umidade relativa do ar, e, em segundo, a temperatura do ar. O ambiente controlado (Figura 16) foi criado com um sistema de liberação de vapor manualmente acionado (Figura 16 A), que lança vapor d'água dentro de uma caixa vedada (Figura 16 B), construída inicialmente de vidro, e outra versão em acrílico transparente. Um sensor de umidade e temperatura modelo AM2302 DHT22 (Figura 16 C) posicionado ao centro da caixa coleta os dados ambientais. O sensor conecta-se a uma placa Arduino (Figura 16 D), que transfere as informações ao computador (Figura 16 E), onde essas são registradas segundo a segundo.

Figura 16 - Ambiente controlado e seu esquema de montagem.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A seleção das madeiras ocorreu por meio da disponibilidade comercial local de lâminas de espécies listadas no Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil (NAHUZ, 2013), que apresenta espécies com manejo controlado, diminuindo o impacto ambiental. Seis espécies foram utilizadas inicialmente, obtidas em loja de materiais para marcenaria no comércio local: angelim pedra, cumaru, curupixá, tauari, garapa e muiracatiara.

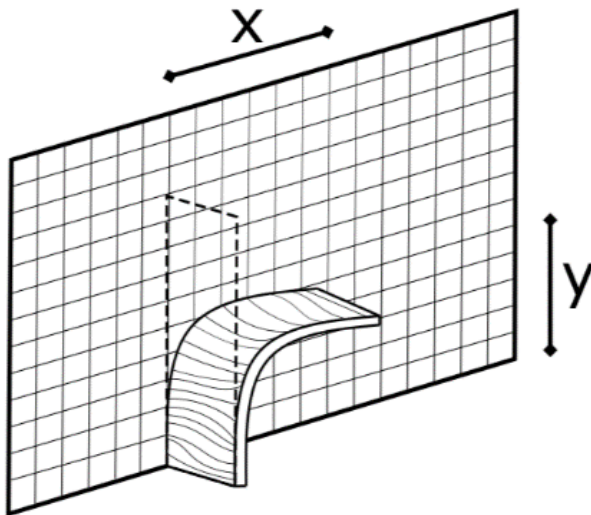
A confecção de lâminas a partir de tábuas não se mostrou viável, e as lâminas de madeira adquiridas prontas, com espessura de 0,63 mm, permitiram melhor trabalhabilidade, o que será explicado no Capítulo 5 - Material responsivo de madeira de dupla camada.

Para a camada passiva, a escolha do material levou em consideração a facilidade de manuseio e de aquisição, além das propriedades já listadas no item 3.3 Componentes higroscopicamente responsivos de madeira de dupla camada e que ainda não se tivesse dados

de pesquisa. Portanto, o alumínio utilizado para controle de luz em estúdios de fotografia, encontrado em lojas para equipamentos fotográficos, preencheu os requisitos apresentados e foi utilizado nas amostras da pesquisa.

O registro documental dos testes foi feito com fotografias e vídeos em *time-lapse* com uma câmera de smartphone, com as amostras em perfil. As imagens foram posteriormente tratadas em programa de edição para correção de distorção das lentes da câmera. Um papel milimetrado colado externamente em uma das faces da caixa de vidro possibilitou o controle da variação das deformações dos protótipos (Figura 17), por meio de medições dos perfis nos eixos x e y, e comparação dos valores após a aplicação de vapor.

Figura 17 - Esquema do método de avaliação de curvaturas dos componentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os testes foram replicados nas mesmas condições para todas as amostras, que eram colocadas dentro do ambiente controlado na caixa vedada, e fotografadas em sua posição inicial. Era aplicado vapor até que se atingisse umidade relativa de 99,9%, conforme registro do sensor, quando a liberação de vapor era encerrada e o tempo de trinta minutos dentro da caixa vedada era iniciado. Começava-se o vídeo *time-lapse*, que registrava a evolução das deformações durante os trinta minutos. Finalizado o tempo, o vídeo era terminado, as fotografias finais eram feitas, e as amostras eram retiradas da caixa vedada, sendo cronometrado o tempo que levavam para o retorno à sua forma original.

Os estudos de caso foram construídos com a realização de três oficinas sobre Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos, para alunos da graduação de arquitetura e urbanismo, com a duração de quatro horas as duas primeiras e doze horas em quatro dias a terceira.

#### 4.1 USO DE ELEMENTOS RESPONSIVOS DE MADEIRA NO ENSINO DE ARQUITETURA PERFORMATIVA

Davidova e Sevaldson (2016) organizaram duas oficinas com estudantes da graduação de arquitetura e engenharia, para o desenvolvimento em escala 1:1 de protótipos responsivos com madeira. O método aplicado, chamado de *Research by Design*, estuda as características dos materiais por meio de experimentos e análises dos resultados. Para realizar as atividades, Davidova e Sevaldson (2016) estabeleceram as seguintes etapas:

1. Pesquisa teórica sobre madeira maciça como material responsivo;
2. Avaliação do uso de modelos paramétricos para fabricação digital;
3. Escolha do método de prototipagem digital por CNC<sup>11</sup>;
4. Elaboração do projeto do protótipo pelos alunos;
5. Montagem manual do protótipo;
6. Avaliação dos resultados.

Figura 18 - *Loop Pavillion*, estrutura em escala real produzida na República Tcheca



Fonte: DAVIDOVA; SEVALDSON (2016).

---

<sup>11</sup> *Computer Numeric Control*, maquinário utilizado para corte e desbaste de materiais, com o controle feito pelo computador.

O método foi adequado para a realidade do curso de arquitetura e urbanismo da UFSC e com a pesquisa em questão, uma vez que, durante o período de estágio de docência da autora desta dissertação, foi possível observar a falta de conhecimento dos discentes em relação à modelagem paramétrica. Embora a parametrização auxilie na realização de simulações e permite o fácil ajuste do objeto, o tempo disponível para as atividades não permitiu a capacitação dos alunos em relação à ferramentas paramétricas. Por isso, optou-se por projetos em ambiente CAD 2D (*Computer Aided Design*), com o qual já estavam acostumados. Como as lâminas de madeira utilizadas possuem menor espessura, escolheu-se utilizar a cortadora a laser, que facilita a execução de formas mais complexas. Já a alternativa da CNC tem limitações quanto às formas: por exemplo, cantos agudos internos não são possíveis, por conta da espessura da fresa.

Após a parte teórica, os estudantes elaboraram seus próprios protótipos de madeira e alumínio, que foram testados dentro do ambiente controlado. Ao fim da atividade, foram coletados dados por meio de entrevistas e questionários com os participantes sobre as dificuldades durante a oficina.

#### 4.2 MÉTODO APRENDER FAZENDO (*HANDS ON*)

O método *hands on* (Figura 19) explora o ensino por meio de resolução de problemas de modo prático, e, especificamente nas áreas de design e arquitetura, o desenvolvimento de projetos com base nas habilidades manuais, e não só de representação, dos estudantes (CHAMEL, 2016). Permite que o projeto seja acompanhado até a última etapa, de materialização, expandindo o aprendizado teórico (ABDULLAH, 2011).

Figura 19 - Esquema do método *hands on*.



A abordagem envolve a aplicação de conhecimentos teóricos em um contexto real, promovendo a discussão entre os envolvidos e o desenvolvimento do pensamento crítico, com a repetição do ciclo de proposta-experimento-aprendizado para chegar a uma resposta final satisfatória (CHAMEL, 2016; PUENTE; VAN EIJICK; JOCHEMS, 2012). O aprendizado ocorre de modo empírico, com perguntas, explorações e descobertas (SPANBROEK, 2010), mostrando como a execução das ideias em materiais físicos pode "contradizer ou validar a intenção do projeto original" (CHAMEL, 2016).

O foco no processo de projeto com trabalhos manuais incentiva a concentração em uma atividade por vez, pois "envolve um sistema mais complexo de percepções" (CHAMEL, 2016), ao mesmo tempo em que promove o aumento do conhecimento de várias áreas, necessários para sanar as dúvidas que surgem (SPANBROEK, 2010; PUENTE; VAN EIJICK; JOCHEMS, 2012).

Promove ainda a valorização dos materiais, pela necessidade de conhecimento de suas propriedades, para que não sejam limitações e possam servir como inspiração (CHAMEL, 2016; SPANBROEK, 2010). A prática também contribui para o aumento de repertório de soluções técnicas dos alunos, ao entenderem as etapas de produção e montagem de um objeto ou construção (CHAMEL, 2016).

Outras habilidades além das necessárias para construção podem ser descobertas com o trabalho manual, como comunicação e compreensão de estruturas (SPANBROEK, 2010; ABDULLAH, 2011). É necessário também que os estudantes desenvolvam senso de responsabilidade pelo que produzem, para que aprendam com as falhas e saibam administrar o tempo disponível para testes, análises e criação de novas ideias (SPANBROEK, 2010, CHAMEL, 2016).

#### 4.3 ORGANIZAÇÃO DAS OFICINAS

Para a organização das oficinas, foi feito um levantamento dos materiais e ferramentas necessários para a execução das atividades, com base na fase anterior de testes, exposto no Quadro 1. Também foi organizada uma revisão do conteúdo teórico para exposição dos conceitos de forma clara e fácil aos estudantes, com a apresentação de exemplos sobre os temas abordados. Informações referentes à montagem dos protótipos também foram incluídas na parte teórica.

Quadro 1 – Materiais e ferramentas necessários para a oficina.

<b>Materiais para fabricação dos protótipos</b>	<b>Ferramentas</b>	<b>Materiais necessários para funcionamento do ambiente controlado</b>
Lâminas de muiracatiara	Espátula	Caixa vedada com sistema de lançamento de vapor
Rolo de alumínio <i>black foil</i>	Estilete	Rolo de filme PVC
Cola de contato	Tesoura	Fita adesiva
	Régua	Água
	Base de corte	Detergente
	Cortadora a laser	Sensor de umidade e temperatura
		Arduino
		Computador

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A produção dos protótipos contou com o apoio do laboratório Pronto 3D Florianópolis, e foi utilizada a cortadora a laser para o corte da lâmina de madeira. Exceto esse procedimento, os outros passos da montagem e testes das amostras desenvolvidas pelos estudantes seguiram os mesmos procedimentos realizados na etapa experimental, recorte do alumínio e colagem das camadas, que serão descritos no capítulo 5 Material responsivo de madeira de dupla camada.

Para a primeira oficina, os resultados foram analisados com o uso de dados qualitativos, pela construção do discurso do sujeito coletivo, com as opiniões expressas pelos participantes ao final da prática, por meio de uma entrevista focalizada, com perguntas sobre as dificuldades encontradas formuladas no momento da entrevista. Entrevista focalizada é um método de coleta de dados em que uma pessoa formula questões de modo livre, com um tem específico (GIL, 2010). Para uma melhor estruturação dos dados, deu-se continuidade à coleta de dados nas duas turmas seguintes com um questionário (APÊNDICE A - Questionário aplicado aos participantes da segunda e da terceira oficinas) construído com questões fechadas (RICHARDSON; PERES, 1999), respondido presencialmente no encerramento das oficinas.

## 5 MATERIAL RESPONSIVO DE MADEIRA DE DUPLA CAMADA

Com as madeiras selecionadas pelos critérios estabelecidos anteriormente, foram elaboradas amostras de diversas dimensões e composições, em cinco etapas. Procedeu-se aos testes nas mesmas condições em todos os estágios, para todas as amostras, incluindo seus registros, seguindo a metodologia já apresentada. Os resultados de cada fase foram analisados, conforme metodologia descrita anteriormente, e foram levados em consideração nos momentos seguintes, para evitar as falhas anteriores e aprimorar as conclusões positivas.

### 5.1 PRODUÇÃO E TESTE DAS AMOSTRAS

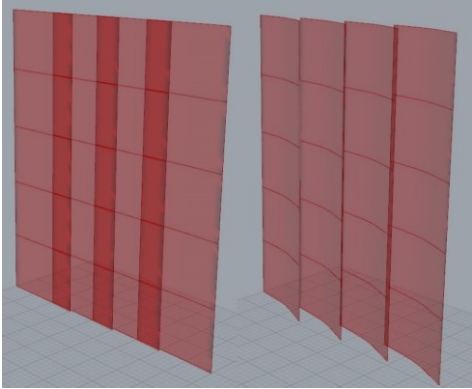
Para os testes com lâminas de madeira, essas foram cortadas à mão com estilete, e coladas no alumínio com cola de contato, que promove boa aderência entre as partes, sem se tornar rígida após a cura. Durante o processo de secagem da cola, que leva 24h, as peças foram submetidas à leve pressão para que permanecessem retas à umidade relativa em que foram montadas, que variou entre 60% e 70%.

Foi feito um modelo parametrizado para simular o movimento de curvatura das amostras, ainda na etapa experimental. Utilizou-se o Grasshopper para a construção dos modelos digitais, com um código desenvolvido em C+ (APÊNDICE C – Programação da simulação das amostras no Grasshopper e código C+ utilizado) para promover o movimento. Com a geometria retangular das amostras experimentais foi possível fazer simulações do comportamento destas (

Figura 20), porém a construção do modelo paramétrico dificultava a elaboração de outras geometrias. Uma vez que os alunos possuíam pouco ou nenhum conhecimento em programação visual e o tempo disponível para as oficinas não possibilitava o treinamento dos participantes neste assunto, decidiu-se não incluir a etapa de simulação.

Figura 20 - Simulação do comportamento das amostras no Grasshopper.





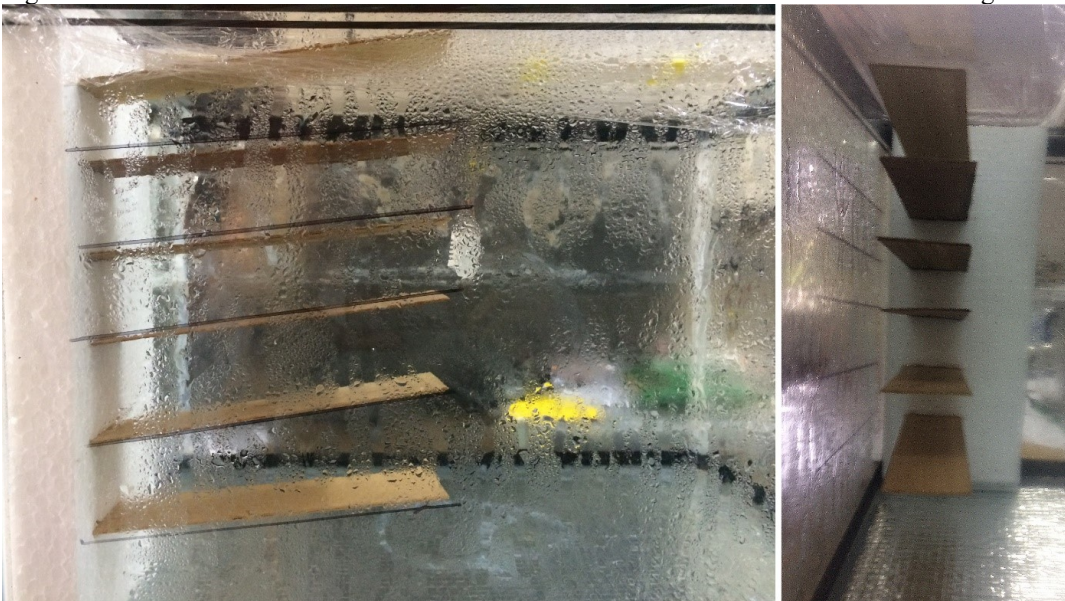
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

### 5.1.1 Duas camadas de lâminas de madeira com fibras no sentido longitudinal

O primeiro experimento utilizou peças fabricadas com as 6 espécies, com todas as possíveis combinações, totalizando 21 amostras, de 4 cm por 16 cm cada. Em ambas camadas, o sentido das fibras era longitudinal. Foram então submetidas ao teste na caixa vedada, que neste momento ainda não contava com o fundo milimetrado, então foram feitas marcas no vidro para as posições iniciais (Figura 21).

Com os testes, constatou-se que as placas não apresentavam as deformações na orientação esperada. A partir desses resultados, preparou-se uma nova rodada de testes com outras amostras. Outra questão levantada foi a necessidade de prevenir o embaçamento e posterior condensação de água no vidro, para melhorar a qualidade das imagens. Esse problema foi minimizado nas etapas posteriores com a aplicação de detergente nas faces internas da caixa, antes do início da liberação de vapor.

