



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Isabela Cavalcanti de Souza**

**PROCESSO CONSTRUTIVO DE ESTRUTURA *GRIDSHELL* PÓS-  
FORMADA COM USO DE PINUS**

**Natal  
2019**

**Isabela Cavalcanti de Souza**

**PROCESSO CONSTRUTIVO DE ESTRUTURA *GRIDSHELL* PÓS-  
FORMADA COM USO DE PINUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como um dos requisitos parciais à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Edna Moura Pinto  
Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

Natal  
2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Isabela Cavalcanti de.

Processo construtivo de estrutura gridshell pós-formada com uso de pinus / Isabela Cavalcanti de Souza. - 2019.  
176f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientadora: Dra. Edna Moura Pinto.

Coorientador: Dr. Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias.

1. Estruturas de madeira - Dissertação. 2. Gridshell - Dissertação. 3. Montagem - Dissertação. 4. Métodos construtivos - Dissertação. 5. Construção Civil - Dissertação. I. Pinto, Edna Moura. II. Dias, Alfredo Manuel Pereira Geraldês. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.011.1

ISABELA CAVALCANTI DE SOUZA

**PROCESSO CONSTRUTIVO DE ESTRUTURA *GRIDSHELL* PÓS-  
FORMADA COM USO DE PINUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais e Processos Construtivos.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Edna Moura Pinto – Orientadora, UFRN

---

Prof. Dr. José Neres da Silva Filho – Examinador Interno, UFRN

---

Prof. Dr. Sandro Fábio César – Examinador Externo, UFBA

**Natal, 19 de junho de 2019.**

# PROCESSO CONSTRUTIVO DE ESTRUTURA *GRIDSHELL* PÓS-FORMADA COM USO DE PINUS

Isabela Cavalcanti de Souza

Orientadora: Profa. Dra. Edna Moura Pinto

Prof. Dr. Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias – Coorientador, UC (Portugal)

## RESUMO

As estruturas *gridshell* são formadas por elementos lamelares ou tubulares em forma de grade, sendo projetadas e construídas em diferentes materiais, tais como aço, madeira e compósitos. O diferencial está no emprego de uma quantidade reduzida de material em edifícios com grande espaço interno, sem a necessidade de pilares ao longo do vão. Assim, obras de grandes extensões como pavilhões, hangares e galpões podem ser executadas em pouco tempo. Este trabalho de pesquisa analisa e demonstra o processo de montagem de *gridshells*, detalha os métodos construtivos existentes e os tipos de ligações usados para unir as peças que formam o conjunto, priorizando estudos que trazem o uso da madeira como matéria-prima. Foi executado também um Mapeamento Sistemático da Literatura (*Systematic Mapping Study*), com ênfase nos artigos científicos publicados na área. Esse levantamento ajudou a traçar um panorama dos estudos envolvendo o tema *Gridshell* no mundo, identificando os países e as instituições que mais registraram artigos numa janela temporal de 35 anos. O trabalho contempla ainda: (i) a listagem de algumas realizações construtivas existentes; (ii) o processo de concepção e a modelagem de estrutura projetada; (iii) a execução de maquetes em escala reduzida e modelos físicos (*mockups*) em tamanho real; (iv) a avaliação teórica e experimental de partes do projeto; (v) a preparação dos elementos lamelares; (vi) a descrição da construção de uma malha intitulada Dunas *Gridshell* em escala real com o uso de madeiras do gênero *Pinus*, mostrando seus detalhes técnicos, tempo de execução e custo.

**Palavras-chave:** *Gridshell*. Construção Civil. Montagem. Métodos construtivos. Estruturas de madeira.

# CONSTRUCTIVE PROCESS OF POST-FORMED GRIDSHELL STRUCTURE WITH PINUS USE

Isabela Cavalcanti de Souza

Advisor: Prof. Dr. Edna Moura Pinto

Prof. Dr. Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias – Co-advisor, UC (Portugal)

## ABSTRACT

The gridshell structures are formed by lamellar or tubular grid-shaped elements, being designed and constructed in different materials, such as steel, wood and composites. The differential is the use of a reduced amount of material in buildings with large internal space, without the need for pillars along the span. Thus, works of great extensions like pavilions, hangars and sheds can be executed in a short time. This research analyses and demonstrates the gridshells assembly process, details the existing construction methods and the types of connections used to join the pieces that form the set, giving priority to studies that highlight the use of wood as a raw material. A Systematic Mapping Study was also carried out with an emphasis on the scientific papers published in the area. This survey helped to chart the world's gridshell studies all over the world, identifying the countries and institutions that more contributed to spread articles in a 35-year window of time. The work also includes: (i) the listing of some existing constructive achievements; (ii) the design process and the projected structure modelling; (iii) the execution of small scale and full-size mock-ups; (iv) the theoretical and experimental evaluation of project parts; (v) the fabrication of the lamellar elements; (vi) the description of the construction of a grid called Dunas Gridshell in real scale using the pine woods (genus *Pinus*), showing its technical details, execution time and cost.

**Keywords:** Gridshell. Construction. Assembly. Constructive methods. Timber structures.

*É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.*

Theodore Roosevelt

## AGRADECIMENTOS

À força espiritual infinita que é Deus.

À minha mãe, Angélica Cavalcanti de Souza, pelas horas dedicadas à organização da minha vida escolar e da minha rotina quando criança. Pelas milhares de palavras de incentivo incondicional e de renúncias feitas em meu nome e dos meus irmãos. Minha gratidão por cada atitude de amor.

Ao meu pai, Paulo de Souza Vilela, pelo amparo em todos os momentos da minha existência. Pelas palavras de incentivo, que nunca me permitiram podar meu espírito livre em todos os campos de minha vida. Obrigada por ser esse espírito leve que não se abala pelas adversidades do dia a dia.

Ao grande amor da minha vida, Andressa Silva de Souza, que esteve comigo durante toda essa jornada e me ajudou a crescer como pessoa nos momentos atribulados. Sem você não teria forças para vencer todos os obstáculos dessa vida; você é meu chão e meu céu. Agradeço por todas as horas que dedicou do seu tempo me auxiliando na realização desse sonho.

Ao meu irmão, Daniel Cavalcanti Vilela, que esteve sempre ao meu lado durante a realização deste trabalho, me oferecendo a ajuda e o incentivo de que eu precisava.

À minha irmã, Aline Cavalcanti de Souza, seu marido Péricles Patrick Pereira da Costa, minha sobrinha Maria Cecília Souza da Costa e aos familiares mais próximos que sempre apoiaram meus sonhos e empreitadas, por nunca me deixarem desistir sem tentar e por acreditarem no meu potencial.

À minha tia, Andreia Braz, revisora de textos perspicaz e bem-conceituada, que dedicou várias horas do seu tempo disponível à leitura e revisão dos textos desta dissertação e que sempre acompanhou com entusiasmo os meus êxitos escolares.

À minha avó materna, Terezinha Cavalcanti da Silva, que amo incondicionalmente, que sempre rezou pelo meu sucesso e me dedicou sábias palavras, dando-me o suporte emocional de que precisei.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelo apoio, ao Laboratório de Estudos da Madeira (LABEM), e à Escola Agrícola de Jundiá (EAJ), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC/UFRN), à Universidade de Coimbra (UC – Portugal), na pessoa do professor Doutor Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias, meu coorientador, que tão bem me recebeu na cidade de Coimbra, para intercâmbio acadêmico; e à minha orientadora que me guiou durante essa jornada, professora Doutora Edna Moura Pinto.

Agradeço, também, aos arquitetos Roberta de Souza Lobão e André Barbosa Lima da Silva, pelas importantes contribuições dadas à projeção da estrutura, à graduanda em arquitetura da UFRN Yane Kaline Santos Lopes, que trabalhou na organização, texto e diagramação do Manual de Construção da Dunas Gridshell, ao empresário e presidente do Instituto de Inovação e Sustentabilidade, Elton Cavalcante Barbosa, que doou a madeira para a construção e ajudou em várias etapas, e ao professor Doutor Júlio Cesar Molina, da Faculdade de Engenharia da Unesp/Itapeva, pesquisador associado ao SET/EESC/USP e à FEG/Unesp, pela videoconferência feita para os voluntários do Workshop de montagem da malha.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Lista de Quadros .....</b>	<b>xxiv</b>
<b>Lista de Equações .....</b>	<b>xxv</b>
<b>Lista de siglas, abreviaturas e símbolos .....</b>	<b>xxvi</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>28</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>28</b>
1.1 Considerações gerais e enquadramento do tema.....	28
1.2 Objetivos da pesquisa .....	31
1.2.1 Objetivo geral .....	31
1.2.2 Objetivos específicos .....	31
1.3 Justificativa.....	32
1.4 Delimitação da pesquisa .....	33
1.5 Metodologia.....	34
1.6 Estrutura do trabalho.....	35
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>37</b>
<b>As estruturas <i>gridshells</i>.....</b>	<b>37</b>
2.1 Histórico das <i>gridshells</i> .....	37
2.2 <i>Gridshells</i> em solo brasileiro .....	44
2.2.1 CASACOR <i>Gridshell</i> .....	45
2.2.2 Carioca Wave <i>Gridshell</i> ou <i>Gridshell Onda Carioca</i> .....	46
2.2.3 <i>Gridshell Bambu Carbono Zero</i> .....	48
2.3 As estruturas <i>gridshell</i> e as diferentes configurações de suas camadas .....	50
2.4 Métodos construtivos .....	52
2.4.1 Metodologia construtiva das <i>gridshells</i> “pós-formadas” .....	53
2.4.2 Metodologia construtiva das <i>gridshells</i> “pré-formadas” .....	62