Figura 21 - Primeiros testes com duas camadas de lâmina de madeira - fibras no sentido longitudinal.



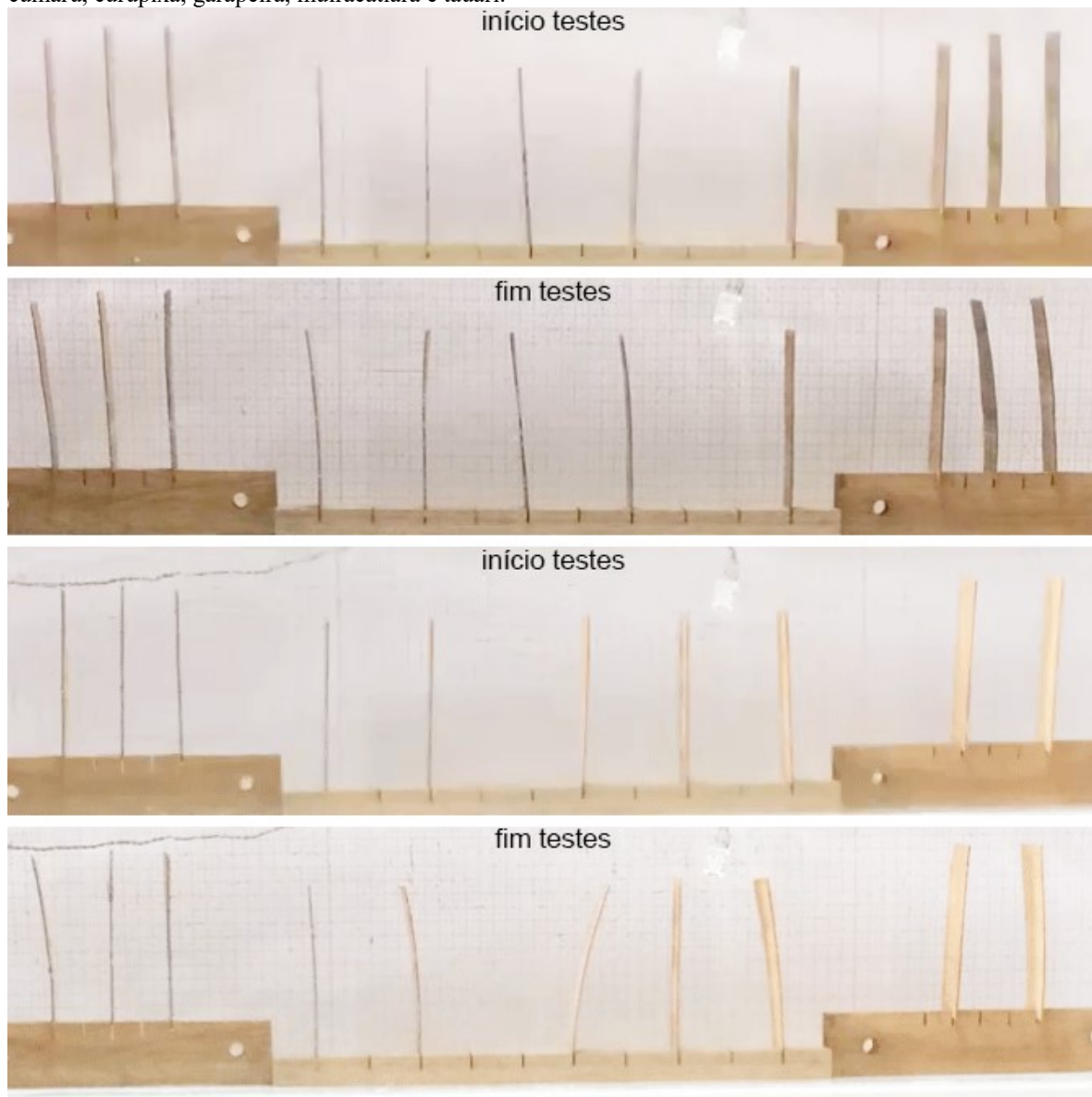
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

### **5.1.2 Duas camadas de lâminas de madeira com fibras no sentido transversal**

Foram confeccionadas novas amostras, com as mesmas espécies, mas com as fibras no sentido transversal das placas. Repetiu-se as mesmas combinações, totalizando 21 novas amostras, dessa vez com 4 cm por 12 cm cada, para melhor aproveitamento da matéria-prima disponível (Figura 22).

Foram refeitos os experimentos nas mesmas condições anteriores, e pôde-se observar que, conforme as características de cada espécie de madeira em teste, o tempo de resposta e a intensidade de curvatura mudavam. Após trinta minutos, as amostras eram retiradas da caixa vedada e recolocadas em contato com o ambiente, e o seu retorno às condições iniciais foi acompanhado. De modo geral, as madeiras de menor módulo de elasticidade (menor ou igual a 10000 MPa: angelim-pedra, tauari), quando atuando como camada ativa, apresentavam menor tempo de resposta e maior curvatura, entretanto, seu retorno à forma original em temperatura e umidade relativa no ambiente era mais lento do que as madeiras de maior rigidez (muiracatiara, curupixá, cumaru), por vezes levando dias para voltar ao formato inicial.

Figura 22 - Testes duas camadas de madeira - fibras na transversal. Combinações de lâminas das espécies angelim, cumaru, curupixá, garapeira, muiracatiara e tauari.

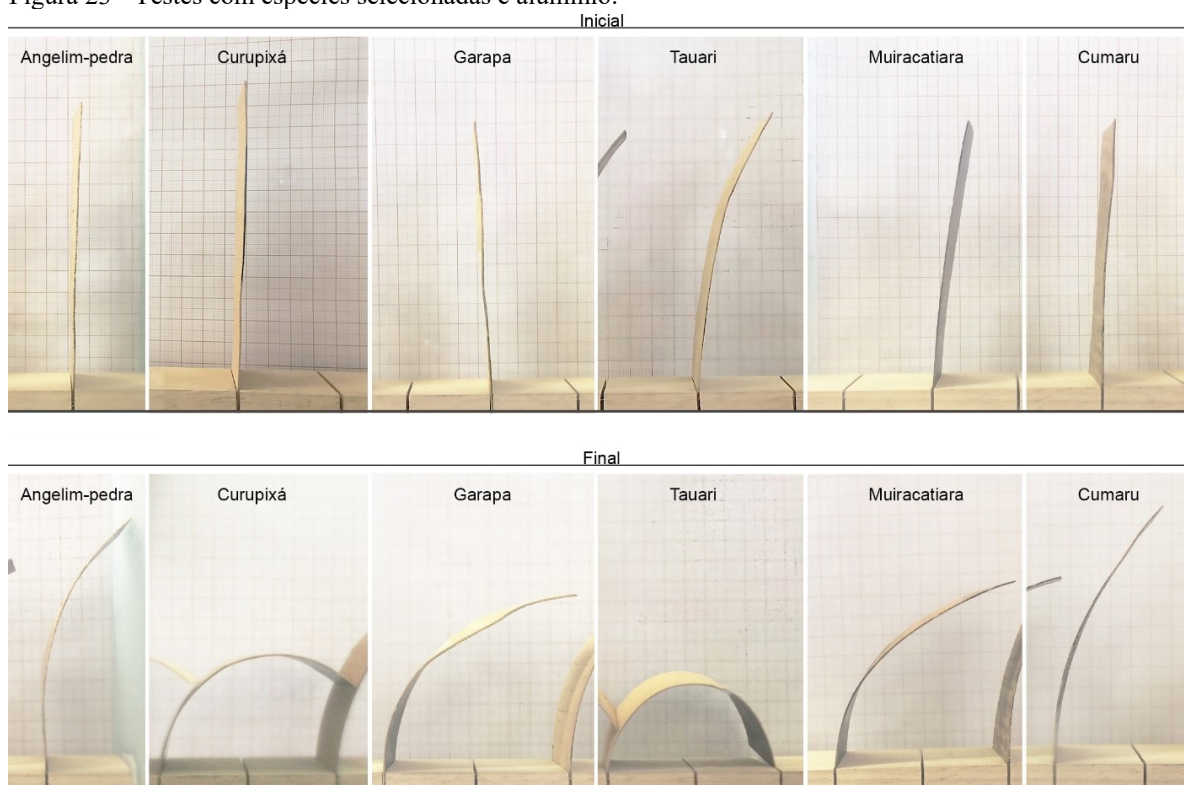


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

### 5.1.3 Camada de lâmina de madeira com fibras transversais e camada de alumínio para fotografia

Os próximos protótipos foram produzidos com a camada passiva em alumínio *black foil*, com as seis espécies selecionadas, para confirmação dos resultados com a nova configuração (Figura 23).

Figura 23 - Testes com espécies selecionadas e alumínio.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Os testes foram repetidos nas mesmas condições. Foram definidos como critérios de avaliação as deformações resultantes do aumento da umidade e temperatura com o tempo, e o tempo de retorno ao formato original das amostras. O tempo de retorno foi medido a partir do momento em que as peças foram retiradas do ambiente controlado e colocadas sobre uma superfície plana. Um papel milimetrado ajudou a conferir as mudanças nas amostras. Essa etapa foi acompanhada por cerca de uma hora e meia, quando as primeiras amostras já haviam retornado ao seu formato inicial (Figura 24).

Figura 24 - Amostras retornando à forma inicial após uma hora e meia.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A Tabela 2 relaciona os critérios de avaliação e os resultados obtidos. A cumaru e a muiracatiara apresentaram os melhores resultados: maior curvatura em menor tempo, com menor tempo de retorno à forma original. Foram repetidos os testes entre as duas espécies, a muiracatiara destacou-se por seu tempo de retorno menor, cerca de 39 minutos, contra cerca de

41 da cumaru. Para as próximas etapas, escolheu-se então continuar com o uso da muiracatiara pelo desempenho apresentado.

Tabela 2 - Resultados dos testes dos componentes de madeira e alumínio.

Espécie	x0 (em cm)	y0 (em cm)	x30' (em cm)	y30' (em cm)	Tempo de retorno (em min)
Angelim-pedra	1,0	11,5	3,5	11,0	>60
Cumaru	1,0	12,5	5,0	11,5	40
Curupixá	1,0	11,5	11,0	5,5	>60
Garapeira	1,0	12,5	7,5	8,5	>60
Muiracatiara	<b>2,0</b>	<b>12,5</b>	<b>9,0</b>	<b>8,5</b>	<b>40</b>
Tauari	1,0	11,5	8,5	4,5	>60

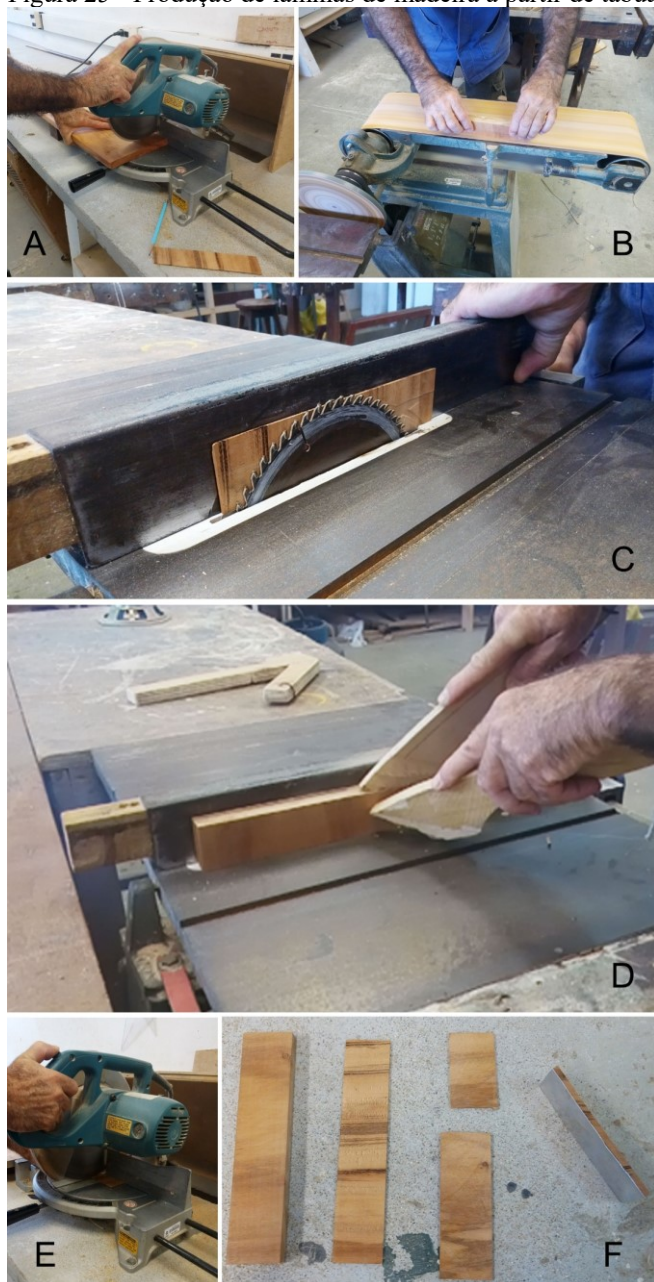
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 5.1.4 Camada de madeira a partir de tábuas e alumínio para construção civil

Para averiguar a possibilidade de produção de lâminas de madeira a partir de tábuas na própria universidade, foram preparadas peças com espessuras entre 2 e 5 mm, que foram coladas com cola de contato em alumínio de 0,8 mm de espessura utilizado na fabricação de calhas para construção civil (Figura 25 F). A tábua de muiracatiara, com dimensões de 2 cm de espessura, 2 cm de largura e 1,80 m de comprimento, foi inicialmente cortada em tiras de 10 cm na serra de esquadria (Figura 25 A), com as fibras no sentido transversal, para melhor manuseio. Na serra de bancada, as tiras foram cortadas duas vezes para diminuir sua espessura (Figura 25 C, Figura 25 D). Para nivelar, as partes foram lixadas (Figura 25 B). Por fim, foram cortadas no comprimento adequado na serra de esquadria (Figura 25 E).

O procedimento exigiu perícia na manipulação das madeiras durante o corte, e como os resultados no teste no ambiente controlado não foram significativos, foi descartado a aplicação deste método.

Figura 25 - Produção de lâminas de madeira a partir de tábua.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

### 5.1.5 Corte da lâmina de madeira na CNC

No Pronto 3D de Chapecó, foi feita uma tentativa de corte da lâmina de muiracatiara em máquina CNC, com a menor fresa disponível, de 3 mm. Entretanto, a alta rotação com que a fresa executa o corte provocou a soltura das fibras, despedaçando a lâmina (Figura 26).

Para espessuras maiores, alcançadas com o corte pela tábua, seria possível o corte em CNC, segundo experiências prévias do laboratório em questão, embora não tenha sido realizado um teste específico para esta pesquisa.

Figura 26 - Tentativa de corte em CNC.