2.5 Tipos de ligação .....	63
2.6 Forças atuantes e travamentos .....	65
2.7 Projetos inspiradores.....	68
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>75</b>
<b>Metodologia.....</b>	<b>75</b>
3.1 Coleta das informações.....	75
3.2 Triagem do material .....	78
3.3 Indicadores analisados.....	79
3.3.1 Evolução do número de publicações ao longo dos anos .....	79
3.3.2 Publicações por país .....	80
3.3.3 Publicações por instituição .....	81
3.4 Fases da pesquisa .....	82
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>85</b>
<b>Dos modelos à mão livre aos computacionais .....</b>	<b>85</b>
4.1 Definição da geometria .....	85
4.2 Divisão da estrutura em módulos .....	86
4.3 Definição das furações e descrição das ligações escolhidas.....	87
4.4 Estudos preliminares da forma.....	91
4.5 Definição dos softwares e suas características.....	92
4.5.1 3DS MAX®.....	93
4.5.2 UNREAL ENGINE 4 .....	94
4.6 Modelagem .....	94
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>97</b>
<b>Modelos físicos e processo <i>form-finding</i>.....</b>	<b>97</b>
5.1 Análise da forma por meio de modelo inicial .....	97
5.2 Adequações e melhorias do projeto .....	98
5.3 Montagem da maquete em escala .....	99
5.3.1 Passo a passo da montagem da maquete .....	99

5.3.2 Processo <i>form-finding</i> .....	104
5.3.3 Defeitos observados após a flexão .....	105
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>107</b>
<b>Avaliação teórica e experimental .....</b>	<b>107</b>
6.1 Madeiras escolhidas para a construção .....	107
6.1.1 <i>Pinus elliottii</i> Engelm. ....	107
6.1.2 Eucalipto tratado .....	112
6.2 Encurvamento da malha .....	114
6.2.1 Passo a passo do primeiro ensaio .....	116
6.2.2 Segundo ensaio .....	119
6.2.3 Terceiro ensaio.....	123
6.3 Defeitos das madeiras.....	126
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>128</b>
<b>Construção da <i>gridshell</i>.....</b>	<b>128</b>
7.1 Corte das peças .....	128
7.2 Descarte de peças com grandes defeitos .....	130
7.3 Marcação e furação das peças .....	131
7.4 Preparativos que antecederam a construção .....	134
7.5 Montagem da Dunas Gridshell.....	135
7.5.1 Primeiro dia .....	136
7.5.2 Segundo dia .....	140
7.5.3 Do terceiro dia até a curvatura prevista e seu travamento .....	143
7.6 Execução da fundação.....	148
7.7 Confecção das conexões metálicas .....	152
7.8 Acomodação da <i>gridshell</i> sobre os pilares.....	154
7.9 Medição dos arcos finais e pintura da <i>grid</i> .....	158
7.10 Estimativa de peso da <i>gridshell</i> .....	159
7.11 Tempo de execução da <i>grid</i> .....	160

7.12 Estimativa de custos da montagem da <i>gridshell</i> .....	163
7.13 Fechamento do capítulo .....	164
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>167</b>
<b>Considerações finais .....</b>	<b>167</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>170</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Trio Gridshell - Cobertura do Restaurante Masseria Ospitale. Lecce, Itália, 2010. ....	30
Figura 2.1 – Projeto de cobertura de pátio fabril na cidade de Vyksa, Rússia. Arquivo da Academia Russa de Ciências.....	37
Figura 2.2 – Ilustração do pátio fabril da Vyksa Steel Works em funcionamento por volta de 1900.....	38
Figura 2.3 – Estado de conservação da Vyksa Steel Works <i>gridshell</i> em 2011 (a); Parte da estrutura do telhado ainda preservada (b); Estrutura totalmente à mostra com camada final de cobertura já inexistente em vários pontos (c); Partes da cobertura remanescente a serem recuperadas (d). ....	39
Figura 2.4 – Linha do tempo de importantes estruturas <i>gridshells</i> construídas com emprego de flexão ativa. ....	41
Figura 2.5 – Pishwanton, East Lothian, Reino Unido. Modelos em escala reduzida da malha projetada (a, b, c); Grade pronta, construída na horizontal (d); Malha posicionada sobre as paredes de pedra (e); Cobertura sobre a malha já instalada (f); Estrutura interna oferecendo sustentação à cobertura (g); Edifício com cobertura finalizada e relva posta no topo (telhado verde) (h). ....	43
Figura 2.6 – Pavilhão brasileiro no CASACOR SP (a); Detalhes construtivos da estrutura de sustentação da malha (b); Detalhes da malha com a presença de furos alongados e camada adicional de travamento na horizontal (c, e, f); Cobertura plástica aplicada com vegetação no topo (paisagismo) (d). ....	45
Figura 2.7 – CASACOR <i>Gridshell</i> iluminada durante a noite. Vista externa (a) e <i>grid</i> vista internamente (b).....	46
Figura 2.8 – Carioca Wave Gridshell.....	47
Figura 2.9 – Projeto de reforma das instalações do CasaShopping.....	47
Figura 2.10 – Fabricação de viga da borda (a) e nó com membros da grade já fixados (b).....	48
Figura 2.11 – Telhado de <i>gridshell</i> em bambu em construção (a) e maquete da <i>Gridshell</i> Bambu Carbono Zero (b). ....	49

Figura 2.12 – Obra em execução em seus estágios finais (a) e equipe empenhada nos detalhes finais da execução (engenheiro Alan Dias, à frente, e Equipe de Arquitetura Gera Brasil) (b).....	49
Figura 2.13 – Downland Gridshell, Sussex, Reino Unido (2002). Estrutura em construção (a) e finalizada (b). .....	51
Figura 2.14 – Grade de camada única (a) e grade de duas camadas (b). .....	51
Figura 2.15 – Detalhes das peças de conexão e componentes do telhado do Castelo Chiddingstone, Reino Unido (a) e cobertura finalizada (b).....	52
Figura 2.16 – Processo construtivo do imponente Museu Downland Gridshell, Reino Unido. Grade pronta apoiada sobre andaimes (a); Torres de elevação nas bordas externas da grade (b); Torres de elevação internas e passarela para movimentação dos trabalhadores abaixo da malha (c); Aperto de elemento de conexão/ligação das camadas da malha (d); Malha no início do processo de encurvamento (e); Ajuste das torres de elevação (f); Encurvamento em estágio avançado (g); Malha na posição final (h).....	54
Figura 2.17 – Trio Gridshell – Estrutura “pós-formada” construída em Lecce, Itália. Montagem da malha (a); Maquete da estrutura (b); Cobertura pronta vista de dentro (c); Montagem da estrutura da malha em estágio inicial (d); <i>Gridshell</i> parcialmente pronta (e); Malha finalizada vista externamente (f); Detalhes da cobertura da grade elástica (g).....	55
Figura 2.18 – Processo de elevação de <i>gridshell</i> por meio do emprego de membrana inflável. Malha pronta (retrátil) (a); Posicionamento da malha sobre a membrana (b); Início do processo de inflagem da membrana (c); Membrana parcialmente inflada (d); Membrana inflada ao máximo (e); Esvaziamento da membrana após elevação da estrutura (f).....	56
Figura 2.19 – O protótipo Airshell erguido com uso de uma membrana inflável. Posicionamento da malha montada sobre a membrana (a); Elevação parcial da estrutura (b); Encurvamento máximo da <i>gridshell</i> (c).....	57
Figura 2.20 – Principais processos construtivos. 1 – <i>PUSH UP</i> (empurrar para cima); 2 – <i>PULL UP</i> (puxar para cima); 3 – <i>EASE DOWN</i> (encurvamento facilitado); 4 – <i>PNEUMATIC FRAMEWORK</i> (estrutura pneumática); 5 – <i>RECESSING / CONSTRAINING</i> (embutindo / restringindo). .....	59

Figura 2.21 – Moving Gridshell (Áustria). Encurvamento da malha com uma de suas extremidades presa a um estrado de madeira (a); Elevação parcialmente completa (b); Elevação e encurvamento concluídos (c); Movimentação da estrutura, fechando e abrindo as unidades que compõem a cobertura (d); .....	61
Figura 2.22 – MyZeil Shopping Center. Vista externa (a) e interna (b) – Estrutura “pré-formada”. Frankfurt, Alemanha, 2009.....	62
Figura 2.23 – (a) Conexão com orifício alongado (esquerda) e (b) conexão de placas de aço e parafusos externos (direita). .....	63
Figura 2.24 – Elemento de ligação/conexão feito com placa de aço galvanizado do Downland Gridshell, Reino Unido.....	64
Figura 2.25 – Tipos de ligação compilados. ....	65
Figura 2.26 – Esforços internos distribuídos em uma célula de casca (a) e em uma célula <i>gridshell</i> (b). ....	66
Figura 2.27 – Antes da rotação das peças lamelares nas articulações (a) e depois da rotação (b). ....	67
Figura 2.28 – <i>Gridshell</i> construída na Universidade de Catania, Itália (2013). Parafuso sextavado usado e ao fundo montagem de módulo (a); Peças instaladas entre as camadas da grade e detalhes construtivos (b); Montagem da primeira camada de um dos módulos (c); Módulo pronto sendo movimentado (d); Parte da equipe envolvida no projeto e ao fundo projeção computacional da estrutura (e); Estrutura sendo molhada no momento da elevação (f); Sargento e peça de madeira usados no suporte a ponto crítico da grade durante encurvamento (g); Aspecto final da estrutura (h)...	68
Figura 2.29 – Workshop Malhas Espaciais de Madeira, na Universidade do Minho, Portugal (2016). Vista superior dos nove módulos sendo montados (a); Uso de material de apoio (manual de montagem) (b); Peças instaladas para posterior amarração da estrutura na posição curvada (c); Grade pronta (d); Estrutura quase finalizada (peças de concreto oferecendo suporte aos pontos de apoio) (e); Aspecto final da <i>grid</i> (f). ....	70
Figura 2.30 – Pavilhão no pátio do Hotel Masseria Ospitale, Lecce, Itália (2009). Montagem dos módulos ainda na oficina (a); Uso de furadeira de bancada na confecção dos furos nas peças (b); Medição e marcação das peças de madeira (c); Detalhe de nós onde as peças se cruzam em dupla camada (d); Montagem parcial da grade (sexto módulo sendo transportado) (e); Conexão das peças nos nós através de	

orifícios alongados (f); Uso de cabo de aço auxiliando o travamento final da grade já curvada (g); Estrutura finalizada e decorada (h). .....	72
Figura 2.31 – Pavilhão “UMass Timber Grid Shell Wood on the Plaza”, EUA (2016). Equipamento para corte das peças (a); Tupia de coluna usada para rasgo dos furos alongados (b); Serra circular de bancada para corte das ripas nos comprimentos desejados (c); Grade pronta sendo içada por guincho (d); <i>Gridshell</i> finalizada (peças de travamento já instaladas) (e). .....	73
Figura 3.1 – Passos metodológicos da coleta de informações (plano detalhado de mapeamento do tema). .....	76
Figura 3.2 – Parte da planilha utilizada para triagem dos artigos. ....	78
Figura 3.3 – Evolução do número de publicações realizadas de 1983 a 2018. ....	79
Figura 3.4 – Artigos feitos pelos países que mais publicam sobre o tema <i>Gridshells</i> . .....	80
Figura 3.5 – Instituições que mais publicaram durante o período coberto pela pesquisa (1983-2018). ....	81
Figura 3.6 – Etapas do projeto. ....	83
Figura 4.1 – Esboço do projeto em AutoCAD® (2016), mostrando as 712 peças em diferentes cores. ....	85
Figura 4.2 – Esboço do projeto em AutoCAD® (2016), mostrando os nove módulos e seus três diferentes tipos. ....	86
Figura 4.3 – Detalhe do nó dos pontos que compreendem duas camadas (a) e vista explodida dessa ligação (b). ....	88
Figura 4.4 – Ligação de continuidade entre módulos com sobreposição de 20,00 cm. ....	88
Figura 4.5 – Conexões com orifício alongado, Siracusa <i>Gridshell</i> . Sobreposição das peças entre módulos com uso de três parafusos unindo-as (a); Interseção das camadas em nó de continuidade, conexão com parafuso de rosca infinita (b); Módulo em montagem, parafusos ainda sem arruelas e porcas (c). ....	89
Figura 4.6 – Interseção entre módulos, junção de continuidade formada por dois parafusos (a); Detalhe das furações alongadas para permitir adaptação da malha no momento de flexão das peças e parafuso ultrapassando todas as peças na ligação (b). Projeto feito no <i>3ds Max</i> ® (2018). ....	90

Figura 4.7 – Tipo de parafuso, arruela e porca selecionados para a montagem dos módulos (a); Comprimentos escolhidos para os parafusos (b); (Especificações: Diâmetro (d) = 6,00 mm; Comp. (L) = variável – 120,00 mm e 150,00 mm); .....	90
Figura 4.8 – Parafuso selecionado para a fixação das peças de travamento da estrutura (Especificações: Parafuso de rosca autoatarraxante; Diâmetro (d) = 4,00 mm; Cabeça: Chata; Fenda: Philips; Comp. (L) = 40,00 mm; Ponta: agulha); Parafuso renderizado (a); Projeto do parafuso (b); Parafuso adquirido (c). .....	91
Figura 4.9 – Primeiras projeções da estrutura após a flexão. Desenho à mão livre demonstrando a curvatura das peças (a); Tentativa de retratar a posição dos arcos (b); Projeção dos apoios (c); Tentativa de projeção usando o software <i>SketchUp</i> (2017) (d).....	92
Figura 4.10 – Exemplos dos dados utilizados para a modelagem; Vista superior da grade feita no AutoCAD® (2016) (a) e planilha Excel (b).....	93
Figura 4.11 – Reunião com grupo de trabalho para discussão de detalhes construtivos. ....	94
Figura 4.12 – Experimentos com a volumetria no <i>3ds Max</i> ® (2018).....	95
Figura 4.13 – (a) Renderização da malha não curvada (esquerda) e (b) renderização de uma das estimativas de curvatura da <i>gridshell</i> (direita). ....	96
Figura 5.1 – Primeira malha feita como modelo inicial. Vista superior com dois apoios no solo (a); Vista superior com três apoios no solo (b); Vista lateral com dois apoios no solo (c); Vista frontal com dois apoios no solo (d). ....	97
Figura 5.2 – (a) Grade plana dividida em nove módulos (esquerda) e (b) grade em 3D mostrando suas duas camadas (direita). ....	98
Figura 5.3 – (a) Lacs plásticos (esquerda) e (b) palhas de coqueiro (direita). ....	99
Figura 5.4 – (a) Seleção dos palitos de coqueiro; (b) Marcação das peças já cortadas. ....	100
Figura 5.5 – Detalhes das conexões feitas com lacs e montagem dos módulos. Primeiros passos para montagem de um módulo (a); Confeção gradativa das ligações (b, c); Módulo visto lateralmente (d); Maquete de módulo sendo comprada ao projeto (e); Módulo finalizado (f).....	100
Figura 5.6 – Largura da trama.....	101
Figura 5.7 – Todos os módulos do tipo A prontos (a); Detalhes da trama e dos pontos de ligação (b).....	101

Figura 5.8 – Resultado final da grade (a); Detalhes construtivos nas ligações entre módulos (b); Perfeito alinhamento das peças conectadas (c). .....	102
Figura 5.9 – Sistema de tração feito com barbantes para simulação do processo construtivo e avaliação da curvatura da malha fletida (início do processo <i>form-finding</i> ). .....	103
Figura 5.10 – (a) Detalhes das presilhas de suporte da grade (esquerda) e (b) <i>grid</i> sustentada apenas por dois apoios durante flexão total da trama (direita). .....	103
Figura 5.11 – Modelo físico simplificado da malha a ser construída na sua forma final. Vista superior da maquete (a); Vista frontal da maquete (b); Medição de um dos arcos de entrada da <i>grid</i> , apresentando 12,00 cm de altura (c); Medição da distância entre os apoios, apresentando 30,00 cm de comprimento (d). .....	104
Figura 5.12 – Pressão excessiva nas ligações entre módulos (a); Quebras de elementos nesses pontos (b); Deslocamento dos elementos de conexão (arames) em virtude da pressão exercida pelos palitos (representando as ripas) (c). .....	105
Figura 5.13 – Largura da trama internamente, medindo 3,1 cm (a) em comparação com a largura da trama na união dos módulos, medindo 3,6 cm (b).....	106
Figura 6.1 – Maquete da malha projetada (a) e estimativa de curvatura da <i>gridshell</i> feita no <i>3ds Max®</i> (2018) (b).....	114
Figura 6.2 – Conjuntos a serem mais fletidos. ....	115
Figura 6.3 – Conjunto projetado para teste de flexão.....	116
Figura 6.4 – Projeto de cada peça do conjunto a ser ensaiado (peça roxa – quadrado com 5,00 cm de lado criado apenas para o teste (a), peça laranja com 2,20 m de comprimento (b) e peça verde com 1,47 m de comprimento (c)) e peças já confeccionadas (d). .....	117
Figura 6.5 – Conjunto sendo montado para o ensaio (a) e umedecimento das peças (b). .....	118
Figura 6.6 – Arco no processo de curvatura, passo a passo do primeiro ensaio. Arco posicionado para início do ensaio (a); Umedecimento do conjunto (b); Início do encurvamento (c); Peças centrais apresentando primeiros sinais de rompimento (d); Ripas centrais bastante comprometidas, prestes a romper (e); Ripas centrais já rompidas (f); Ponto da quebra, fibras da madeira rompidas (g); Vista superior do ponto de rompimento após retirada do carregamento (h); Vista lateral do ponto de rotura após relaxamento das tensões (i). .....	119

Figura 6.7 – Peças com furos alongados uniformizados com 4,00 cm. Peça laranja com 2,20 m de comprimento (a) e peça verde com 1,42 m de comprimento (b). ...	120
Figura 6.8 – Um dos barrotes selecionados. ....	120
Figura 6.9 – Abertura dos rasgos nas ripas de pinus. Uso de tupa manual e manuseio da máquina em paletes sobre bancada (a); Revezamento do trabalho para prevenção de acidentes (b).....	121
Figura 6.10 – Segundo ensaio. Ponto considerado frágil pela equipe (a); Conjunto já bastante tensionado (b); Ponto de quebra do arco ensaiado, vista frontal e inferior (c); Posição da rotura em relação ao conjunto (d); Vista posterior e superior da rotura (e); Análise da rotura pelos participantes, observando que as peças romperam próximo ao ponto de conexão entre módulos (f). ....	122
Figura 6.11 – Ponto de rotura do arco, próximo ao ponto de ligação entre as peças. ....	123
Figura 6.12 – Último conjunto preparado para ensaio de flexão (a); Umedecimento das peças (b). ....	124
Figura 6.13 – Terceiro ensaio de flexão. Início do tensionamento do conjunto com umedecimento constante (a); Medição da flecha máxima no processo de flexão (b); Pausa para acomodação das fibras da madeira e análise da constância na curvatura (c); Continuação do processo de encurvamento do arco (d); Aplicação de mais tensão com o movimento do braço de alavanca da catraca de carga (e); Posição final do arco, com flexão pretendida alcançada (f). ....	125
Figura 6.14 – Peças de madeira selecionadas visualmente que obtiveram o melhor desempenho.....	126
Figura 7.1 – Componentes da malha diferenciados por cores, tamanhos e modelos de furações. P1 – peça laranja (a); P2 – peça azul (b); P3 – peça goiaba (c); P4 – peça verde (d); P5 – peça vermelha (e); P6 – peça ciano (f); P7 – peça amarela (g); P8 – peça rosa (h). ....	129
Figura 7.2 – Corte das peças e separação delas por tamanho. Corte de todas as tábuas de 15,00 cm de largura em ripas de 5,00 cm (a); Organização, separação e pintura das pontas das peças (b); Ripas aguardando separação e análise de integridade (c); Separação e pintura das demais peças, com a contagem e inclusão de mais ripas para serem cortadas conforme necessidade (d); Peças menores separadas, algumas receberiam furos centrais e outras não seriam furadas (e). ...	130