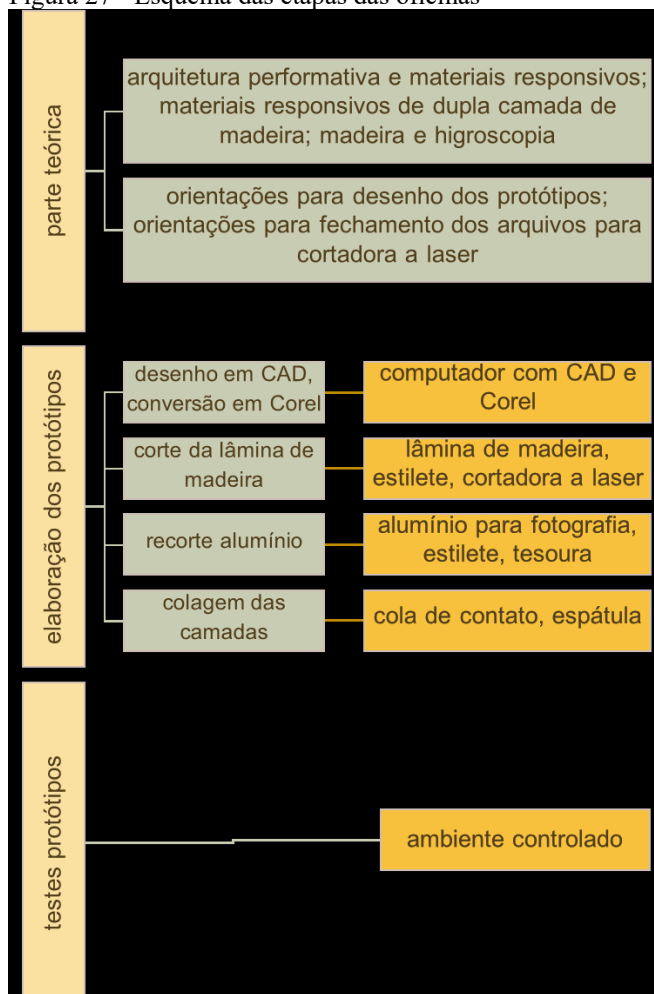
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

## 6 OFICINAS SOBRE ARQUITETURA PERFORMATIVA E MATERIAIS RESPONSIVOS

As oficinas foram realizadas em dois momentos, em maio de 2018 e em abril de 2019, no laboratório Pronto 3D UFSC. A previsão era de apenas uma turma inicial em maio de 2018, contudo, devido ao grande interesse da comunidade acadêmica e o número máximo de ocupantes permitido nas dependências do Pronto 3D, foi então lançada uma nova turma. Participaram no total três grupos diferentes de alunos, a primeira com dez participantes, e a segunda e terceira com oito em cada. As duas primeiras tiveram a duração de quatro horas cada, enquanto a última teve doze horas distribuídas em quatro dias.

O esquema da estrutura geral, representado na Figura 27, foi usado como base para o planejamento de todas as oficinas. Eventuais modificações ocorreram entre as turmas, para aperfeiçoar a transmissão de conhecimento aos estudantes, a produção destes durante as atividades práticas, e a coleta de dados para análise.

Figura 27 - Esquema das etapas das oficinas



Fonte: Elaborado pela autora (2019).



Nos primeiros grupos, com menor duração, a parte teórica foi apresentada em cerca de trinta minutos. O projeto dos protótipos continuou por uma hora e meia, e nas duas horas restantes, as peças foram produzidas e testadas.

Na última turma, com mais tempo disponível, a explicação dos conceitos e procedimentos levou por volta de cinquenta minutos, já sendo proposto aos participantes que pensassem em ideias para serem desenvolvidas no dia seguinte. O segundo dia foi dividido em dois períodos: o desenvolvimento dos desenhos, que tomou cerca de uma hora e meia, e a montagem dos componentes, com duração de duas horas.

No terceiro dia, na semana seguinte, os elementos foram testados no ambiente controlado e discutiu-se os resultados obtidos. A partir da discussão, todos se reuniram para criar um desenho, com as características mais positivas dos projetos anteriores, para ser usado como revestimento em uma estrutura: peças esbeltas; recortes internos para gerar respostas diferentes; e organização radial das peças. Ao fim do dia foi elaborado um arquivo em .dxf. A execução do novo desenho só foi feita, com algum atraso, no quarto e último dia de oficina.

Na parte teórica, foram introduzidos os conceitos de arquitetura performativa, materiais responsivos e componentes higroscopicamente responsivos de madeira, de acordo com o referencial teórico desta pesquisa (Figura 28). Apresentou-se exemplos, com imagens e vídeos, de projetos arquitetônicos e estudos com os temas relacionados, assim como as pesquisas realizadas com madeira como material responsivo, já apresentadas no referencial teórico, e os experimentos detalhados no capítulo anterior.

Figura 28 - Aula teórica na oficina 1.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A seleção dos exemplos levou em consideração aspectos de interação com o ambiente e/ou com os usuários, e que tivessem alguma relação com os possíveis usos dos materiais responsivos de madeira. Outra questão levada em consideração foi a escolha de pesquisas com

produção de protótipos, incentivando a questão de se aprender com prática, como enfatizado pela metodologia *hands on*.

O Hotel WZ Jardins (Figura 29 A), em São Paulo, foi projetado pelo Estúdio Guto Requena, e possui uma fachada interativa que muda de cor conforme os níveis de ruído do ambiente ao redor. Sensores de som instalados na fachada captam os ruídos, que são conectados a um sistema que ilumina a fachada com cores diferentes dependendo da intensidade sonora. Usuários também podem interagir com a fachada por meio de um aplicativo, enviando mensagens e configurando a iluminação (BARATTO, 2015).

O DO|SU Studio foi um dos pioneiros no estudo de materiais responsivos de dupla camada, trabalhando com elementos feitos com metais diferentes em cada camada (Figura 29 B). Como o coeficiente de dilatação de cada metal é diferente, ao ser aquecida, a camada com o metal de maior coeficiente dilata mais, causando a curvatura do componente, à semelhança do que ocorre com a madeira quando absorve umidade, nos componentes de madeira e material sintético (FURUTO, 2012; REICHERT; MENGES; CORREA, 2015).

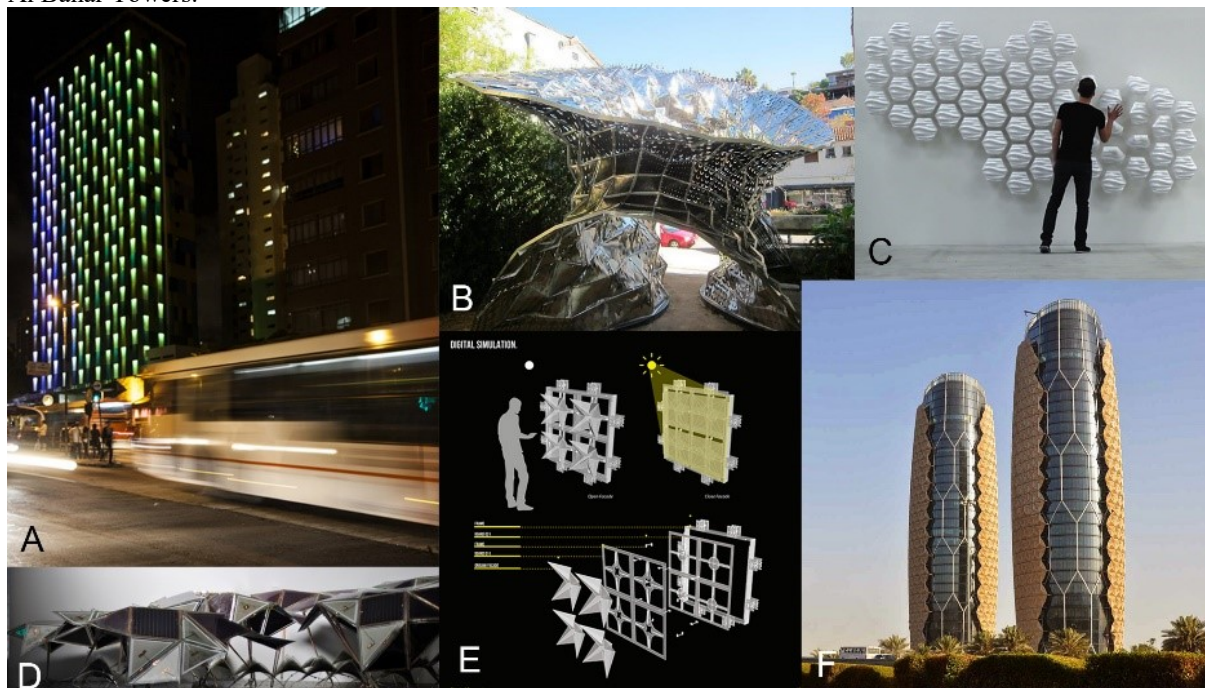
O designer Thibaut Sld desenvolveu um mecanismo de parede responsivo ao movimento, com placas de PVC fixadas em articulações e conectadas com sensores de movimento (Figura 29 C). Conforme há a captação de dados pelos sensores, esses enviam sinais às articulações, que produzem um movimento de acordo com a configuração feita, podendo apresentar uma resposta rápida ou mais lenta, com as peças se mexendo de modo uniforme ou cada uma com uma resposta diferente (AZZARELLO, 2014).

Phototropia (Figura 29 D) é um protótipo desenvolvido no ETH Zürich para ser um pavilhão arquitetônico autossuficiente que explora diversos materiais responsivos. Possui painéis fotossensíveis, que captam energia solar para transformá-la em energia elétrica, armazenada em baterias. A energia armazenada alimenta painéis flexíveis e sensíveis ao movimento, que se movimentam por meio de mecanismos eletrônicos. Toda a estrutura em escala reduzida foi montada pelos alunos (HOVESTADT, [2013]).

No Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), foi desenvolvido um sistema de proteção solar com base nos movimentos de origamis (Figura 29 E). O sistema conta com sensores de luz, que acionam um mecanismo responsável por controlar a abertura e o fechamento do origami (LASTRAS, 2014).

A proteção solar das Al Bahar Towers (Figura 29 F) tem funcionamento semelhante ao do sistema de origamis do IAAC, contudo, seu movimento é controlado por uma pré-programação de acordo com estudos de insolação do local pelo período de um ano, não necessitando de sensores para realizar o controle de abertura (CILENTO, 2012).

Figura 29 - Exemplos de Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos apresentados: A) Hotel WZ Jardins; B) Bloom thermal bimetals; C) Hexi responsive wall; D) Phototropia; E) Lightning Responsive Origami Façade; F) Al Bahar Towers.



Fontes: A) BARATTO, 2015 B) FURUTO, 2012 C) AZZARELLO, 2014 D) HOVESTADT, [2013] E) LASTRAS, 2014 F) CILENTO, 2012

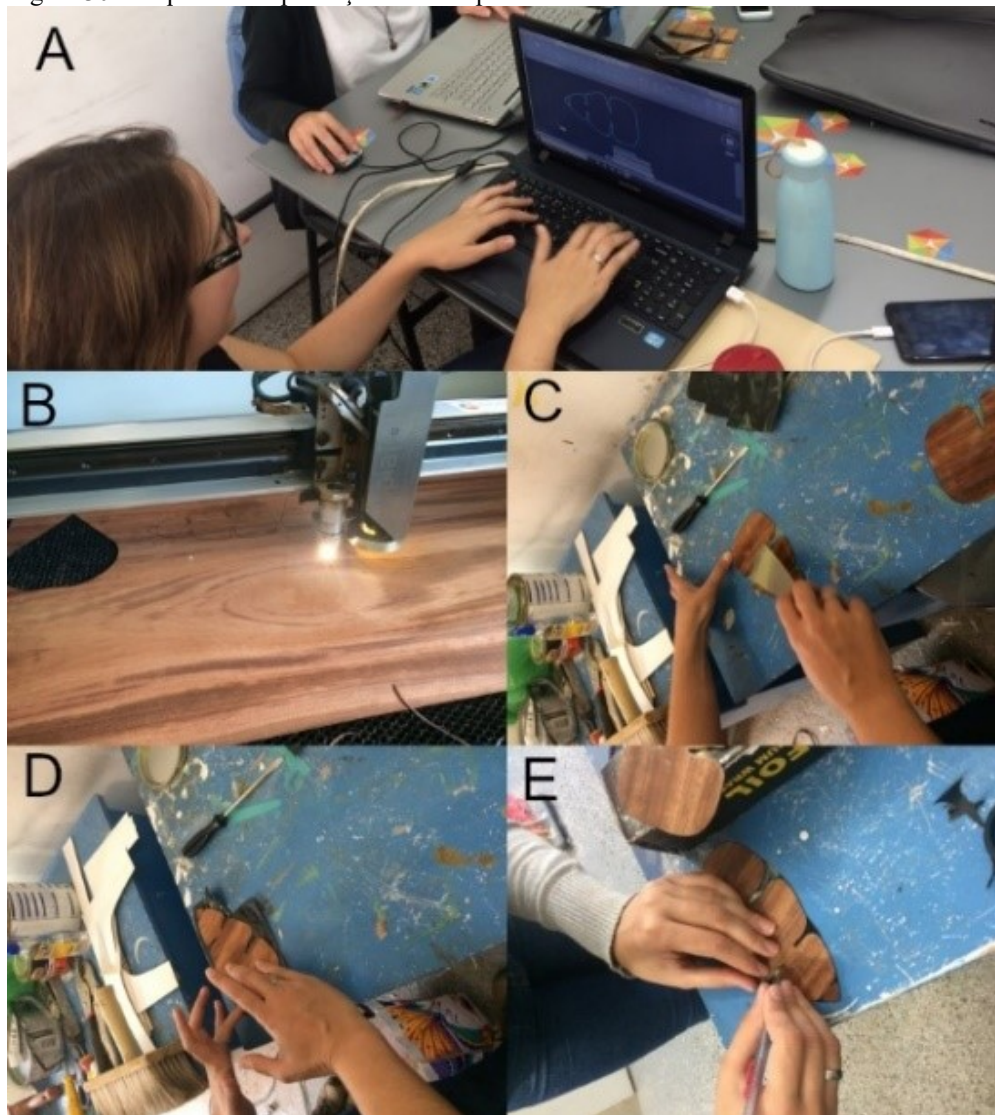
As instruções para a elaboração dos desenhos com ferramenta CAD e posterior envio para a cortadora a laser também foram repassadas aos alunos durante a aula expositiva. As instruções diziam respeito tanto ao funcionamento dos protótipos, como posição dos desenhos em relação à orientação das fibras e tamanho adequado, quanto a procedimentos para otimizar o corte a laser, como o uso de polilinhas (*polylines*) para desenhar, evitar sobreposição de linhas, desenhos em milímetros e formato do arquivo em dxf versão 2000 (*Drawing Exchange Format*).

Foi requisitado aos participantes que levassem seus computadores com *softwares* CAD para desenvolverem os desenhos de seus protótipos. A Figura 30 ilustra a sequência de elaboração. Uma vez concluídos e salvos em formato .dxf (Figura 30 A), os arquivos eram enviados para a cortadora a laser (Figura 30 B). O procedimento de corte à laser da lâmina de madeira permitiu aos alunos o desenvolvimento de protótipos com formas variadas, o que seria difícil se executado de forma manual, pois a lâmina é quebradiça e pode lascarse com facilidade, além de acelerar esta fase. Para agilizar o processo, conforme cada arquivo era terminado, era enviado para a fila de corte.

Com as lâminas cortadas, os membros da oficina passaram à etapa de recorte do alumínio e montagem do protótipo (Figura 30 C-E). Media-se um pedaço aproximado do alumínio para fotografia em rolo, aplicava-se a cola de contato em uma das faces da madeira e

do alumínio (Figura 30 C), aguardava-se para que a cola atingisse o ponto de pega, e as faces com cola eram então unidas e pressionadas (Figura 30 D). O alumínio excedente era recortado com tesoura ou estilete, conforme a necessidade (Figura 30 E).

Figura 30 - Sequência de produção dos componentes durante oficina.



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Para a secagem da cola nos dois primeiros grupos, aguardou-se cerca de trinta minutos para que as peças fossem submetidas aos testes dentro da caixa vedada, tempo inferior ao total para a cura da cola de contato, que é de 24h. Foi necessária essa alteração para que a atividade das primeiras oficinas se concluísse no mesmo dia. Para a terceira vez, com mais tempo disponível, houve o intervalo de uma semana entre a elaboração e o teste dos protótipos (Figura 31).

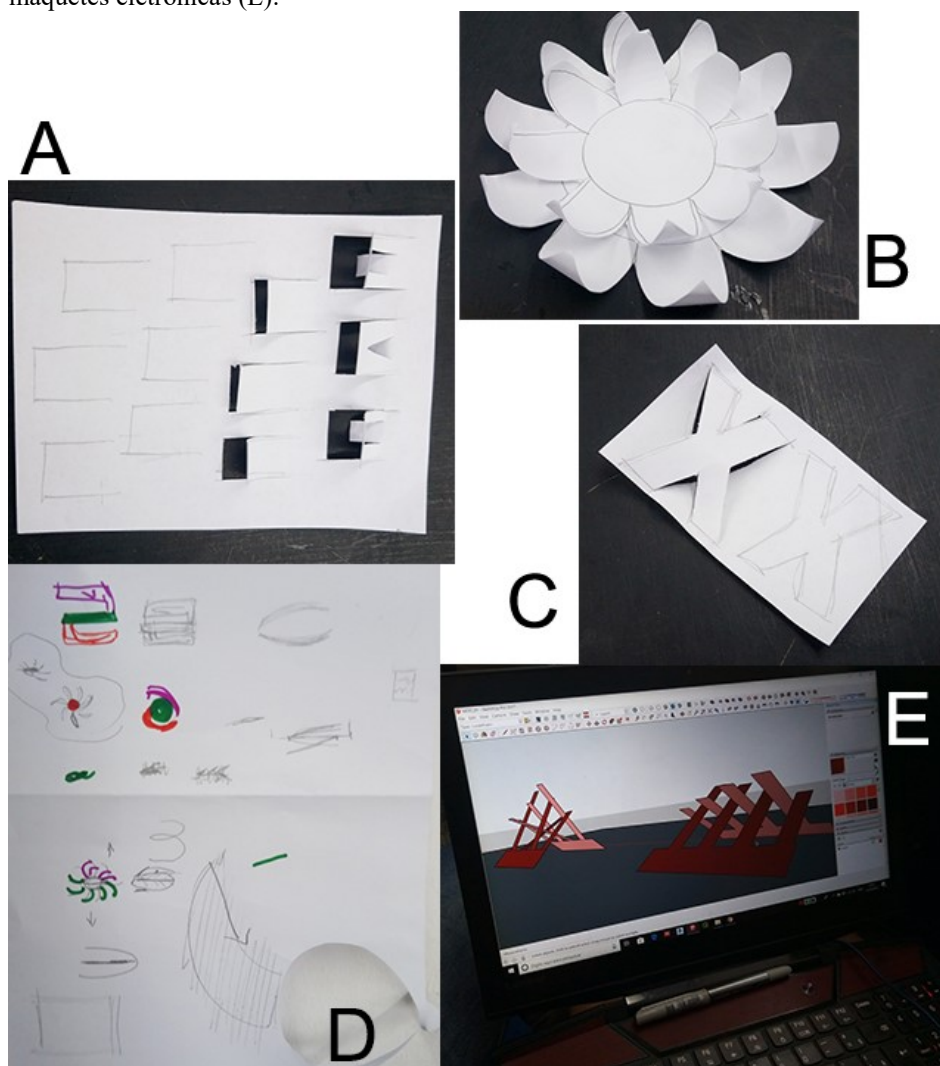
Figura 31 - Testes dos protótipos dos estudantes da terceira oficina.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

No terceiro grupo, com mais tempo disponível para o desenvolvimento dos desenhos dos protótipos, foi possível para os estudantes experimentar outros métodos de criação, como testes com moldes de papel, desenhos à mão livre e maquetes eletrônicas no SketchUp (Figura 32). A maior duração permitiu uma melhor avaliação do desempenho dos elementos, o que contribuiu para a evolução dos componentes finais.

Figura 32 - Concepção dos protótipos da terceira oficina: moldes de papel (A, B, C); desenhos à mão livre (D); maquetes eletrônicas (E).



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A terceira oficina teve uma etapa a mais do que as anteriores, em que depois de testados os componentes criados pelos estudantes, foi elaborado um último protótipo levando em consideração os aspectos positivos das peças anteriores. Esse elemento foi então produzido em quantidade, depois de alguns ajustes, para ser usado como fechamento de uma estrutura projetada pelos alunos da Unochapecó para uma oficina sobre arquitetura *open source*.

## 6.1 RESULTADOS DAS OFICINAS

Os elementos produzidos pelos estudantes foram avaliados principalmente em relação à sua capacidade de curvatura com o aumento da umidade, que sofre influência da forma geométrica do componente, e sua composição espacial, sendo a curvatura avaliada segundo a direção das fibras e a geometria da peça. Com isso, procurou-se avaliar também a compreensão

do conteúdo teórico aliado à prática: componentes com resposta favorável indicam que os alunos conseguiram assimilar os aspectos que influenciam no comportamento dos protótipos. Foi utilizada a mesma metodologia da fase experimental, e uma vez que os protótipos apresentavam formatos variados, foi o traçado o perfil mais próximo ao fundo milimetrado para a avaliação da curvatura. Para a última oficina, levou-se em consideração também a facilidade de montagem e seu aspecto visual enquanto composição.

Com as falas dos participantes do primeiro grupo e as respostas dos questionários das turmas posteriores foi possível averiguar a compreensão dos alunos em relação aos temas abordados, e quais foram as dificuldades enfrentadas.

### 6.1.1 Avaliação das Produções

Durante a avaliação das produções das oficinas, observou-se que a composição dos elementos foi pensada de duas maneiras pelos alunos: como um item unitário a ser repetido no momento de sua aplicação e como uma composição inteira, com interação das peças entre si. Com isso, duas classificações foram aplicadas: pelo tipo de componente – peça única e composição em painel, e pela resposta apresentada com o aumento da umidade – boa resposta, alterações não significativas, painéis com construção não adequada e sem resposta satisfatória.

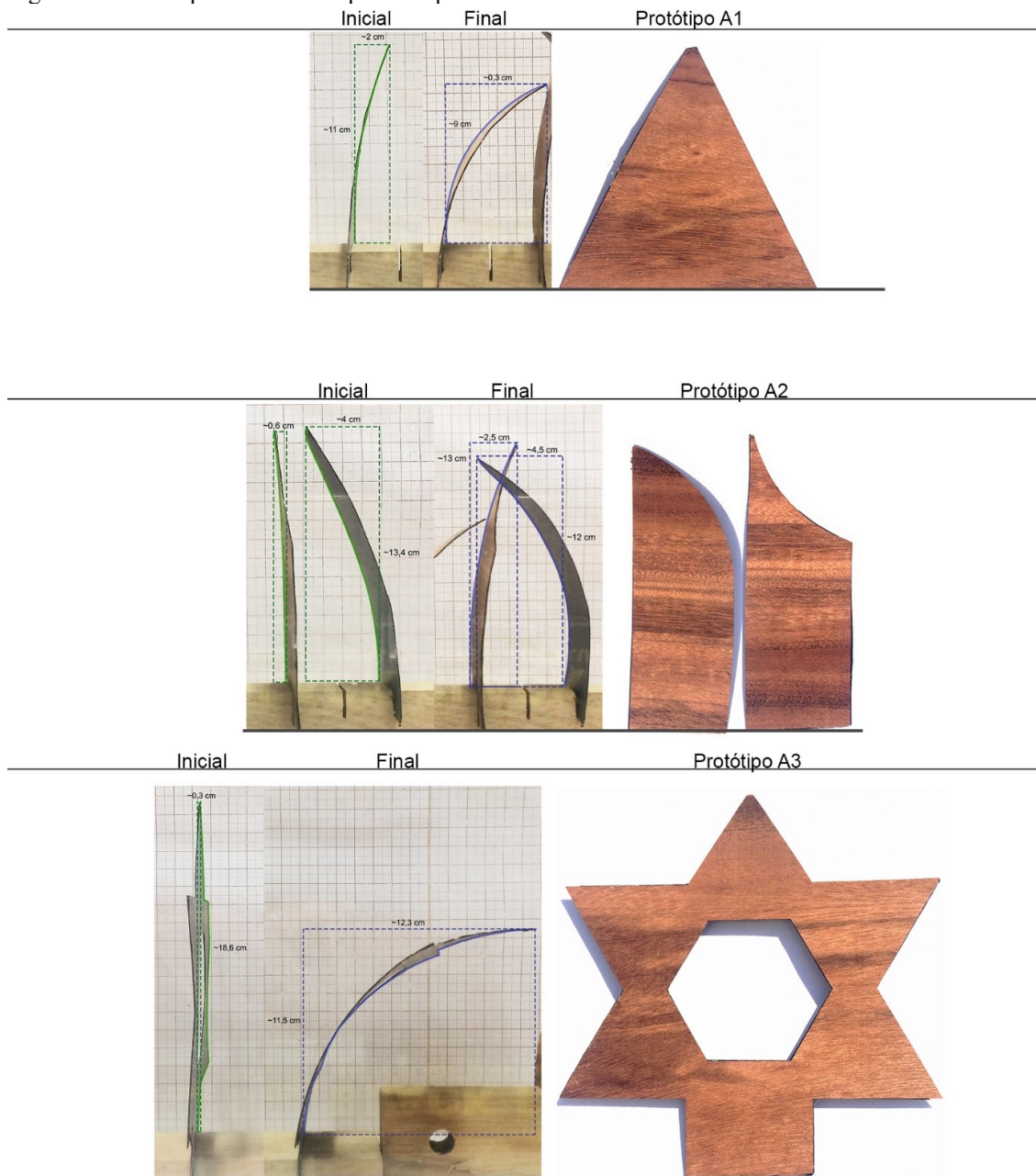
Na primeira oficina, foram produzidos ao todo dezessete protótipos, e todos foram testados no dia, dentro do ambiente controlado da caixa vedada (Tabela 3). Somente três componentes exibiram a alteração esperada. Geometrias alongadas e pontiagudas e o sentido das fibras perpendicular ao eixo longitudinal das peças, conforme as instruções dadas, permitiram maior mudança de curvatura (Figura 33). Duas peças que foram confeccionadas para funcionarem como painel reagiram conforme o planejado, fechando-se uma sobre a outra (Figura 33 – Protótipo A2).

Tabela 3 - Avaliação da produção da primeira oficina.

<b>Tipo</b>	<b>Produção total</b>	<b>Boa resposta</b>	<b>Alterações não significativas</b>	<b>Painéis com construção não adequada</b>	<b>Sem resposta satisfatória</b>
Peça única	12	2	7	-	3
Composição em painel	4	1	-	4	-

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 33 - Protótipos com boa resposta da primeira oficina.

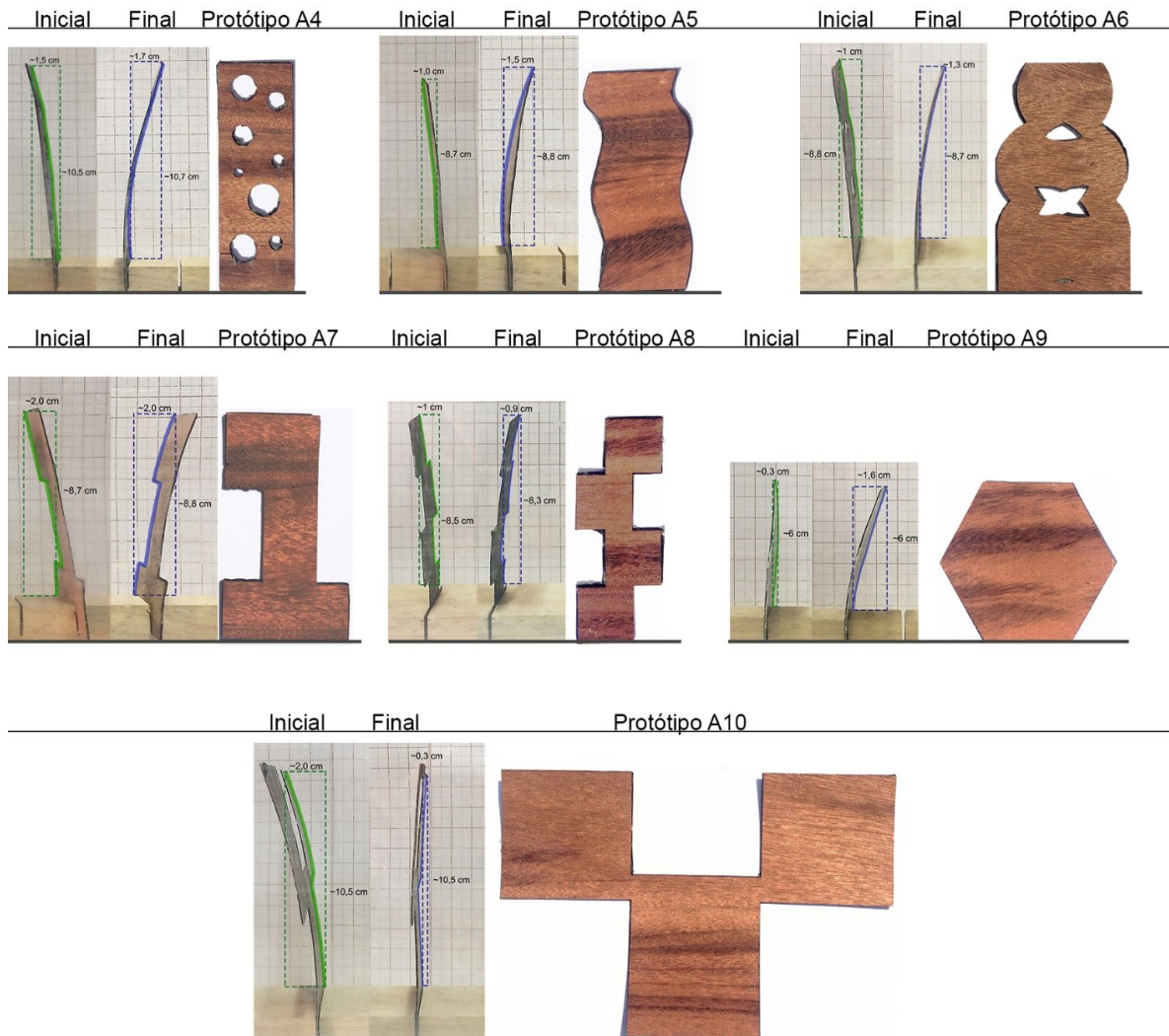


Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Sete componentes do tipo peça única sofreram alguma deformação, porém não tão acentuada. Isso se deve principalmente à geometria com dimensões quase iguais (Figura 34 – Protótipos A9 e A10) ou com base muito larga, o que desfavorece a resposta das peças (Figura 34 – Protótipos A4 a A8).

Figura 34 - Protótipos com alterações não significativas.

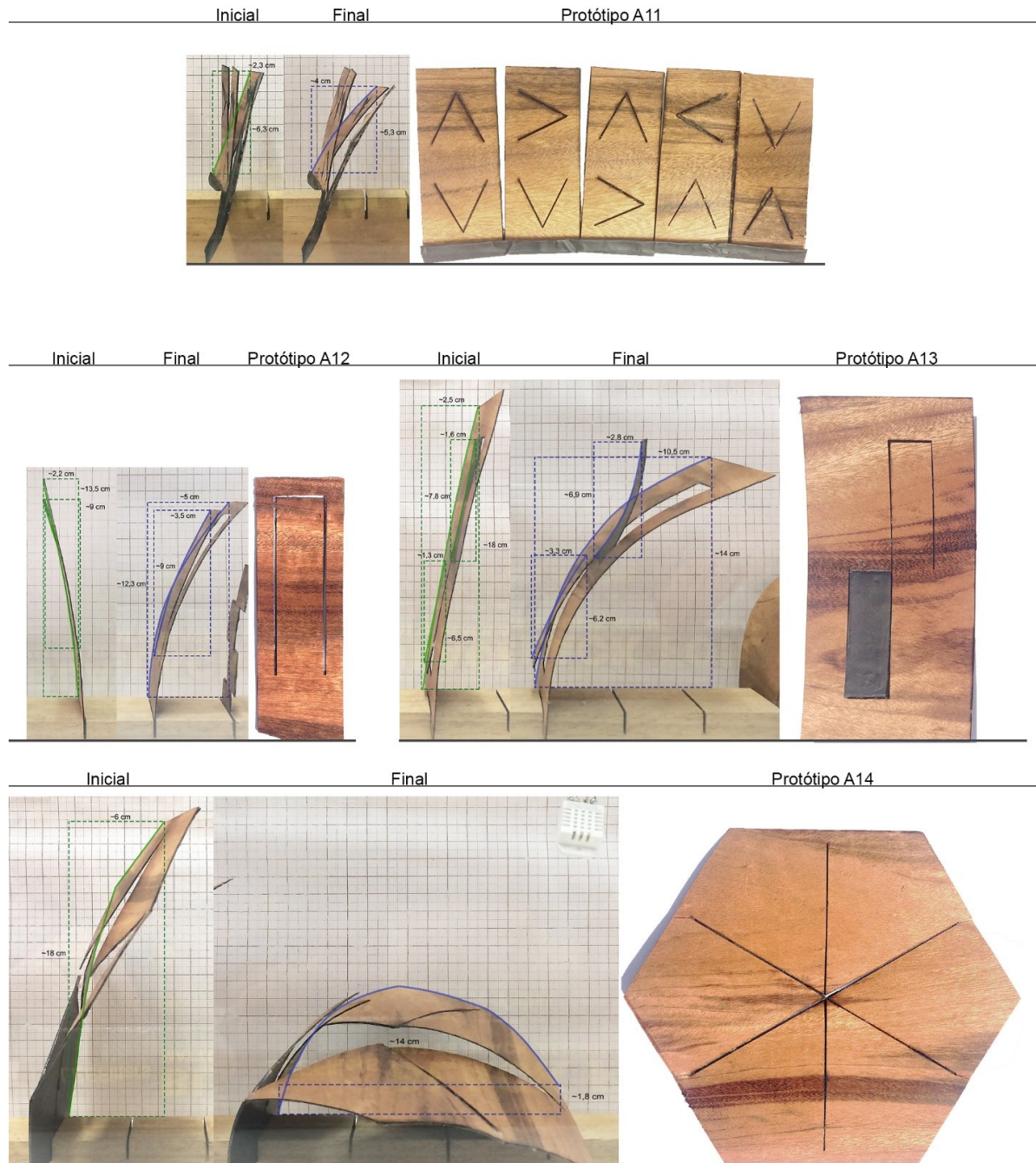




Fonte: Elaborado pela autora (2019).