- Figura 7.3 – Peças descartadas antes da furação em virtude da presença de nós mortos ou soltos. Peça com seção com capacidade de suporte comprometida por presença de vazio (a); Um dos conjuntos descartados (b); Pedaco solto de galho morto (nó solto) (c). ..... 131
- Figura 7.4 – Marcação, corte e furação das peças. Marcação de duas peças simultaneamente com uso de esquadro (a); Furação feita seguindo as marcações através de tupia de coluna (b); Serra tico-tico usada no corte de peças (c); Posicionamento de peças para marcação alinhadas com a peça matriz (d); Marcação da parte que seria fresada com a tupia para acelerar o processo (e); Sargentos usados para prender as peças à bancada e alinhá-las com a peça matriz (f); Furadeira de coluna usada para perfuração das peças que receberam apenas furo central (g); Peças no processo de marcação e ao fundo as ripas a serem marcadas (h); Furadeira de coluna sendo usada para facilitar o trabalho da tupia, fazendo furos nas duas extremidades das marcações (i). ..... 132
- Figura 7.5 – Peças prontas (a, b) e rasgos (furos alongados) feitos com uso de tupia de coluna (c) e furadeira de bancada sendo usada (d). ..... 133
- Figura 7.6 – Alguns dos equipamentos, ferramentas e materiais a serem usados durante a montagem da *grid*. Martelo, cinta esticadora, arruelas, chave de boca e cordas (a); Roldana e cordas (b); Catracas manuais (guincho tipo tifor) (c); Serra circular e discos de corte (d); Capacetes de proteção (e); Luvas (EPI) (f); Parafusos separados (g); Parafuso, porca e arruelas (h). ..... 134
- Figura 7.7 – Imagens de parte do conteúdo do *Manual de Construção da Gridshell*. Manuais prontos (a); Capa e ficha técnica (b); Descrição das peças dos módulos A e da montagem do módulo B1(c); Indicação de união dos módulos e posição dos travamentos (d). ..... 135
- Figura 7.8 – Módulos que receberam as peças de madeira selecionadas como melhores. Módulos do tipo A (a) e módulos do tipo B (destaque das peças a serem mais solicitadas nos trechos de acordo com as análises) (b). ..... 136
- Figura 7.9 – Separação das peças por cor e tamanho (a, b); Separação das peças por módulo (c); Montagem do módulo C (d). ..... 137
- Figura 7.10 – Módulo C sendo inspecionado e seus parafusos, arruelas e porcas sendo instalados (a); Conjunto com três módulos (2,00 x 2,00 metros cada) sendo posicionado antes da conexão (b); Grade em evolução (c); Último módulo sendo

construído e posicionado na grade (d); Todos os módulos prontos posicionados lado a lado (e); Os três conjuntos com três módulos prontos sendo posicionados para a união final.....	138
Figura 7.11 – Conjuntos de módulos sendo unidos (a, b); Peças com furos alongados em níveis diferentes mostrando encaixe como projetado (c); Conjunto de ligações de parafusos em par já concluídas (d); Ligações de continuidade sendo feitas entre os outros módulos (e); Vista lateral de ligação de continuidade concluída (f).....	138
Figura 7.12 – Detalhe das ligações de continuidade com peças intercaladas em dupla camada (a); Parafusos afetados pelo atrito com o pavimento (b); Encaixe das arruelas e porcas nos parafusos (c).....	139
Figura 7.13 – Grade pronta ao final do primeiro dia de Workshop. Vista de um dos apoios da grade (a); Grande completa com calços em sua parte central (b); Vista lateral da malha onde se percebe leve curvatura (c).....	140
Figura 7.14 – Parafusos sendo folgados para retirada de peças avariadas (a); Substituição de peça no módulo B2 inferior (b); Parte de peça quebrada (c); Peça com nó morto e seção fragilizada (d); Peça que sofreu rotura em ponto de rasgo alongado onde se tinha presença de nó (e); Substituição de peça danificada no módulo C (central) (f).....	141
Figura 7.15 – Peças substituídas em virtude de avarias indicadas por setas vermelhas. ....	142
Figura 7.16 – Início do encurvamento com uso do guincho (a); Instalação dos andaimes (b) e pontaletes de madeira (c).....	142
Figura 7.17 – Substituição do sistema de apoio (a); Alças de içamento sendo retiradas e caminhão <i>munck</i> sendo liberado (b); Substituição concluída (c).....	143
Figura 7.18 – Tracionamento das cordas por meio de catraca de cargas (a); Terceiro dia de montagem (b); Encurvamento da estrutura ao longo dos dias (c, d, e, f). ....	144
Figura 7.19 – Troca da catraca após atingir limite de tracionamento (a); Folga de parafusos (b); Parte de elemento quebrado ao longo do tracionamento (c). ....	145
Figura 7.20 – Grade içada e apoios sendo retirados (a); Malha sem apoios e suspensa pelo guincho (b); Aumento dos apoios com adição de um nível a mais de andaimes (c); Guincho liberado e estrutura apoiada apenas pelos andaimes (d). ....	146

- Figura 7.21 – Acentuação da curvatura ao longo dos últimos dias de tracionamento. Estrutura molhada e sendo curvada (a); Finalização de dia de trabalho já no período da noite (b); Posição final (c)..... 147
- Figura 7.22 – Modelo explicativo para alocação das peças de travamento. .... 147
- Figura 7.23 – Peças de travamento da grade sendo instaladas (a); Travamento de um dos lados concluído (b); Configuração final da malha após travamento (c). .... 148
- Figura 7.24 – Croqui da fundação (a); Marcação do gabarito e *gridshell* ao fundo (b). .... 149
- Figura 7.25 – Escavação das valas para execução dos blocos de concreto (a); Conjunto de estacas sendo unidas (contraventadas nas diagonais) (b); Centralização dos pilares no local escavado (c). .... 150
- Figura 7.26 – (a) Croqui das peças de travamento perpendiculares às toras; (b) Croqui dos contraventamentos. .... 150
- Figura 7.27 – Processo de execução da fundação. Colocação da fôrma nivelada no buraco escavado (a); Colocação das toras de eucalipto contraventadas dentro da fôrma (b); Concretagem das toras já niveladas (c); Umedecimento do concreto para melhorar o processo de cura (d); Retirada da fôrma (e); Colocação de elementos de travamento perpendicular às toras (f); Solo sendo compactado sobre o bloco de fundação (g); Uso de constante molhagem na compactação (h). .... 151
- Figura 7.28 – (a) Nivelamento dos pilares de madeira; (b) Lixamento dos topos e nova pintura. .... 152
- Figura 7.29 – Modelos iniciais das conexões em papelão (a) e metal (latão) (a, b, c). .... 153
- Figura 7.30 – Terceiro modelo de conexão sendo testado. Vista do encaixe projetado para fixação das toras (a); União das peças por meio de parafuso, permitindo rotação (b); Peça encaixada em pilar de eucalipto (c, d). .... 153
- Figura 7.31 – Conexões metálicas em fabricação (a); Parafuso de 12,00 mm usado para conectar a malha às hastes de metal (b); Parafuso de 8,00 mm conectando as duas partes da peça fabricada (c). .... 154
- Figura 7.32 – Processo de fixação da *grid* nos pilares. Umedecimento e colocação das fitas de içamento na malha (a); Içamento iniciado e retirada dos andaimes de apoio (d); Estrutura no início da movimentação (c, d, e, f); Estrutura ainda elevada sendo

aproximada dos pilares de fundação (g, h, i, j); Estrutura sobre os pilares de fundação começando a ser fixada (k,l). .....	155
Figura 7.33 – Encaixe e fixação das conexões com parafusos de 8,00 mm. Parafusamento da conexão no pilar de eucalipto (a); Furação de tora para facilitar parafusamento (b); Aproximação forçada da <i>grid</i> ao elemento de fundação (c); Conexão de um dos apoios concluída (d); Barrotes e cordas auxiliando no processo de aproximação das peças (e). .....	156
Figura 7.34 – Encaixe e fixação das últimas conexões (a); Umedecimento da grade (b); Remoção das cintas do guincho (c). .....	157
Figura 7.35 – <i>Gridshell</i> finalizada em diferentes ângulos. ....	157
Figura 7.36 – Medição dos arcos de entrada da Dunas Gridshell. Processo de medição (a); Flecha e distância entre apoios do arco da entrada 1 (b); Medidas dos arcos das entradas 2 e 3 (c); Medidas do arco 4 (d). .....	158
Figura 7.37 – Pintura da Dunas Gridshell. Processo de pintura com pistola pulverizadora e compressor (a); Pintura manual com pincel (b); Processo em andamento (c). .....	159

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação das principais características de algumas das <i>gridshells</i> mais imponentes já construídas. ....	40
Tabela 4.1 – Descrição das 712 peças a serem fabricadas. ....	87
Tabela 6.1 – Propriedades da espécie pinus .....	108
Tabela 7.1 – Medidas e quantidades de cada tipologia das peças. ....	128
Tabela 7.2 – Planilha orçamentária da construção. ....	164

## Lista de Quadros

Quadro 6.1 – Valores médios de madeiras coníferas nativas e de florestamento...	110
Quadro 6.2 – Valores médios de madeiras dicotiledôneas nativas e de florestamento. .....	113
Quadro 7.1 – Estimativa de peso da malha.....	160
Quadro 7.2 – Tempos mensurados durante todas as fases de construção. ....	161
Quadro 7.3 – Resumo das Horas Homem Trabalhadas (HHT) por profissional.....	162
Quadro 7.4 – Custos estimados da mão de obra para montagem, elevação e travamento da malha baseados nas HHT. ....	163

# Lista de Equações

(Equação 6.1).....	110
--------------------	-----

## Lista de siglas, abreviaturas e símbolos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

CCA – Cobre, Cromo e Arsênio

EAJ – Escola Agrícola de Jundiaí

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos da USP

FEG – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Unesp

HHT – Horas Homem Trabalhadas

IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LABEM – Laboratório de Estudos da Madeira da UFRN

MDF – *Medium Density Fiberboard*

MLC – Madeira Laminada Colada

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MPB – Música Popular Brasileira

NBR – Normas Brasileiras

OSB – *Oriented Strand Board*

PEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRN

PRFV – Polímero Reforçado com Fibra de Vidro

RN – Rio Grande do Norte

SET – Departamento de Engenharia de Estruturas da USP

SINAPI – Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil

UC – Universidade de Coimbra

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UMass – Universidade de Massachusetts Amherst

Unesco – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

Unesp – Universidade Estadual Paulista

Unicamp – Universidade Estadual de Campinas

USP – Universidade de São Paulo

## CAPÍTULO 1

# Introdução

### 1.1 Considerações gerais e enquadramento do tema

As realizações e construções feitas ao longo da história da humanidade refletem a cultura dos povos, sua religiosidade, sua forma de organização geográfica e seu poderio tecnológico e científico. Logo, não se trata apenas da confecção de objetos, utensílios e abrigos. Os romanos, os egípcios, os gregos e os incas são algumas das civilizações que deixaram um expressivo legado arquitetônico para as gerações atuais.

De acordo com Pinto, Albuquerque e Silva (2014), a utilização da madeira de forma efetiva como material construtivo teve seu início com o surgimento dos primeiros humanos na terra, concretizando-se no período chamado de Neolítico. Portanto, ao longo do tempo as técnicas relacionadas ao uso da madeira foram sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas. Prova disso são hieróglifos egípcios que descrevem o corte e a laminação da madeira, datados do período da terceira dinastia (2686-2613 a.C.). As civilizações do Leste Asiático também nos legaram importantes realizações com uso desse material, como, por exemplo o complexo japonês denominado *Horyu-ji*, patrimônio histórico da humanidade tombado pela Unesco, e considerado a estrutura inteiramente em madeira mais antiga do mundo (PINTO; ALBUQUERQUE; SILVA, 2014). Séculos separam essas construções da atualidade. Avanços tecnológicos foram alcançados desde então, em resposta à contínua demanda por inovação e aperfeiçoamento.

Nessa perspectiva, pode-se entender as estruturas *gridshell* como resposta a essas demandas, particularmente como uma opção para realização de coberturas de grandes espaços internamente livres de interferências. Com estética não convencional e aliada à resistência estrutural, o sistema resulta na criação de formas curvas totalmente inéditas do ponto de vista arquitetônico (CARVALHO, 2015).

A palavra *gridshell* descreve uma estrutura reticulada, podendo ser traduzida do inglês como casca ou concha em forma de grelha. Essas estruturas são projetadas para serem construídas com os mais diversos materiais, tais como: compósitos (polímero reforçado com fibra de vidro), metais (aço e alumínio), papelão (tiras ou tubos) e madeira (diversas espécies). Ela pode ser aplicada em coberturas de grandes vãos, sendo seu diferencial o uso reduzido de material (KUIJVENHOVEN, 2009). Isso é possível por meio da união de sarrafos segmentados formando um reticulado. As *gridshells* podem atender satisfatoriamente ao atual paradoxo de construir mais com menos recursos, enfrentado pelas atuais gerações de arquitetos, engenheiros e construtores (AEC). Ou seja, as imponentes estruturas *gridshell* podem ser construídas com uma quantidade mínima de matéria-prima. Essas características tornam esse sistema uma boa opção para a arquitetura de galpões, estações de trem ou ônibus, hangares de aeroportos, ginásios poliesportivos, entre outros que necessitam de grandes vãos livres de pilares. Porém, não se exclui o uso da técnica em ambientes pequenos como pergolados e varandas.

No Brasil, essas estruturas ainda são pouco conhecidas ou estudadas, havendo um número maior de construções no exterior. Carvalho (2015) destaca que nos últimos dez anos o número de estruturas construídas com a técnica tem aumentado, assim como o interesse dos pesquisadores pelo tema, o que segundo esse autor é comprovado pelo crescimento das publicações sobre o assunto. Esses trabalhos são bem variados e descrevem novos métodos de análise estrutural das grades (avaliação de desempenho), uso de softwares de projeto, técnicas construtivas, entre outros.

Como pode ser constatado na Figura 1.1, as obras possuem apelo estético, podendo assumir diferentes formas e atuar simultaneamente como cobertura e paredes (vedações), tal qual uma concha, onde não há distinção entre telhado e divisórias. Os mais variados tipos de madeira podem ser usados na construção, sendo essencial conhecer suas propriedades físicas, tais como: umidade, densidade, retratibilidade e resistência ao fogo; e suas propriedades mecânicas: limite de resistência à compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, tração perpendicular (normal) às fibras; cisalhamento; módulo de elasticidade; entre outros. Até mesmo derivados de madeira são usados como

matéria-prima, como é o caso do OSB (*Oriented Strand Board*) e do MLC (Madeira Laminada Colada).

Figura 1.1 – Trio Gridshell - Cobertura do Restaurante Masseria Ospitale. Lecce, Itália, 2010.



Fonte: Lancia (2013).

Desde a primeira aparição, em 1898, essas estruturas vêm sendo aperfeiçoadas, tanto no que se refere aos processos de análise e dimensionamento estrutural, concepção arquitetônica e materiais empregados, como no processo de construção. Este último é alvo de interesse desta pesquisa, em face da exiguidade de informações sobre os processos a serem considerados na montagem ou construção de tais estruturas em nosso país; e base para formular a questão central (problema) deste trabalho: “Como construir uma estrutura *gridshell* em madeira que atenda a requisitos técnicos e estéticos usando recursos de fácil acesso e baixo custo?”.

Era pretendido também que a escolha do sistema construtivo *gridshell* pudesse influenciar na melhoria da visão negativa construída sobre a madeira na região ao longo dos anos. Isso ocorreria a partir dos resultados positivos obtidos, ou seja, a construção deveria ser realizada de modo a garantir sua estabilidade. Para desmistificar o uso da madeira como principal material construtivo de uma obra ao ar livre, este trabalho de pesquisa buscou criar um projeto de *gridshell* de pequeno porte, que atendesse a requisitos de segurança (malha com estabilidade estrutural e

protegida de fatores externos agressivos) fazendo uso de recursos madeireiros de baixo custo encontrados no mercado regional.

## 1.2 Objetivos da pesquisa

### 1.2.1 Objetivo geral

Descrever e avaliar o processo construtivo de uma cobertura *gridshell* pós-formada em madeira a ser executada no âmbito desta dissertação.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para se atingir o fim pretendido, foi necessário um conjunto de ações propostas para encontrar a solução do problema em questão. De forma específica, foram objetivos do presente trabalho:

- Catalogar realizações construtivas de estruturas *gridshell* que contribuam para o entendimento do processo construtivo e ofereçam apoio para o projeto da estrutura aqui proposta;
- Avaliar o tempo de execução das etapas envolvidas;
- Avaliar os custos envolvidos no processo;
- Confeccionar uma maquete da *grid* criada para prever possíveis problemas de ordem técnica a serem enfrentados ao longo da construção do projeto em escala real;
- Construir *mockups* (modelos em escala real do projeto) para avaliação do comportamento das peças de madeira e suas conexões do ponto de vista da estabilidade durante a curvatura e da integridade após o relaxamento das tensões;
- Sistematizar o processo de construção e executar o projeto da *gridshell*, registrando todas as estratégias de execução.

### 1.3 Justificativa

O sistema *gridshell* é pouco estudado no Brasil, sendo encontradas poucas estruturas em solo nacional utilizando-o e feitas em madeira. Acredita-se que a estrutura desenvolvida ao longo desta dissertação seja a primeira da região Nordeste do Brasil para fins acadêmicos, dentre as que se tem registro no país, considerando estruturas em madeira, aço ou outro material. A realização deste trabalho se justifica por considerar as potencialidades de utilização do sistema com o uso de madeira com pequena e média dimensão na resolução de conflitos relativos à escolha de métodos construtivos que possam cobrir desde pequenos vãos até grandes extensões sem o uso de pilares intermediários.