No caso dos painéis, a principal falha foi a produção como uma peça única, quando deveriam ter sido constituídos de peças separadas, por vezes com uma estrutura independente não-responsiva. Exceto por esse defeito, os elementos tiveram grandes deformações. O protótipo A14 (Figura 35) tentou reproduzir a abertura de um dos exemplos mostrados, mas como não foi construído corretamente, sem levar em consideração a orientação das fibras para cada recorte, não respondeu como o esperado. O protótipo A13 poderia ter melhor desempenho se sua execução fosse mais cuidadosa, pois uma das abas continuou unida à estrutura depois do corte do alumínio (Figura 35).

Figura 35 - Protótipos com composição em painel da primeira oficina.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Os protótipos que não apresentaram resposta satisfatória possuíam as fibras paralelas ao maior eixo da peça, orientação de fibras que não favorece a resposta ao aumento da umidade (Figura 36).

Figura 36 - Protótipos da primeira oficina sem resposta satisfatória.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Para evitar as falhas nos protótipos do grupo anterior, na segunda oficina buscou-se dar maior ênfase em pontos como a orientação das fibras e o formato das peças, para que todos os componentes apresentassem respostas satisfatórias quando submetidos ao teste. Dessa forma, foram produzidos menos protótipos – um por estudante, oito no total –, mas de maior complexidade de formas e comportamento, como pode ser observado nas Figura 37 e Figura 38. Duas peças únicas mostraram alterações não significativas (Figura 37 - B5 e B6). Um dos protótipos em painel foi testado, e, embora não tenha sido possível fazer suas medições com o papel milimetrado, as deformações ocorridas foram evidentes (Figura 38 - B8).

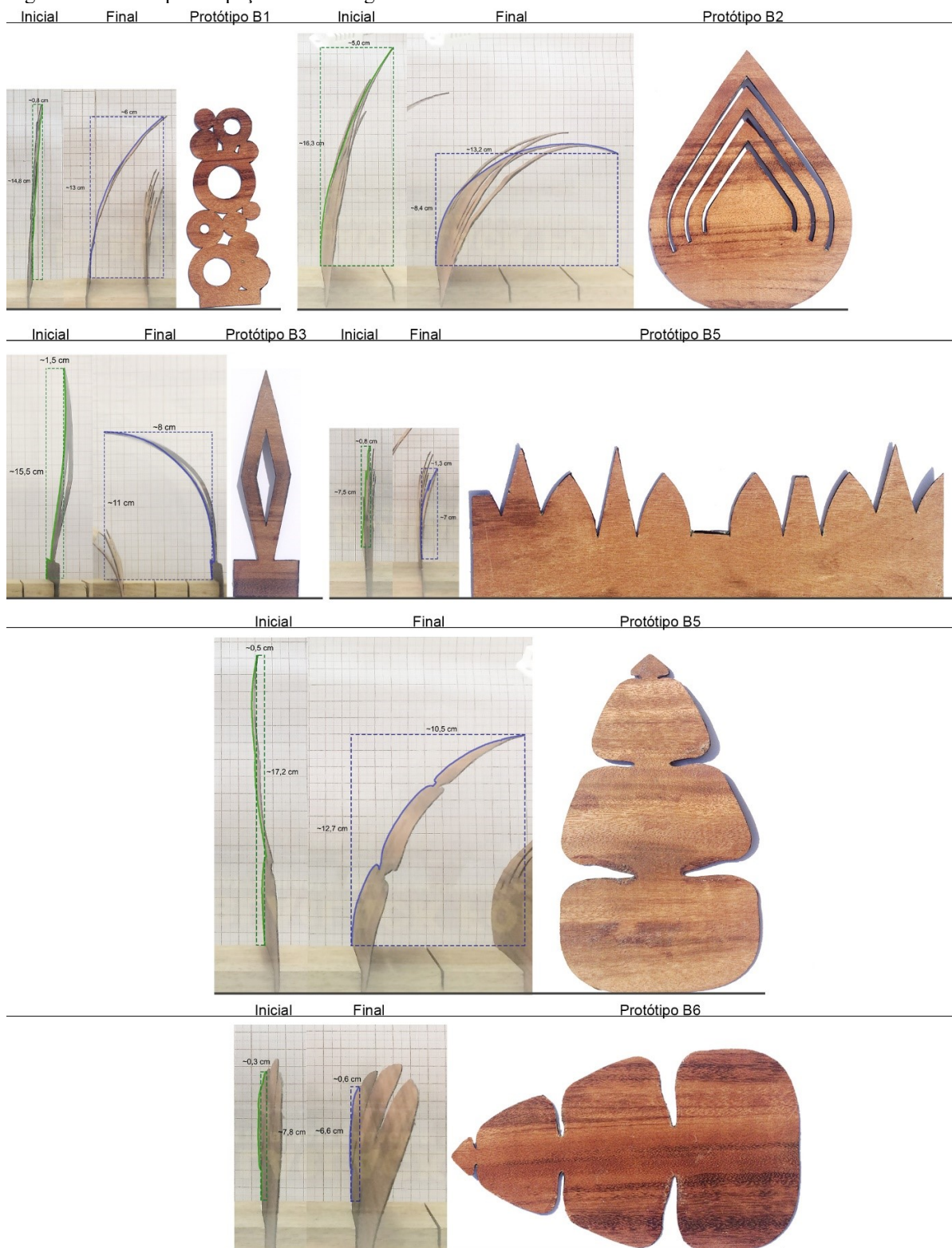
Atrasos causados na etapa de corte a laser prejudicaram o andamento da oficina, e não foi possível testar os componentes no dia. No entanto, todos foram posteriormente testados, e apresentaram resposta favorável às variações de umidade. A Tabela 4 lista a produção da segunda oficina de acordo com o tipo e sua resposta.

Tabela 4 - Avaliação da produção da segunda oficina.

Tipo	Produção total	Boa resposta	Alterações não significativas	Painéis com construção não adequada	Sem resposta satisfatória
Peça única	6	4	2	-	-
Composição em painel	2	-	-	2	-

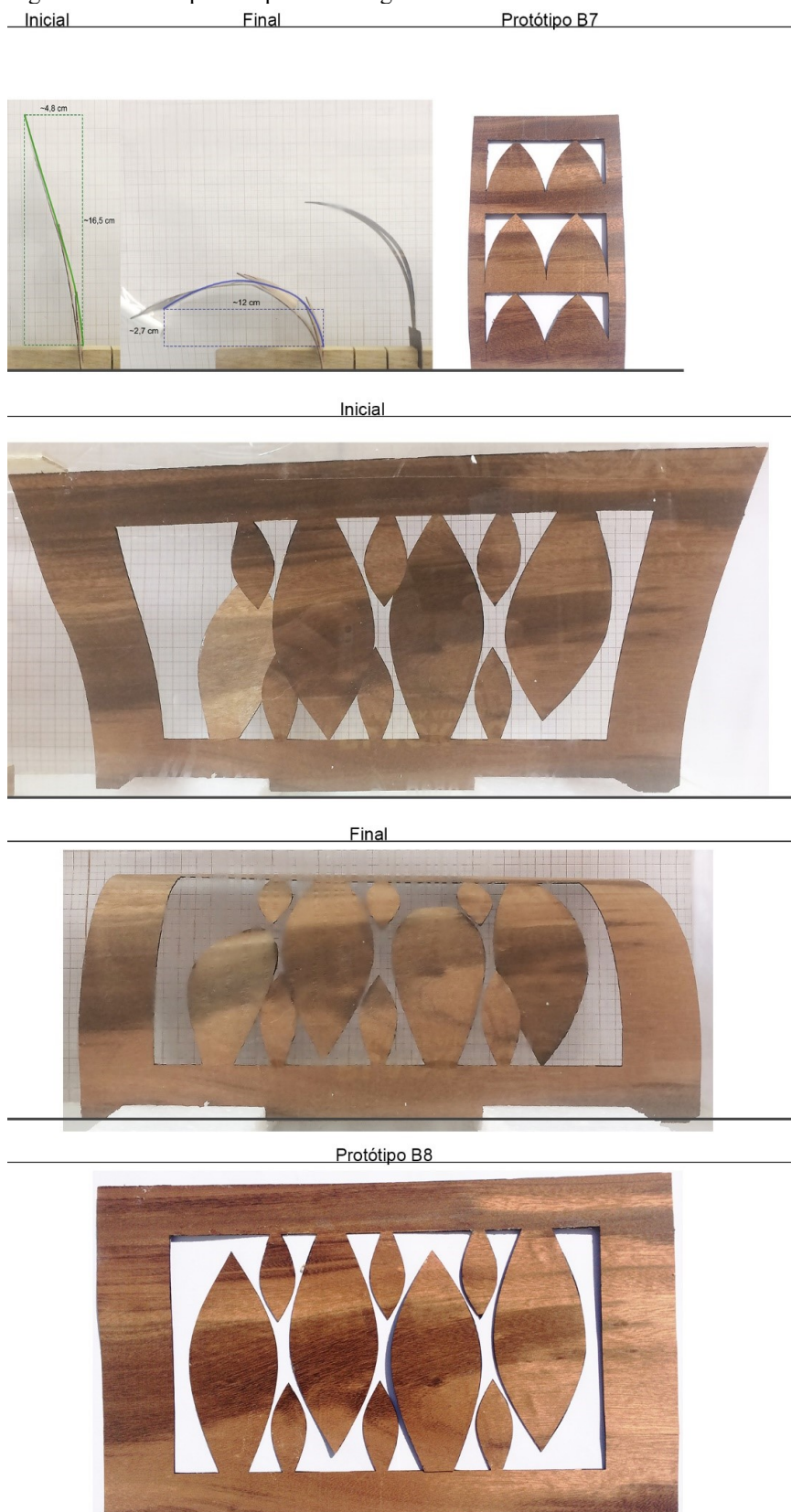
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 37 - Protótipos de peça única da segunda oficina.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 38 - Protótipos em painel da segunda oficina.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Os participantes da terceira oficina trabalharam em duplas, produzindo inicialmente cinco componentes, classificados na Tabela 5. Com o enfoque em como utilizar as peças em

um painel, três modelos foram produzidos a partir de elementos menores, necessitando de uma armação para funcionarem (Figura 39 e Figura 40). Um foi projetado para atuar em par (Figura 39 – C2), e outro foi elaborado já como uma peça única em formato de painel (Figura 39 – C1).

Tabela 5 - Avaliação da produção da terceira oficina.

<b>Tipo</b>	<b>Produção total</b>	<b>Boa resposta</b>	<b>Alterações não significativas</b>	<b>Painéis com construção não adequada</b>	<b>Sem resposta satisfatória</b>
Peça única	-	-	-	-	-
Composição em painel	5	4	1	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A composição de triângulos em linha (Figura 39 – C3) não teve mudanças significativas por sua forma ser mais semelhante a um triângulo equilátero, com maior semelhanças de dimensões. Já o protótipo em formato de painel (Figura 39 – C1), com seus recortes sinuosos e o detalhe da aplicação do alumínio contribuiu para um efeito final retorcido, muito diferente dos outros protótipos até então. A sua montagem foi justamente a mais complexa, por conta da coordenação da posição do alumínio na peça.

Figura 39 - Protótipos da terceira oficina – composição em painel: peça em painel único (C1); par coordenado (C2); e triângulos em linha (C5).



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 40 - Protótipos da terceira oficina – composição em painel: triângulos radiais (C4) e pétalas radiais (C5).



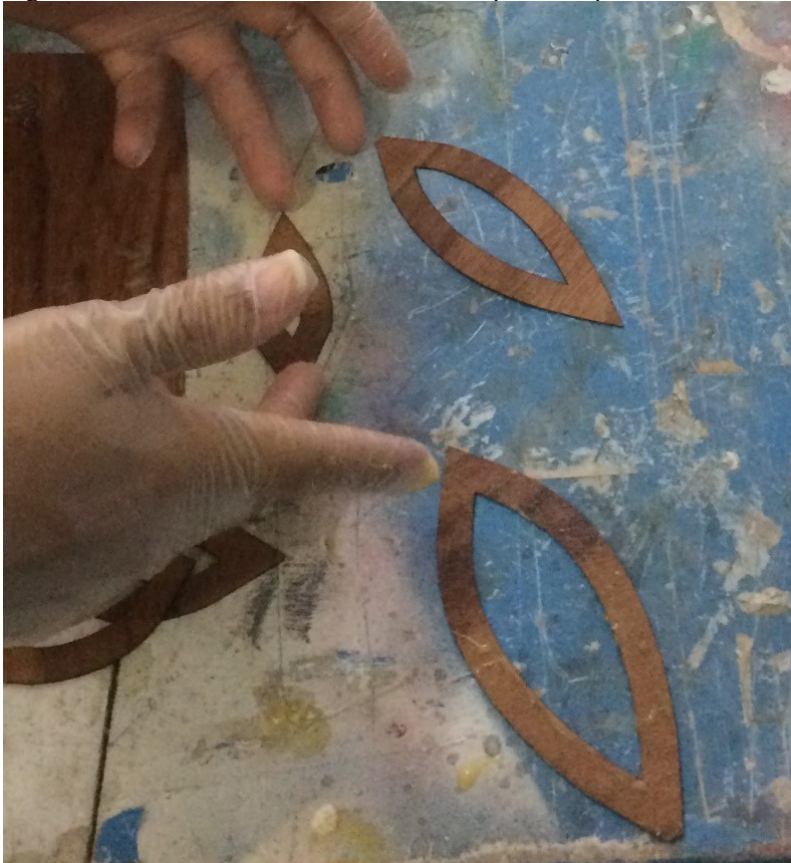
Fonte: Elaborado pela autora (2019).



Os critérios utilizados para avaliar os componentes foram a intensidade da curvatura e menor tempo de resposta quando expostos ao aumento da umidade, montagem simplificada e composição visual adequada. Considerando esses aspectos, foi proposta pelos alunos a união de dois protótipos e elaborado um novo desenho para ser fabricado em série e utilizado como fechamento em uma estrutura. A intenção era que o novo projeto fosse testado antes de ser fabricado em grande quantidade, e embora o arquivo tenha sido desenhado em programa CAD, o uso de *spline* para a construção de curvas causou um número muito grande de vértices quando convertido em *polyline*. Por isso, não foi possível abrir o arquivo no software da cortadora a laser, o que provocou atraso na continuidade da oficina.

A primeira versão do protótipo em série (Figura 41) sofreu algumas modificações para otimização do uso dos materiais e para minimizar as perdas com quebras na montagem e transporte das peças. Seu formato pontiagudo tornava frágil os artefatos, por isso foi alterado para uma ponta de curvas suaves.

Figura 41 - Primeira versão dos elementos responsivos para revestimento.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Inicialmente, as peças, que lembravam pétalas, seriam unidas em formato radial, com uma forma final de flor. Durante o processo de produção, concebeu-se a ideia de organizar os

elementos em linha, com o auxílio de uma canaleta plástica, o que daria mais importância para o uso como revestimento de superfícies.