A literatura aponta para a distinção de duas classes de *gridshell* que terão como consequência um diferencial em seus métodos construtivos: (i) *gridshells* pré-formadas ou rígidas e (ii) pós-formadas ou elásticas, sendo essa última classe adotada para realização deste trabalho, que faz uso de elementos lineares dispostos em forma de uma grade, submetidos posteriormente à flexão.

As *gridshells* pré-formadas são construídas a partir de elementos já processados e montados na forma final na malha. Já as particularidades das *grids* elásticas promovem a economia de tempo na produção dos elementos e geram um custo menor, quando comparado com o método que requer peças com curvaturas predefinidas. Isso ocorre em virtude do emprego de mais equipamentos, ferramentas e materiais para a produção dessas peças. Para manter a estrutura no formato encurvado (flexionada), são empregados cabos de aço ou até mesmo peças diagonais de travamento.

Uma das características desse método é o uso de peças curtas, unidas por conectores metálicos, tais como parafusos, e/ou por peças coladas em *finger joints*, por exemplo. Uma vez que a maior parte das espécies lenhosas comercializadas em Natal possuem comprimento reduzido, aproximadamente três metros, esse sistema construtivo se harmoniza com tal limitação dimensional de mercado.

Cabe salientar ainda que as *gridshells* podem ser deslocáveis, pois permitem a montagem e a desmontagem para serem transportadas a um novo lugar. Elas podem ser executadas rapidamente e com desperdício reduzido de material, sendo essas

vantagens importantes para vencer o atual desafio de mitigar as perdas de matéria-prima na execução de edificações no Brasil.

Além do já exposto, esse sistema estrutural também pode ser classificado como sustentável quando faz uso de madeira proveniente de manejo florestal ambientalmente amigável, ou de florestas plantadas (produzidas para corte). Isso ocorre porque o ciclo de produção dessa madeira auxilia no aprisionamento de CO<sub>2</sub> da atmosfera, e conseqüentemente, ajuda no combate ao aumento do efeito estufa. Além do sequestro de carbono, os plantios florestais possuem algumas importantes funções, tais como: (i) diminuição da pressão sobre florestas nativas; (ii) proteção do solo e da água de mananciais; (iii) reaproveitamento de terras degradadas pela agricultura; (iv) maior homogeneidade dos produtos, facilitando o uso de máquinas na extração e na indústria (SNIF, 2015).

Embora a aplicação do sistema construtivo já seja recorrente, a elaboração e execução do projeto concebido no âmbito desta dissertação é singular, pois a *grid* proposta é baseada em uma realidade e demanda locais. Portanto, nesse sentido, o trabalho descortina soluções adotadas por outros realizadores somadas com aquelas desenvolvidas nesse caso específico.

Observa-se que as vantagens desse sistema apontadas pela literatura, tais como a eficiência estrutural, reduzido tempo de execução e baixo consumo de matéria-prima, incentivam seu estudo e potencializam a viabilidade do uso de madeiras regionais (como as espécies da Caatinga) na aplicação em malhas reticuladas, abrindo assim um novo rol com diferentes possibilidades de abordagens para trabalhos científicos.

#### **1.4 Delimitação da pesquisa**

A partir das buscas realizadas durante a fase de enquadramento do tema, foi possível constatar diferentes abordagens das *grids* na engenharia civil. Há pesquisas que se voltam a simulações e a análises computacionais com foco no comportamento estrutural, por vezes com a construção de modelos paramétricos, mas em sua maioria

a descrição do processo construtivo não é evidenciada, uma vez que não é o foco do trabalho, como se observa em Caffarello (2016).

Uma segunda abordagem envolve modelos paramétricos e avaliação do comportamento estrutural através de modelos numéricos, tendo como norte a construção de protótipos em escala real, como se verifica em Barroso (2016). Entretanto, os detalhes construtivos não são novamente o foco da pesquisa e a etapa construtiva é apresentada de forma generalista.

Analisando o conteúdo de artigos científicos também foi possível identificar uma terceira abordagem caracterizada pela construção de conhecimento com base em objetos já construídos ou protótipos, na qual o trabalho descreve o método de montagem da estrutura sem maiores detalhamentos do processo construtivo. Outros descrevem protótipos de considerável dimensão ou análises estruturais com base em objetos construídos, porém com menor ênfase em detalhamentos, como, por exemplo, em Helbig, Giampellegrini e Oppe (2014).

Com base nessas constatações, esta dissertação se delimita a realizar um estudo apoiado na descrição e análise de uma cobertura de madeira, dentro do entendimento das etapas envolvidas e desenvolvidas durante o processo de construção dessa estrutura. Desse modo, foram excluídas abordagens e análises sobre o comportamento estrutural ou processos de projeto que envolvam esse objeto de estudo. Afinal, esta pesquisa versa sobre a compreensão do sistema sob seu enfoque construtivo, pouco abordado.

## **1.5 Metodologia**

Esta investigação caracteriza-se como um trabalho de abordagem qualitativa e de natureza aplicada, uma vez que se destina a elucidar questões específicas com método indutivo no qual as generalizações procedem da observação de uma realidade concreta que se desenvolve no âmbito exploratório (SILVA; MENEZES, 2005).

O procedimento técnico engloba a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. O primeiro procedimento foi desenvolvido com amparo de artigos científicos, teses, dissertações, livros e consultas às normas da Associação Brasileira de Normas

Técnicas (ABNT). Além da pesquisa bibliográfica simples (largamente difundida), foi executada no âmbito deste trabalho um mapeamento sistemático da literatura de forma ampliada (*Systematic Mapping Study*). Com base nesse estudo, foi possível inferir que ainda existem poucos pesquisadores brasileiros publicando sobre o tema e não foram identificadas obras construídas com o uso desse sistema estrutural no Nordeste brasileiro, o que torna este trabalho pioneiro. Portanto, esta dissertação busca iniciar as pesquisas sobre o tema *gridshell* na tentativa de preencher a lacuna do conhecimento ligada ao processo construtivo empregado para construção dessas estruturas.

O segundo procedimento foi amparado no estudo das construções já executadas com esse sistema estrutural. Assim, esse passo pôde oferecer bases para a confecção do fenômeno a ser descrito enquanto objetivo desta pesquisa, o processo construtivo de uma *gridshell*. Complementarmente, foram adotados métodos descritos em trabalhos análogos, tal como o uso de maquetes e *mockups*, conforme como descrito por Barroso (2016) e Lance (2013).

## 1.6 Estrutura do trabalho

Para o desenvolvimento dessa investigação a teoria foi confrontada com os problemas reais de ordem prática encontrados ao longo da execução de todas as fases do projeto. Esta dissertação é composta por oito capítulos que se dividem em várias seções e subtópicos. Cada capítulo traz um tema de relevância que oferece bases para a realização da estrutura ao final do trabalho. Este primeiro capítulo se dedica à introdução, iniciando com o enquadramento do tema e seguindo com a formulação do problema de pesquisa, dos objetivos, da justificativa, da metodologia, da delimitação da abrangência do trabalho e da estrutura deste.

O segundo capítulo trata do estudo e descrição das estruturas *gridshells* já executadas. Esse capítulo traz tópicos relativos aos detalhes construtivos como número de camadas das malhas, metodologias de elevação, tipos de ligação utilizadas na fixação dos elementos e como ocorre a distribuição das cargas que agem nas peças.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia empregada no trabalho, detalhando como foi executado o mapeamento sistemático da literatura a respeito do tema e mostrando alguns indicadores analisados diante dos dados colhidos. Além disso, as diversas fases da pesquisa são descritas de maneira cronológica. Os demais capítulos abordam a idealização, a concepção do projeto, as formas de representação, a validação deste através das análises e dos ensaios experimentais realizados e a construção da *gridshell*.

O quarto capítulo expõe os modelos computacionais criados ao longo do processo de idealização e concepção do projeto, apresentando a definição da geometria, a divisão da estrutura em módulos, a definição das furações e a descrição das ligações escolhidas, o desenho arquitetônico e a modelagem final do projeto com o uso de diferentes softwares. O quinto capítulo foca no desenvolvimento dos modelos físicos e nas melhorias alcançadas através da análise dos módulos da malha.

O sexto capítulo exhibe ensaios experimentais e análises teóricas a respeito do modelo desenvolvido, analisando e comparando os resultados obtidos, de forma a validar as dimensões dos elementos que constituem a malha em estudo. Nesse capítulo também são apresentadas as madeiras a serem utilizadas para a fabricação de todos os elementos da malha e suas fundações.

No sétimo capítulo é exposto todo o processo de construção, desde o corte das peças, a marcação e perfuração dos furos, passando pela montagem da malha até a curvatura prevista. Os defeitos e problemas detectados também são expostos, assim como as soluções adotadas para resolvê-los.

O oitavo capítulo exhibe as considerações finais obtidas através da realização desta dissertação, incluindo também a apresentação de algumas propostas para trabalhos futuros a serem desenvolvidos por outros pesquisadores. Ao final do trabalho ainda são apresentadas as referências das obras mencionadas ao longo do texto.

## CAPÍTULO 2

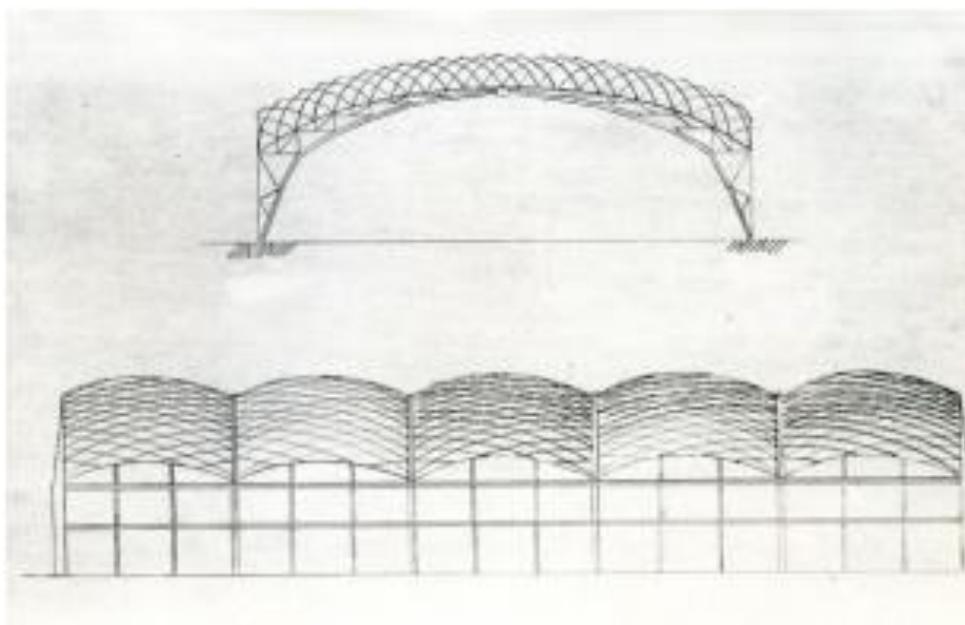
# As estruturas *gridshells*

### 2.1 Histórico das *gridshells*

A primeira estrutura *gridshell* foi projetada pelo russo Vladimir Shukhov. Sua construção foi iniciada em 1897 e concluída em 1898. Shukhov foi um engenheiro que usou métodos de design comparáveis ao design computacional da atualidade (EDEMSKAYA; AGKATHIDIS, 2016).

Por meio de algoritmos matemáticos e princípios observados na natureza, ele criou projetos significativos, como é o caso da cobertura do Vyksa Steel Production Hall (pátio fabril de uma indústria siderúrgica) (Figura 2.1), com largura aproximada de 38,40 metros e comprimento de 73,00 metros (International Database and Gallery of Structures, 2010).

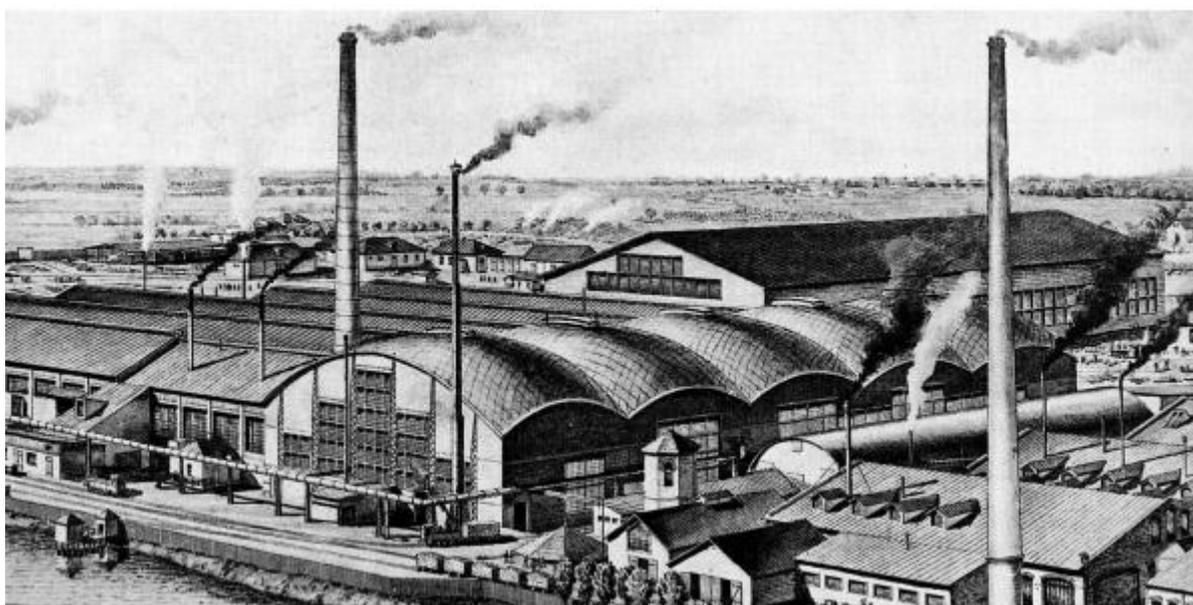
Figura 2.1 – Projeto de cobertura de pátio fabril na cidade de Vyksa, Rússia. Arquivo da Academia Russa de Ciências.



Fonte: Edemskaya e Agkathidis (2016).

Esse galpão é um dos prédios que compõem as vastas instalações da Vyksa Steel Works, fabricante de produtos metalúrgicos, fundada em 1757. Essa *gridshell* foi feita em aço e na direção longitudinal a construção é suportada por seis consoles verticais (elementos estruturais), que estão embutidos nos quadros e conectados aos arcos por tirantes (Figuras 2.2) (BOUHAYA, 2010).

Figura 2.2 – Ilustração do pátio fabril da Vyksa Steel Works em funcionamento por volta de 1900.



Fonte: Beckh e Barthel (2009).

A estrutura é duplamente curvada, sendo a primeira do mundo com aplicação desse sistema estrutural (Figuras 2.2 e 2.3). O edifício foi utilizado até a década de 1980. As últimas informações divulgadas sobre a estrutura reportam que o prédio está em mau estado de conservação e diferentes estratégias de restauração estão sendo discutidas (BECKH; BARTHEL, 2009).

Figura 2.3 – Estado de conservação da Vyksa Steel Works *gridshell* em 2011 (a); Parte da estrutura do telhado ainda preservada (b); Estrutura totalmente à mostra com camada final de cobertura já inexistente em vários pontos (c); Partes da cobertura remanescente a serem recuperadas (d).



Fonte: Arsenyev (2011).

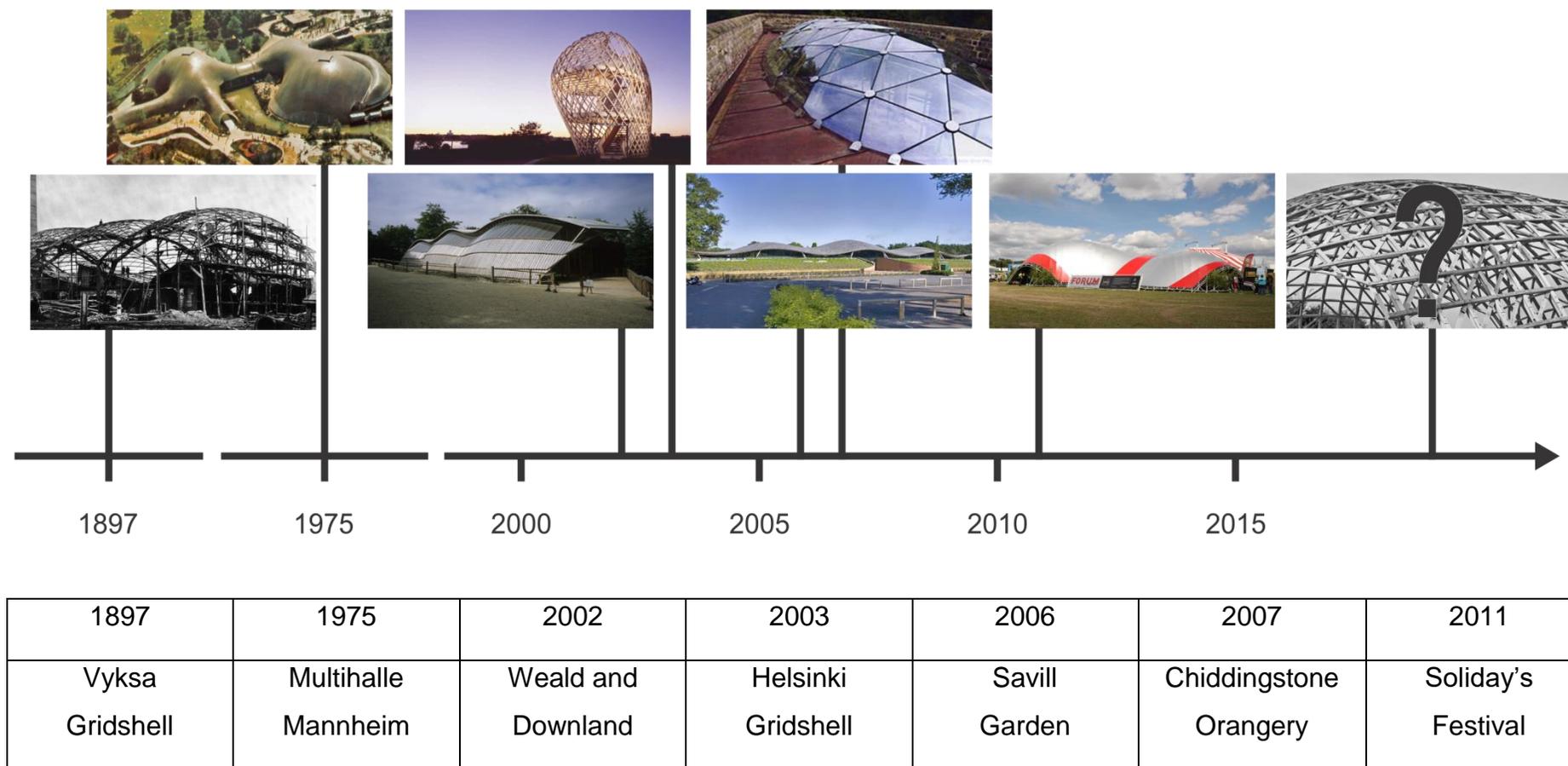
A primeira *gridshell* de expressividade construída em madeira foi feita na cidade de Mannheim (Alemanha), no ano de 1975, sendo o projeto concebido por Frei Otto e Ove Arup (PAOLI, 2007). Anos mais tarde, Collins e Cosgrove (2016) estudaram e compilaram informações sobre seis *gridshells* de grande relevância para o desenvolvimento das técnicas de construção em diferentes materiais (Tabela 2.1 e Figura 2.4).