### 6.1.2 Avaliação em relação à transmissão dos conceitos

A avaliação dos resultados da **primeira oficina** ocorreu de modo qualitativo, por meio da análise da entrevista guiada com os alunos ao final da dinâmica. O objetivo das perguntas era descobrir as principais dificuldades encontradas pelos participantes em relação ao entendimento do conteúdo e elaboração das atividades práticas, bem como investigar o nível de interesse sobre os conteúdos abordados. Todos demonstraram grande interesse nos temas, e relataram pouca ou nenhuma dificuldade em entender a parte teórica ou na execução dos protótipos. A interligação com outras áreas, como eficiência energética, arquitetura bioclimática e sustentabilidade, também foi discutida, com a aplicação dos materiais responsivos de madeira como equipamentos de controle de sombreamento em edificações. Outro ponto levantado foi a manutenção de sistemas com estes elementos, se são economicamente viáveis ou não, o que foi visto como um lado negativo, pois o entendimento geral foi de que materiais responsivos ainda possuem alto custo de instalação e manutenção. Dois estudantes se propuseram a estudar mais sobre materiais responsivos de madeira para incorporá-los em seus projetos nas disciplinas da graduação.

Com base nos resultados do primeiro grupo, elaborou-se um questionário (APÊNDICE A) para ser aplicado aos membros da **segunda e terceira oficinas**, com o objetivo de identificar as dificuldades, os tópicos de maior relevância e meios de aprimorar a apresentação e aplicação das atividades. Na segunda turma, sete dos oito participantes responderam às perguntas, e na última, todos os oito responderam e concordaram em assinar o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Dos dados obtidos pelos questionários (Tabela 6), pode-se perceber um maior interesse dos estudantes das fases finais do curso, com 71% e 88% estando entre a oitava e décima fase, respectivamente, na segunda e terceira oficina. Por já estarem terminando a graduação, é provável que já tenham tido algum contato com os assuntos, relatado por 71% e 88% dos membros. Como já tinham algum conhecimento acerca dos temas, a compreensão do conteúdo teórico foi fácil ou muito fácil para todos em ambos os grupos, embora 25% da segunda turma tenha relatado alguma dificuldade para compreender as instruções para elaboração dos protótipos (Figura 42).

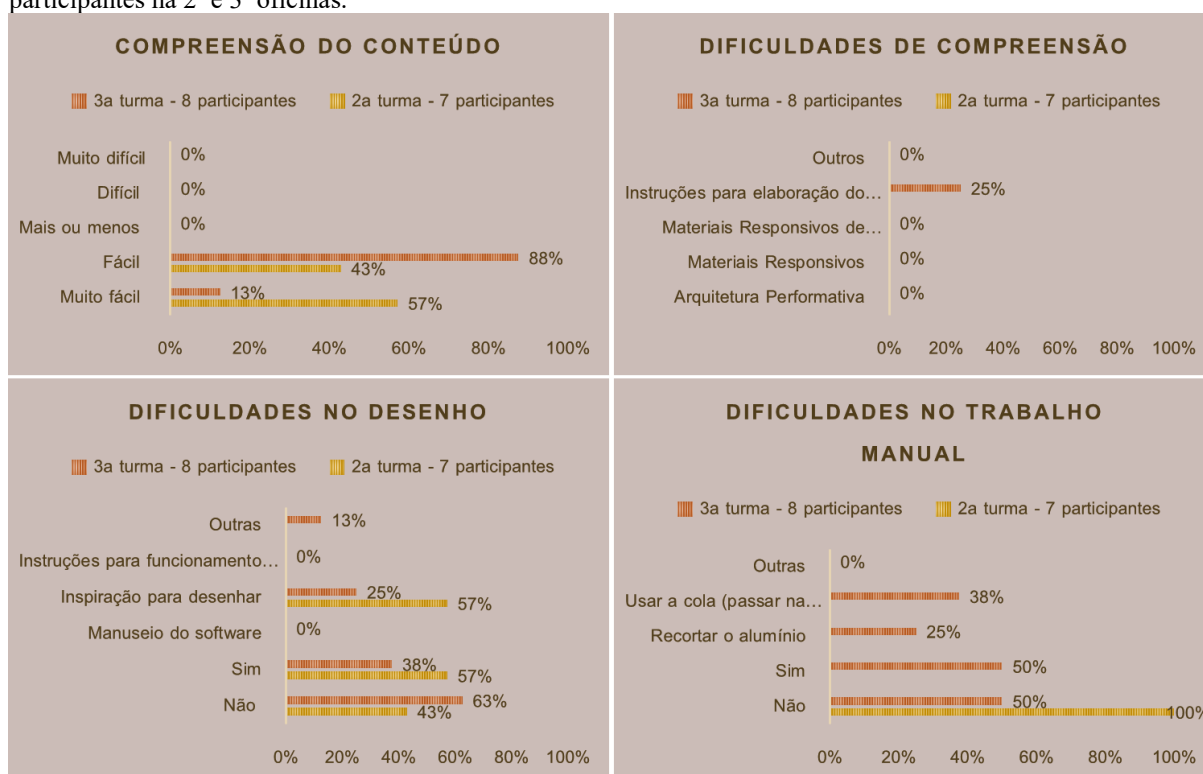
Tabela 6 - Resultados dos questionários da segunda e da terceira oficinas.

<b>Temas abordados nas perguntas</b>	<b>Respostas marcadas pelos participantes</b>	<b>2ª turma – 7 participantes</b>	<b>3ª turma – 8 participantes</b>
Fase do curso	Início (1ª – 3ª)	0%	12%
	Meio (4ª – 7ª)	29%	0%
	Fim (8ª – 10ª)	71%	88%
Conhecimento anterior	Nenhum	43%	12%
	Arquitetura Performativa	43%	62%
	Materiais Responsivos	29%	50%
	Materiais Responsivos de Madeira	0%	25%
Compreensão do conteúdo	Muito Fácil	57%	12%
	Fácil	43%	88%
Dificuldades de Compreensão	Instruções para elaboração dos protótipos	0%	25%
Dificuldades no desenho	Não	43%	62%
	Sim	57%	38%
Quais?	Inspiração para desenhar	57%	25%
	Outras – compatibilização de <i>softwares</i>	0%	13%
Dificuldades no trabalho manual	Não	100%	50%
	Sim	0%	50%
Quais?	Recortar o alumínio	0%	25%
	Usar a cola (passar na madeira e alumínio)	0%	38%
Tempo suficiente	Não	43%	12%
	Sim	57%	88%
Proporção teoria/ prática	Mais teoria	29%	12%
	Mais prática	14%	38%
	Adequada	57%	38%
Relevância do conteúdo para formação	Muito relevante	14%	38%
	Relevante	71%	62%
	Irrelevante	14%	0%
Aplicação futura	Muito provável	0%	25%
	Provável	57%	50%
	Indiferente	29%	25%
	Improvável	14%	0%
Incorporação ao ensino de arquitetura	Sim	100%	100%

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Em relação a elaboração dos componentes, no segundo workshop mais pessoas afirmaram ter problemas em encontrar inspiração para os desenhos (Figura 42): 57% no segundo e 25% no terceiro, além de 13% relataram problemas em relação à compatibilidade do *software* utilizado e o da cortadora a laser. Por sua vez, no último grupo mais pessoas acharam complicada a parte de trabalho manual, para recortar o alumínio (25%) e principalmente no uso da cola (38%). Isso ocorreu pela dificuldade para compreender as instruções para elaboração dos protótipos já relatada.

Figura 42 - Gráficos das respostas sobre compreensão do conteúdo e quais dificuldades enfrentadas pelos participantes na 2ª e 3ª oficinas.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Com duração total de 4h, a segunda oficina não teve duração suficiente de acordo com 43% dos participantes. A terceira, com 12h divididas em quatro dias, teve duração considerada suficiente pela maioria, de 88%. De modo geral, as duas turmas consideraram adequada a proporção de tempo entre teoria e prática, embora 29% da segunda tenham pedido por mais teoria, enquanto na final, somente 12% pediram mais teoria, e com 38% cada opção, concordaram que estava adequada e pediram mais tempo de prática (Figura 43).

Figura 43 - Gráfico das respostas sobre o tempo das oficinas.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A respeito da relevância e probabilidade de aplicação futura do conteúdo, foi registrada uma grande aceitação pelos integrantes dos dois workshops em questão, inclusive em relação à incorporação dos temas ao ensino de arquitetura, em que foi unânime a aceitação. Como sugestões, na segunda turma foi pedido mais exemplos de arquitetura responsiva com madeira, a parte prática com projeto já feito e em maior escala, para melhor compreensão dos efeitos, mas também desenhos menores, por conta do tempo de corte a laser. Essas sugestões foram incorporadas para o grupo seguinte, em que foi apresentado mais exemplos práticos e com maior ênfase na utilização dos componentes responsivos. Desse modo, mais protótipos foram desenvolvidos baseados no funcionamento dos exemplos apresentados. Na última turma, foi sugerido a inclusão de outros materiais e tecnologias para a parte prática. O corte a laser tornou-se motivo de atraso, especialmente na etapa final de produção dos elementos para a estrutura, em que um problema no arquivo para corte demorou a ser solucionado. Devido a esse erro, não era possível abrir o arquivo no software da cortadora a laser, o que atrasou a produção das peças.

## 7 ESTRUTURA COM REVESTIMENTO DE MATERIAL RESPONSIVO DE MADEIRA E ALUMÍNIO

Para testar a aplicabilidade do componente responsivo de madeira, em maio de 2019, foi construída uma estrutura em MDF<sup>12</sup> que recebeu como fechamento 128 elementos higroscopicamente responsivos de dupla camada de madeira e alumínio. Essas peças foram produzidas na última etapa da oficina de Arquitetura Performativa e Materiais Responsivos. A estrutura foi fabricada digitalmente em chapas de MDF de 18 mm cortadas em CNC, no laboratório Pronto 3D de Chapecó (Figura 44), e montada, em um ambiente coberto mas aberto, suscetível às variações externas de umidade, com o auxílio dos participantes da oficina de arquitetura *open source*, da turma de terceira fase de arquitetura e urbanismo da Unochapecó, dentro da disciplina de Fabricação Digital e Prototipagem Rápida da professora Luana Piaia.

Figura 44 - Preparação das peças da estrutura: corte na CNC e lixamento pós corte.



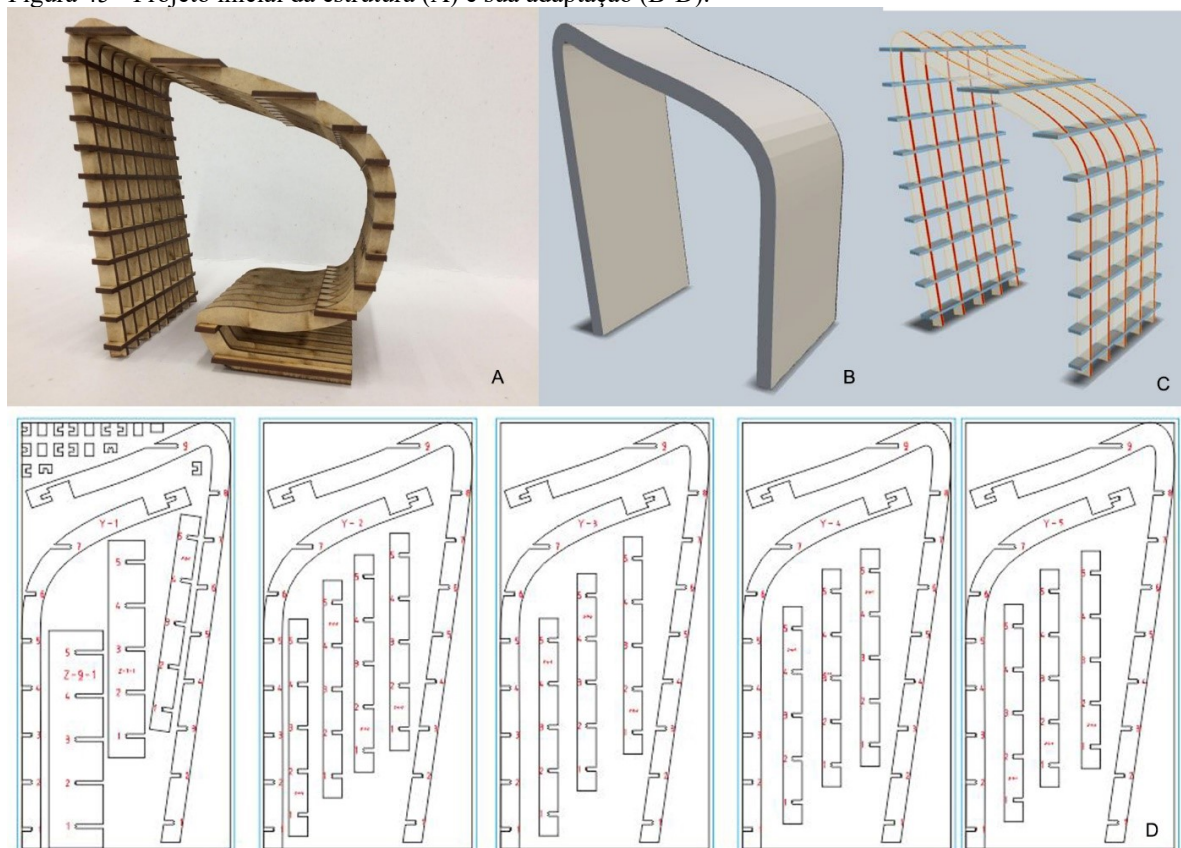
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Este projeto partiu da adaptação de um dos projetos dos alunos da oficina sobre Arquitetura *Open Source*<sup>13</sup>, ministrada por Carla Secchi, que foi inicialmente pensado como um protótipo em escala reduzida de um módulo habitacional simplificado (Figura 45 A). Por ser um projeto *open source*, pôde ser modificado conforme as necessidades. Desta forma, foi adaptado para otimização de chapas e facilidade de montagem em escala real (Figura 45 B-D).

<sup>12</sup> *Medium Density Fiber*, chapa composta de fibras de madeira de forma não-ordenada

<sup>13</sup> Arquitetura *Open Source* é um novo método de projeção, fabricação e construção de habitações, que faz uso de uma abordagem colaborativa e participativa on-line.

Figura 45 - Projeto inicial da estrutura (A) e sua adaptação (B-D).

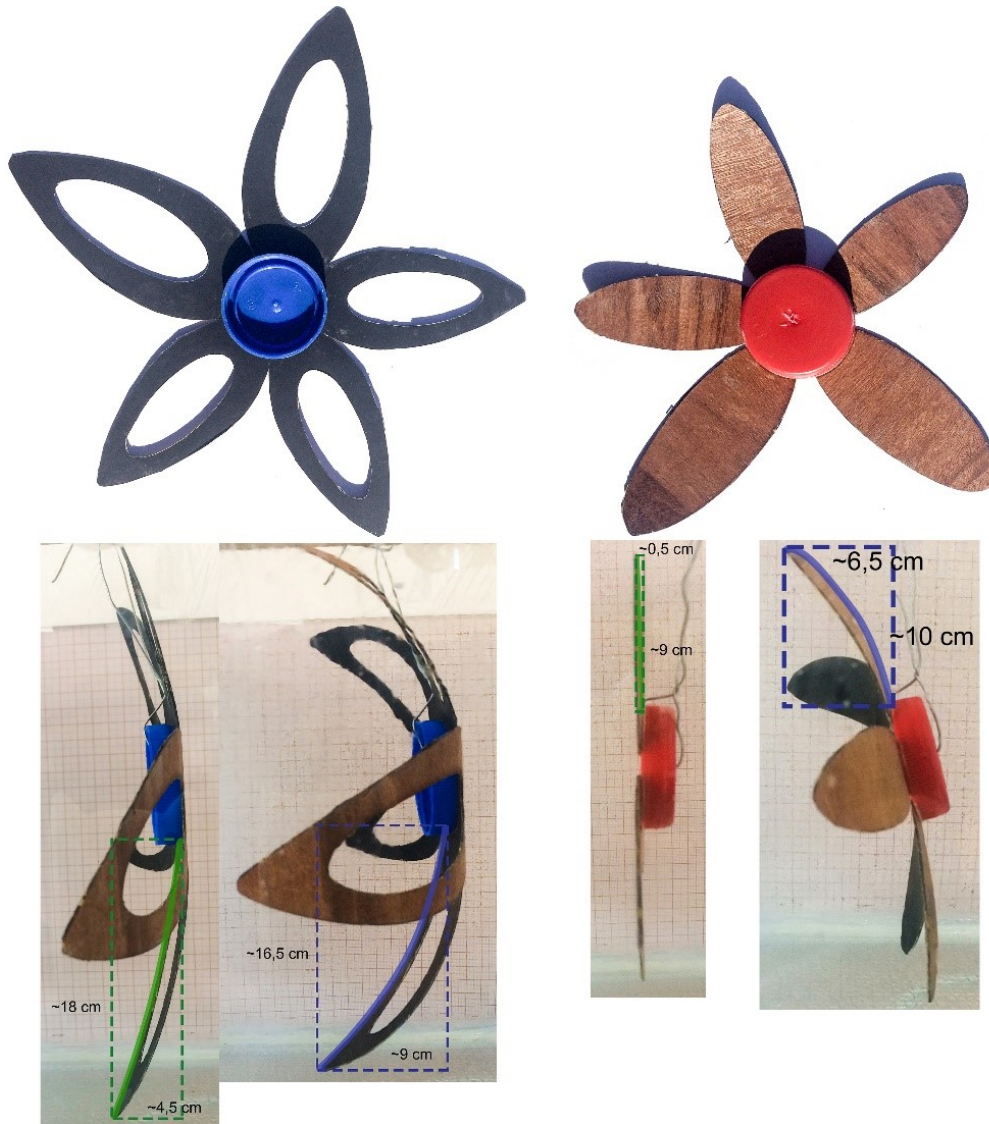


Fonte: Cortesia de Carla Secchi (2019).

Antes do início dos trabalhos em Chapecó, foi explicado rapidamente a função e o modo de funcionamento dos componentes responsivos aos estudantes que auxiliaram no processo de produção. Todos mostraram-se interessados e dispostos para executar a montagem.

Os elementos de fechamento, desenvolvidos pelos alunos da UFSC no Pronto 3D de Florianópolis, foram levados concluídos para Chapecó, onde foram afixados em canaletas de plástico parafusadas no módulo habitacional. O desenho inicial, quase literal das peças, lembrando uma flor de cinco pétalas (Figura 46), foi modificado para que fosse possível o maior fechamento possível, com maior semelhança a um painel revestido. A forma de cada peça incorporou ideias dos protótipos da terceira oficina, com as características mais relevantes, como o formato, os recortes internos para aumentar a capacidade de curvatura, a concepção em linha e a variação nos tamanhos para criar mais opções de composição.

Figura 46 - Primeira proposta de organização dos protótipos e avaliação da resposta em relação ao aumento de umidade - versão vazada e versão cheia.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Cada pétala foi cortada individualmente na cortadora a laser, depois colada no alumínio (Figura 47). A parte interna das peças vazadas foi reaproveitada como pétalas cheias. Com duas variações de tamanho, ao final obteve-se quatro tipos diferentes de componentes: grande vazado, pequeno vazado, grande cheio e pequeno cheio. Em Chapecó, foram então colocadas em canaletas de 80 cm, previamente fixadas diretamente no MDF, com o uso de parafusos de 2 mm x 10 mm. O espaçamento de 20 cm dos montantes da estrutura favoreceu composições com oito peças, uma delas previamente definida, mas que recebeu mais protótipos no momento da instalação. A outra foi proposta por um dos integrantes durante a colocação.



Figura 47 - Produção dos componentes em série. Em sentido anti-horário, do topo-esq.: corte a laser, colagem no alumínio, recorte do alumínio.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

A montagem do módulo habitacional levou cerca de duas horas, com a colaboração de sete pessoas (Figura 48). A colocação dos elementos higroscopicamente responsivos, bem como a fixação das canaletas na estrutura, levou cerca de meia hora (Figura 49). A estrutura recebeu uma demão de verniz marítimo para prolongar sua conservação, o que tomou mais quatro horas, com duas pessoas.

Figura 48 - Montagem da estrutura: conexão das partes dos pórticos e colocação dos travamentos.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 49 - Fixação das canaletas e colocação dos elementos responsivos.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

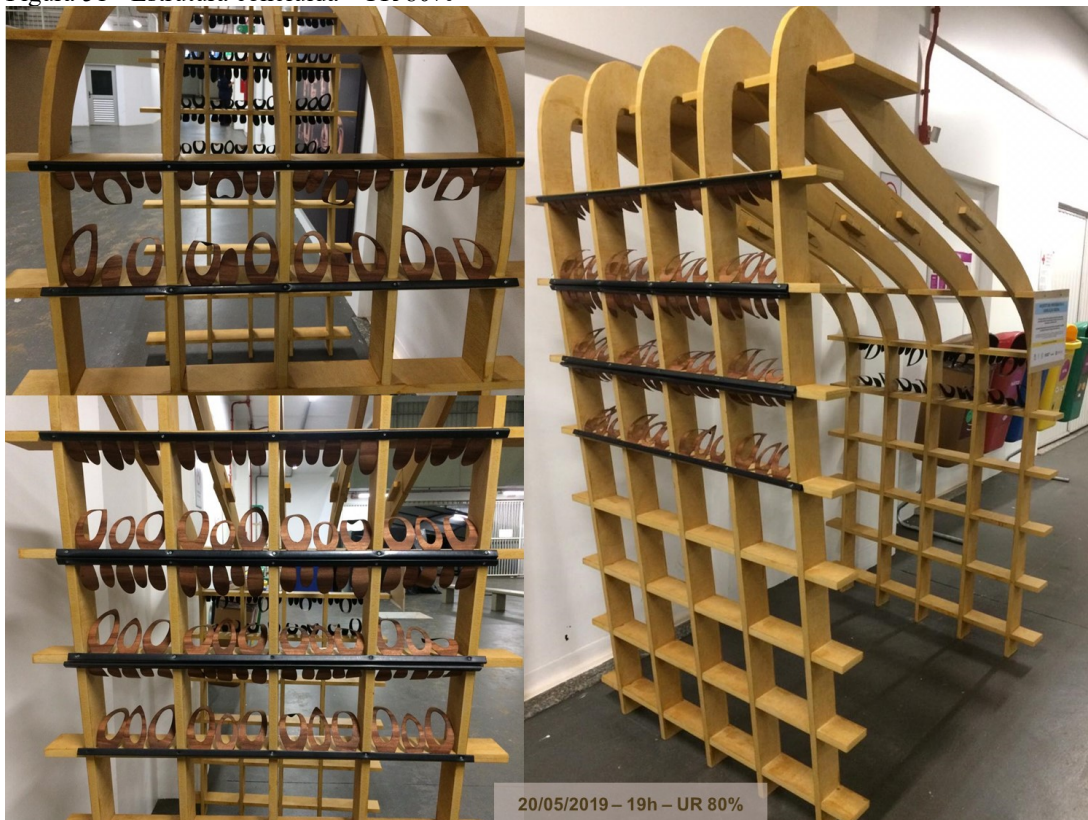
A estrutura está exposta no hall dos laboratórios da Unochapecó, com grande circulação de pessoas em vários momentos do dia, e os componentes têm apresentado o desempenho esperado com a variação da umidade relativa (Figura 1Figura 50 a Figura 54). Uma placa informativa afixada na estrutura explica brevemente o comportamento dos elementos ().

Figura 50 - Estrutura concluída - UR 90%.



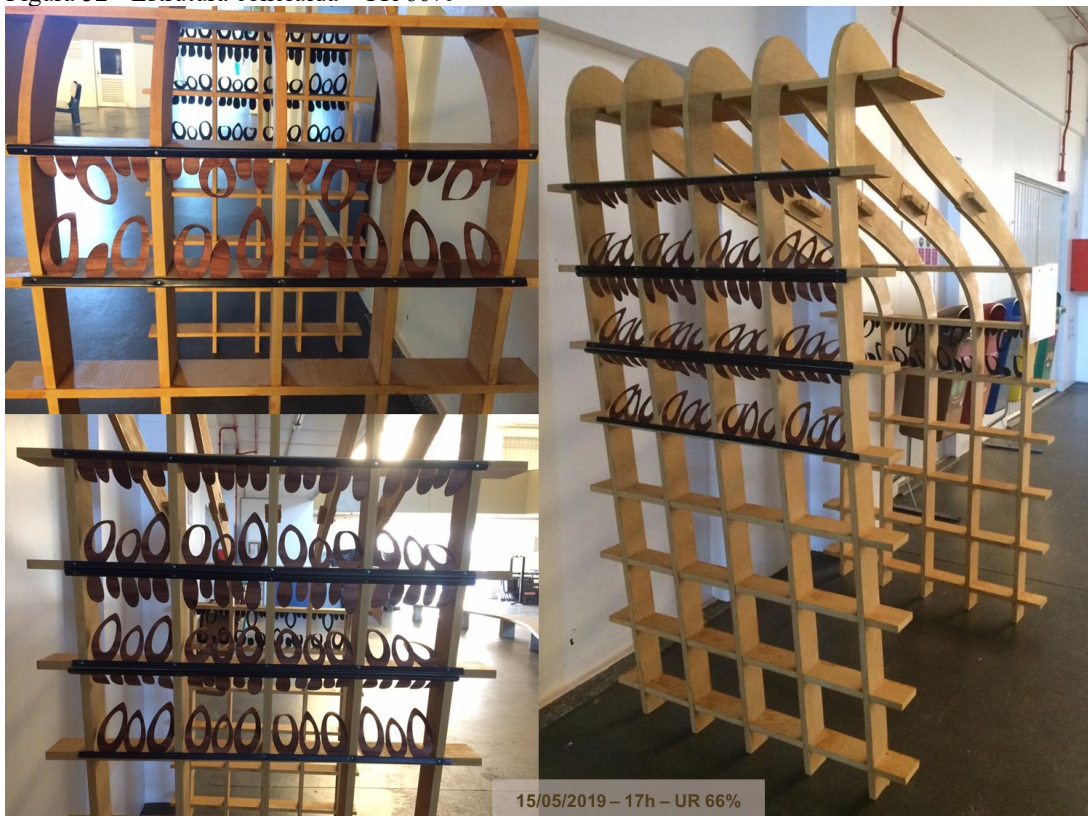
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 51 - Estrutura concluída - UR 80%



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 52 - Estrutura concluída - UR 60%



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 53 - Estrutura concluída - UR 51%



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Figura 54 - Estrutura concluída - UR 47%.



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Arquitetura performativa é um termo que se refere tanto aos aspectos de desempenho quanto às intervenções artísticas que são a expressão de determinada sociedade, em determinado contexto histórico. A expressão, que vem ganhando força na última década, tem suas origens em meados do século XX, com um movimento de transformação cultural. Apesar disso, quando abordada em ateliês de projeto, seu enfoque é principalmente em como otimizar os sistemas que compõe uma edificação – estrutural, lumínico, acústico, térmico, entre outros. Questões relativas à interação dos usuários com a arquitetura construída, e desta com o ambiente, costumam ser relegadas a um segundo plano.

A performance na arquitetura se torna mais evidente com características dinâmicas, que tem relação tanto com aspectos cinéticos dos elementos arquitetônicos, que se reconfiguram conforme as alterações no ambiente, como com o movimento das pessoas, que modificam os espaços. Assim, os espaços externo e interno se conectam de outros modos, não só com os limites físicos criados pelos materiais, mas pelas interações que surgem com a performance dinâmica. Os limites espaciais se tornam mais flexíveis, permitindo maior troca social e de informações.

Apropriando-se devidamente do comportamento dos materiais, estes podem contribuir para a concepção de espaços com maior relação com as pessoas que os utilizam e com o lugar no qual estão inseridos. Com isso, materiais como a madeira, que tendem a ser subutilizados em relação às propriedades de contração e dilatação por absorção de água, podem ser aplicados de formas não previstas, como, por exemplo, elementos de transição entre espaços, funcionando como *building envelope*, ou revestimento de proteção à insolação, como *building skins*.

A resposta higroscópica da madeira vem sendo aproveitada como principal atributo em componentes responsivos em duas camadas de madeira e material sintético. Devido à dilatação da madeira ao absorver água, os componentes alteram sua forma, com um efeito dinâmico que pode ser compreendido no conceito da arquitetura performativa.

Para se obter a melhor resposta, alguns aspectos devem ser levados em consideração, como:

- a orientação das fibras no sentido perpendicular ao movimento;
- a baixa capacidade de absorção de água do material da camada passiva;
- a não impermeabilização da camada ativa de madeira;

- a geometria alongada das peças; e
- o método de colagem que permita alta adesão e esforços de compressão e tração repetitivos.

As pesquisas sobre o material tiveram como resultado projetos em que são aplicadas peças com propriedades de resposta à variação de umidade do ar, com funções de fechamento e proteção solar (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015; BRIDGENS; HOLSTOV; FARMER, 2017; VAILATI et al., 2018). Esses projetos serviram de base para a construção da estrutura final desta pesquisa, com revestimento de elementos responsivos de madeira e alumínio.

Com a investigação dos conceitos de arquitetura performativa e materiais responsivos, fundamentou-se a apresentação destes conteúdos em oficinas para três grupos diferentes de alunos da graduação. Para a organização e planejamento das oficinas, optou-se pelo método hands on, pois trabalha com a teoria aplicada na prática, com foco no processo, e com isso desenvolve múltiplas habilidades. A experiência de Davidova e Sevaldson (2016), de oficinas sobre madeira como material responsivo na construção de uma estrutura em escala real, também contribuiu para a elaboração das etapas das oficinas, que foram as seguintes:

- apresentação do conteúdo teórico sobre arquitetura performativa e materiais responsivos;
- orientações para desenho dos protótipos e para uso da cortadora a laser;
- elaboração dos protótipos;
- testes dos protótipos.

Por serem utilizadas lâminas de madeira, que possuem menor espessura do que o material usado por Davidova e Sevaldson (2016), a ferramenta digital também foi alterada para a cortadora a laser, que permite a execução de geometrias mais complexas em chapas de pouca espessura. Considerando que as oficinas de Davidova e Sevaldson (2016) incluíam assuntos como projeto paramétrico, e tinham como objetivo final a produção de uma estrutura de pelo menos três metros de altura, com a utilização de materiais de maior espessura, a duração de dois a quatro meses é adequada. Para esta pesquisa, com materiais menores e oficinas gratuitas para os participantes, o tempo necessário para realizá-las foi menor, assim, verificou-se que a duração poderia ser menor do que a da proposta tcheca.

As duas primeiras turmas, que ocorreram com uma semana de intervalo entre si, tiveram a duração de quatro horas cada. Embora os participantes tenham considerado como tempo suficiente para realização das atividades propostas, na segunda oficina os protótipos

foram testados fora do horário previsto. Por isso, a terceira oficina foi expandida para doze horas, divididas em quatro dias.

O conteúdo teórico foi mantido igual nas três turmas, entretanto, tópicos em que foram percebidas dificuldades de entendimento por parte dos estudantes foram revisados e enfatizados nos grupos seguintes. O desenvolvimento de protótipos responsivos pelos estudantes foi proposto como forma de fixar o conteúdo teórico ministrado, uma vez que se apreende melhor um novo conhecimento mais sentidos são postos em ação, aumentando as percepções. O aumento da complexidade das peças dos participantes da oficina conforme foi sendo refinada a exposição dos conceitos comprovou que, por meio da junção de teoria e prática, o conteúdo pode ser incorporado ao ensino de arquitetura nos ateliês de projeto.

Entre os protótipos produzidos, os que apresentaram melhor resposta foram os que respeitaram a orientação das fibras mais favorável, com formatos alongados e pontiagudos. Recortes internos nas peças criaram seções mais esbeltas, que, além de terem melhor resposta, contribuíram para um efeito dinâmico mais diversificado. A construção de painéis estruturados, especialmente na última turma, explorou composições de peças repetidas, com pequenas variações no tamanho, também proporcionando um dinamismo distinto.

Com maior duração, a última oficina também teve a inclusão da proposta de construção da estrutura revestida com material responsivo. As peças de revestimento, produzidas na UFSC, foram aplicadas em uma estrutura de MDF, adaptada de um projeto open source de uma oficina sobre arquitetura open source com alunos da UNOCHAPECÓ.

Devem ser observadas também as dificuldades encontradas durante o processo, que se relacionaram principalmente à interoperabilidade dos *softwares* usados para o projeto dos protótipos e o utilizado pela cortadora a laser, assim como o planejamento do tempo de corte dos protótipos. O maquinário de corte a laser pode ser um facilitador na execução de formas complexas, mas o preparo anterior dos projetos deve ser feito com atenção, para evitar atrasos que prejudiquem o andamento da atividade. Outra questão levantada entre os alunos foi a falta de inspiração para desenvolver os protótipos. Embora até o momento sejam poucos os projetos com madeira como material responsivo, mais exemplos de mecanismos responsivos, inclusive inspirados em elementos naturais, como partes de plantas (REICHERT; MENGES; CORREA, 2015; HOLSTOV; BRIDGENS; FARMER, 2015), podem ser explorados como exemplos.

A experiência de ensino foi considerada positiva pela maioria dos alunos, que afirmaram que o conteúdo apresentado é relevante para a formação e deve ser incorporado ao ensino de arquitetura, considerando provável a sua aplicação em projetos futuros. A incorporação de projeto paramétrico para o desenho dos protótipos pode ser um diferencial no



momento de concepção, especialmente se for possível incluir a simulação do comportamento das geometrias geradas, evitando desperdícios de materiais com protótipos que não foram elaborados adequadamente.

Na etapa final, em decorrência do tempo disponível para esta etapa e o custo para executá-la, foi necessário que os elementos responsivos tivessem seu uso adaptado como revestimento para uma estrutura, e não como um elemento arquitetônico independente. Ainda assim, as alterações ocorridas com a variação de umidade relativa do ambiente no qual a estrutura foi montada exploram a proposta de uso como elementos geradores de espaços de transição, nem totalmente abertos ou fechados.

Destaca-se também a colaboração entre dois polos da rede Pronto 3D – Florianópolis e Chapecó – na construção da estrutura. A existência de um laboratório de fabricação digital não é fundamental para a realização das atividades, ainda que facilite algumas etapas. A escolha do material da camada passiva pode levar em consideração também o seu potencial de uso das ferramentas de fabricação digital. O alumínio, que de modo geral não pode ser usado em cortadoras a laser, pode ser substituído por outros materiais que não tenham esse problema, como vinil adesivo ou PET. Outra solução pode ser a aplicação direta da camada passiva com o uso de impressoras 3D, ainda que o custo possa aumentar, pelo material da impressão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, Zunaibi B. Getting Their Hands Dirty: Qualitative Study on Hands-on Learning for Architectural Students in Design-build Course. **Journal Of Design And Built Environment**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.55-84, jun. 2011.
- ADDINGTON, D. Michelle; SCHODEK, Daniel L. **Smart Materials and New Technologies: For the architecture and design professions**. Burlington, MA: Elsevier, 2005.
- ANDRADE, Max Lira Veras Xavier de. **Projeto performativo na prática arquitetônica recente: Estrutura Conceitual**. 2012. 472 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- AZZARELLO, Nina. **Designboom: responsive hexi wall fluctuates based on nearby movements**. 2014. Disponível em: <<https://www.designboom.com/design/responsive-hexi-wall-fluctuates-based-on-nearby-movements-02-25-2014/>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- BARATTO, Romullo. **ArchDaily Brasil: Estudio Guto Requena cria fachada de luz interativa em São Paulo**. 2015. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/770171/estudio-guto-requena-cria-fachada-de-luz-interativa-em-sao-paulo>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- BOTELHO, Louise Lira Roedel; CUNHA, Cristiano Castro de Almeida; MACEDO, Marcelo. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p.121-136, ago. 2011.
- CHAMEL, Olivier. Design/build: A Relevant Pedagogy for Architecture Education. **Vitruvio - International Journal Of Architectural Technology And Sustainability**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.53-67, 20 dez. 2016. Universitat Politecnica de Valencia. <http://dx.doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.6773>.
- CILENTO, Karen. **ArchDaily: Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas**. 2012. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- CORDEIRO, Alexander Magno et al. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. **Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões**, [s.l.], v. 34, n. 6, p.428-431, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69912007000600012>.
- DAVIDOVÁ, Marie; SEVALDSON, Birger. 1:1: A Transdisciplinary Prototyping Studio. In: SŁYK, Jan; BEZERRA, Lia (Ed.). **Education for Research, Research for Creativity**. Warszawa: Wydział Architektury Politechniki Warszawskiej, 2016. p. 302-308.
- DERAKHSHI, Sareh Saeidi. Rethinking The Performance of Envelopes in Architecture. **International Journal Of Design Sciences And Technology**. Paris (França), p. 7-37. dez. 2017. Disponível em: <<http://ijdst.europia.org/index.php/ijdst/article/view/1>>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- DUIGOU, A. Le et al. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. **Materials & Design**, [s.l.], v. 96, p.106-114, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (U.S.). Department Of Agriculture. **Wood handbook: Wood as an engineering material**. Madison, WI: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.
- FURUTO, Alison. **ArchDaily: Bloom / DO|SU Studio Architecture**. 2012. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/215280/bloom-dosu-studio-architecture>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184p. ISBN 9788522458233.
- HENSEL, Michael Ulrich. Performance-oriented Architecture and the Spatial and Material Organisation Complex. Rethinking the Definition, Role and Performative Capacity of the

Spatial and Material Boundaries of the Built Environment. **Formakademisk**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.3-23, 8 mar. 2011. Oslo and Akershus University College of Applied Sciences. <http://dx.doi.org/10.7577/formakademisk.125>.

\_\_\_\_\_. A Brief History of the Notion of Performance. In: \_\_\_\_\_. **Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment**. [s. L.]: John Wiley & Sons, 2013a. Cap. 1. p. 17-22.

\_\_\_\_\_. A Brief History of the Notion of Performance in Architecture. In: \_\_\_\_\_. **Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment**. [s. L.]: John Wiley & Sons, 2013b. Cap. 2. p. 23-30.

HOLSTOV, Artem; BRIDGENS, Ben; FARMER, Graham. Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 98, p.570-582, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136>.

HOLSTOV, Artem; FARMER, Graham; BRIDGENS, Ben. Implementing hygromorphic wood composites into responsive building skins. In: CONFERENCE ON ADVANCED BUILDING SKINS, 11., 2016, Bern, Switzerland. **Proceedings...** . Bern, Switzerland: Advanced Building Skins GmbH, 2016. p. 1 - 10.

\_\_\_\_\_. Sustainable Materialisation of Responsive Architecture. **Sustainability**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.435-455, 16 mar. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su9030435>.

HOLSTOV, Artem et al. Towards sustainable adaptive building skins with embedded hygromorphic responsiveness. In: ADVANCED BUILDING SKINS, 10., 2015, Graz. **Proceedings...** . Graz: Graz University Of Technology, 2015. p. 1 - 10.

HOVESTADT, Ludger. **CAAD. Blog: phototropia a self-sufficient architectural vision**. [2013]. Disponível em: <<http://www.caad.arch.ethz.ch/blog/phototropia/>>. Acesso em: 10 maio 2018.

KOLAREVIC, Branko. Towards the performative in architecture. In: KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali (Ed.). **Performative architecture: beyond instrumentality**. New York, NY: Spon Press, 2005. Cap. 15. p. 203-213.

LASTRAS, Alejandra Díaz de León. **Light Responsive Origami Facade**. 2014. Disponível em: <<https://www.behance.net/gallery/19085985/Light-Responsive-Origami-Facade>>. Acesso em: 10 maio 2018.

LELIEVELD, Charlotte. **Smart Materials For The Realization Of An Adaptive Building Component**. [s. L.]: Delft University Of Technology, 2013.

LENZ, Daniel; CELANI, Gabriela. Performative architecture: Uma arqueologia tecnológica. **Vitruvius: Arqtextos**, São Paulo, v. 186, n. 04, p.1-10, nov. 2015.

NAHUZ, Marcio Augusto Rabelo (Org.). **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013.

NISENBAUM, Marcio. O conceito de Performance e sua apropriação no campo do Design Computacional. **Blucher Design Proceedings**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.1-6, dez. 2016. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-595>.

POMPEO, Daniele Alcalá; ROSSI, Lúcia Aparecida; GALVÃO, Cristina Maria. Revisão integrativa: etapa inicial do processo de validação de diagnóstico de enfermagem. **Acta Paulista de Enfermagem**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.434-438, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-21002009000400014>.

PUENTE, Sonia M. Gómez; VAN EIJCK, Michiel; JOCHEMS, Wim. A sampled literature review of design-based learning approaches: a search for key characteristics. **International Journal Of Technology And Design Education**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.717-732, 3 jun. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10798-012-9212-x>.

REICHERT, Steffen; MENGES, Achim; CORREA, David. Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygrosopically enabled

- responsiveness. **Computer-aided Design**, [s.l.], v. 60, p.50-69, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010>.
- RICHARDSON, Roberto Jarry; PERES, Jose Augusto de Souza. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Atlas, 1989. 334p.
- RÜGGERBERG, Markus; BURGERT, Ingo. Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications. **Plos One**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.1-17, 2 abr. 2015. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0120718>.
- SEDREZ, M.; CELANI, G. Ensino de projeto arquitetônico com a inclusão de novas tecnologias: uma abordagem pedagógica contemporânea. **Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 21, n. 35, p. 78-97, 10 set. 2014.
- SKAAR, Christen. **Wood-Water Relations**. Syracuse, NY: Springer, 1988. 263 p.
- SPANBROEK, Nancy. Strategic Teaching: Student Learning through Working the Process. **International Journal Of Art & Design Education**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.111-120, 14 jun. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1476-8070.2010.01654.x>.
- VAILATI, C. et al. An autonomous shading system based on coupled wood bilayer elements. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 158, p.1013-1022, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.042>.
- VIDAL, Jackson Marcelo et al. PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS NO BRASIL: HISTÓRICO, CENÁRIO ATUAL E TENDÊNCIAS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p.257-271, mar. 2015.
- WALKER, John C. F. **Primary Wood Processing: Principles and Practice**. 2nd. ed. Dordrecht: Springer, 2006. 603 p.
- WOOD, Dylan Marx et al. Material computation—4D timber construction: Towards building-scale hygroscopic actuated, self-constructing timber surfaces. **International Journal Of Architectural Computing**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.49-62, 14 fev. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1478077115625522>.
- ZULUAGA, David Correa; MENGES, Achim. 3D Printed Hygroscopic Programmable Material Systems. **Mrs Proceedings**, [s.l.], v. 1800, p.1-8, 2015. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2015.644>.

## APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO APLICADO AOS PARTICIPANTES DA SEGUNDA E DA TERCEIRA OFICINAS

1. Em que fase do curso você se encontra?

\_\_\_\_\_

2. Você já tinha conhecimento de algum dos temas?

- Arquitetura Performativa
- Materiais Responsivos
- Materiais Responsivos de Madeira
- Nenhum deles

3. O conteúdo teórico foi fácil de entender?

- Muito fácil
- Fácil
- Mais ou menos
- Difícil
- Muito difícil

3.1 Se não, no que você teve mais dificuldade?

- Arquitetura Performativa
- Materiais Responsivos
- Materiais Responsivos de Madeira
- Instruções para elaboração do protótipo
- 

Outros: \_\_\_\_\_

4. Houve dificuldades para fazer os desenhos para o corte a laser?

Não  Sim 4.1 Quais?

- Manuseio do software
- Inspiração para desenhar
- Instruções para funcionamento do sistema de madeira e alumínio

Outras: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Houve dificuldades no trabalho manual (cola, recorte alumínio)?

Não  Sim 5.1 Quais?

Recortar o alumínio

Usar a cola (passar na madeira/alumínio)

Outras: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Você acha que o tempo foi suficiente para realizar as atividades propostas?

Não  Sim

6.1 Você acha que a proporção de tempo entre teoria e prática foi adequada?

- Não, precisava de mais teoria
- Não, precisava de mais prática
- Sim, estava adequada

7. Você acredita que o conhecimento adquirido tem relevância para sua formação?

- Muito relevante
- Relevante
- Indiferente
- Irrelevante
- Muito irrelevante

8. Qual a probabilidade de você aplicar o que aprendeu aqui futuramente?

- Muito provável
- Provável
- Indiferente
- Improvável
- Muito improvável

9. Você acredita que este conteúdo poderia ser incorporado ao ensino de arquitetura?

Não  Sim

10. Tem alguma sugestão ou outra contribuição?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## APÊNDICE B – PLACA INFORMATIVA DA ESTRUTURA

# ARQUITETURA PERFORMATIVA E FABRICAÇÃO DIGITAL

**ESTRUTURA DESENVOLVIDA NA OFICINA DE ARQUITETURA OPEN SOURCE -  
CONCEPÇÃO DE MÓDULOS HABITACIONAIS EM ATELIÊ, POR CARLA SECCHI  
(UNOCHAPECÓ / MESTRANDA UFSC)**

**FECHAMENTO COM ELEMENTOS HIGROSCOPICAMENTE RESPONSIVOS DE MADEIRA  
E ALUMÍNIO, POR GLADYS TAPARELLO (MESTRANDA UFSC)**

OS ELEMENTOS SE CURVAM CONFORME A ALTERAÇÃO DA UMIDADE DO AR: A MADEIRA ABSORVE A ÁGUA E SE DILATA QUANDO O CLIMA ESTÁ ÚMIDO (>60%), OU PERDE ÁGUA E SE CONTRAI, QUANDO O CLIMA ESTÁ SECO (<60%), CAUSANDO A CURVATURA DOS COMPONENTES.

**MATERIAL FRÁGIL, POR FAVOR, NÃO MEXA!**



**ARQUITETURA  
E URBANISMO**

**UNOCHAPECÓ**



## APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO DA SIMULAÇÃO DAS AMOSTRAS NO GRASSHOPPER E CÓDIGO C+ UTILIZADO

The image displays a Grasshopper script and its corresponding C# code. The script is organized into several sections:

- INITIAL GEOMETRY:** Defines the initial state with 'Start Point', 'End Point', and 'Line' components.
- CONT. INITIALS:** Uses 'Move' and 'Reverse' components to manipulate the geometry.
- CONT. INITIALS 2:** Further manipulation using 'Vector' and 'Reverse' components.
- CONT. INITIALS 3:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 4:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 5:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 6:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 7:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 8:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 9:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 10:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 11:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 12:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 13:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 14:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 15:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 16:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 17:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 18:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 19:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 20:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 21:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 22:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 23:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 24:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 25:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 26:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 27:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 28:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 29:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 30:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 31:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 32:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 33:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 34:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 35:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 36:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 37:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 38:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 39:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 40:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 41:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 42:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 43:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 44:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 45:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 46:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 47:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 48:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 49:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 50:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 51:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 52:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 53:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 54:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 55:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 56:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 57:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 58:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 59:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 60:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 61:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 62:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 63:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 64:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 65:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 66:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 67:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 68:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 69:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 70:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 71:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 72:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 73:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 74:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 75:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 76:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 77:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 78:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 79:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 80:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 81:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 82:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 83:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 84:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 85:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 86:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 87:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 88:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 89:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 90:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 91:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 92:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 93:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 94:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 95:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 96:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 97:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 98:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 99:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.
- CONT. INITIALS 100:** Uses 'Rotate' and 'Transform' components.

The C# code in the Script Editor is as follows:

```

1  using
25
26
27
28  /// <summary>
29  /// This class will be instantiated on demand by the Script component.
30  /// </summary>
31  public class Script_Instance : GH_ScriptInstance
32  {
33  }
34  }
35  }
36  }
37  }
38  }
39  }
40  }
41  }
42  }
43  }
44  }
45  }
46  }
47  }
48  }
49  }
50  }
51  }
52  }
53  }
54  }
55  }
56  }
57  }
58  }
59  }
60  }
61  }
62  }
63  }
64  }
65  }
66  }
67  }
68  }
69  }
70  }
71  }
72  }
73  }
74  }
75  }
76  }
77  }
78  }
79  }
80  }
81  }
82  }
83  }
84  }
85  }
86  }
87  }
88  }
89  }
90  }
91  }
92  }
93  }
94  }
95  }
96  }
97  }
98  }
99  }
100  }

```