Tabela 2.1 – Comparação das principais características de algumas das *gridshells* mais imponentes já construídas.

<b>Comparação das <i>gridshells</i> estudadas por Collins e Cosgrove (2016)</b>								
<b>Gridshell</b>	<b>Localização</b>	<b>Tamanho do plano</b>	<b>Altura</b>	<b>Forma geral</b>	<b>Camadas</b>	<b>Tamanho da ripa</b>	<b>Material</b>	<b>Reforço</b>
<b>Multihalle Mannheim</b>	Mannheim, Alemanha	60m x 60m 40m x 40m	15,50m	Duas cúpulas principais conectadas com túneis	2	50mm x 50mm x 0,5m	Cicuta ocidental	Cabos duplos de 6mm a cada 6 nós
<b>Helsinki Gridshell</b>	Helsinki Zoo, Finlândia	82m <sup>2</sup>	10m	Bolha vertical	1	60mm x 60mm	Abeto vermelho laminado	Piso de madeira como diafragma
<b>Weald and Downland</b>	Singleton, Reino Unido	50m x 16m	7,35m 9,50m	Ampulheta tripla	2	50mm x 35mm x 1m	Carvalho verde	Carvalho verde
<b>Savill Garden</b>	Windsor, Reino Unido	90m x 25m	4,00m	Forma sinusoidal de três cúpulas	2	80mm x 50mm x 1m	Pinheiro-larício	Membrana de madeira compensada
<b>Chiddingstone Orangery</b>	Chiddingstone, Reino Unido	12m x 5m	~1,00m	Cúpula elíptica	2	40mm x 30mm	Castanheiro verde	Cabos de aço
<b>Soliday's Festival</b>	Paris, França	26m x 15m	7,00m	Duas abóbodas assimétricas	1	42mm de diâmetro/ Espessura de 3,5mm	Tubos de PRFV	Tubos PRFV

Fonte: Adaptada de Collins e Cosgrove (2016).

Figura 2.4 – Linha do tempo de importantes estruturas *gridshells* construídas com emprego de flexão ativa.



Fonte: Adaptado de Collins e Cosgrove (2016).

De acordo com Collins e Cosgrove (2016), as *gridshells* são classificadas como grades de flexão ativa ou de flexão inativa. As de flexão ativa descrevem aquelas cujos elementos estruturais são deformados por flexão para dar à estrutura sua forma final. Portanto, um tipo de tensão prévia de flexão é gerado nos membros durante a deformação. Já nas de flexão inativa, seus elementos estruturais não precisam deformar-se para dar forma à estrutura. A maioria das *gridshells* de flexão inativas são construídas em aço. Essas estruturas são compostas de inúmeros elementos retos que são unidos nos nós, geralmente por soldagem, cada um inclinado em um ângulo diferente do seu elemento adjacente, conferindo uma geometria curva à estrutura.

Nesse sentido, Collins e Cosgrove (2016) buscaram estudar as *gridshells* de flexão ativa, comparando essas estruturas quanto as suas dimensões, ao tipo de material usado, número de camadas, localização, entre outras características (Tabela 2.1 e Figura 2.4).

Essas estruturas compiladas por Collins e Cosgrove (2016) apresentam grandes extensões, sendo a menor delas o telhado do Castelo Chiddingstone Orangery, no Reino Unido. Já a maior *gridshell* de flexão ativa descrita pelos autores foi aberta como centro de visitantes dos Jardins de Savill, no Windsor Great Park, em 2006, e denominada de Savill Garden Gridshell. Um fato interessante é que durante sua construção foram registradas apenas duas quebras de elementos, isso se deu em virtude da escolha de dupla camada, das baixas curvaturas e do conhecimento obtido com *gridshells* anteriores.

Com base no estudo feito, Collins e Cosgrove (2016) chegaram à conclusão de que uma das barreiras mais significativas ao desenvolvimento de *gridshells* é a seleção de um material apropriado para a construção. Além disso, a análise estrutural das *gridshells* de flexão ativa é complexa, dadas as geometrias não lineares e as formas orgânicas.

Em resumo, as seis *gridshells* mencionadas no estudo foram construídas com o uso de seis diferentes materiais, incluindo cinco espécies distintas de madeira e tubos de GFRP (polímero reforçado com fibra de vidro). Elas são leves e estruturalmente eficientes por serem em forma de casca. Cada *gridshell* assumiu formas e tamanhos particulares e três tipos diferentes de contraventamentos foram desenvolvidos e usados.

Foram identificados seis tipos de acabamento externo aplicado, resultando em diferentes formas arquitetônicas. Destaca-se ainda que essas *gridshells* de madeira são estruturas sustentáveis, uma vez que são construídas a partir de um recurso renovável. Aos poucos, os procedimentos e técnicas de construção estão sendo pesquisados e desenvolvidos de forma mais sistematizada e novos materiais estão sendo testados.

Apesar de o processo de construção das *gridshells* ser considerado técnico, pode ser realizado com recursos de baixa tecnologia. Isso porque um projeto de menor porte pode ser realizado por meio protótipos e modelos, não sendo obrigatório o uso de softwares para modelar a malha. Como exemplo pode ser citado o projeto do edifício Pishwanton (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Pishwanton, East Lothian, Reino Unido. Modelos em escala reduzida da malha projetada (a, b, c); Grade pronta, construída na horizontal (d); Malha posicionada sobre as paredes de pedra (e); Cobertura sobre a malha já instalada (f); Estrutura interna oferecendo sustentação à cobertura (g); Edifício com cobertura finalizada e relva posta no topo (telhado verde) (h).



Fonte: Fotos feitas por Tasker e Lowenstein. Lowenstein (2002).

Essa estrutura ficou conhecida como *Lothian Gridshell* e nela está abrigado o Life Science Centre Trust (Centro de Confiança da Ciência da Vida). Nela, foram usados pilares de pinus (Figura 2.5g), telhado verde (grama no topo) (Figura 2.5h) e paredes de pedras (Figura 2.5f), proporcionando um ambiente orgânico com aparência rústica, sendo criação do arquiteto Christopher Day (LOWENSTEIN, 2002).

Para essa obra, um pequeno experimento com peças de pinheiro em miniatura foi produzido para ser usado como modelo de cúpula (Figura 2.5a, b, c). Nesse estudo, buscou-se observar as respostas da madeira. Portanto, uma análise estrutural foi feita, embora sem os programas computacionais habituais, devido às incertezas quanto à madeira e ao custo. O telhado em *gridshell* possui dez metros de extensão (vão) (Figura 2.5d). Uma vez que a cúpula e os tapumes da *gridshell* estavam posicionados no lugar (Figura 2.5e, f, g), uma membrana e uma cortiça foram usadas como isolamento. Em seguida, o telhado foi coberto por relva (vegetação rasteira) (Figura 2.5h).

O prédio foi construído ao longo de quatro anos, entre paradas e recomeços, de 1999 a 2002. Com custo aproximado entre UK£ 50.000,00 e 60.000,00 (cinquenta e sessenta mil libras esterlinas), o que equivale atualmente a algo entre R\$ 243.000,00 e 292.000,00 (duzentos e quarenta e três mil reais e duzentos e noventa e dois mil reais). No entanto, quando comparada a Downland Gridshell em Sussex (Reino Unido), que custou UK£ 1,80 milhão (cerca de R\$ 8.970.003,82 em valores atuais), percebe-se que seu custo foi reduzido para os padrões do Reino Unido. O engenheiro estrutural David Tasker foi o responsável pela sua construção (LOWENSTEIN, 2002).

## **2.2 *Gridshells* em solo brasileiro**

Com o objetivo de conhecer melhor o panorama atual das *gridshells* no Brasil, foi feito um levantamento das obras de maior porte já feitas nacionalmente. Dessa forma, foram incluídas obras tanto em madeira quanto em aço. A seguir, estão detalhadas cada uma delas.

### 2.2.1 CASACOR *Gridshell*

A primeira *gridshell* em madeira da qual se tem registro construída no Brasil foi apenas uma instalação temporária (Figura 2.6), que compôs um evento de arquitetura denominado CASACOR SÃO PAULO, em sua edição do ano de 2015, ocorrida na cidade de São Paulo. A empresa CASACOR (Grupo Abril) produz mostras em cerca de vinte cidades brasileiras e seis em outros países. Essas exposições costumam reunir trabalhos de arquitetura, design de interiores e paisagismo.

Figura 2.6 – Pavilhão brasileiro no CASACOR SP (a); Detalhes construtivos da estrutura de sustentação da malha (b); Detalhes da malha com a presença de furos alongados e camada adicional de travamento na horizontal (c, e, f); Cobertura plástica aplicada com vegetação no topo (paisagismo) (d).



Fonte: Diniz e Apsan (2015) e Carlito Calil Neto (2015).

A CASACOR *Gridshell* é criação do engenheiro industrial madeireiro Carlito Calil Neto (empresa Rewood), que se inspirou em malhas italianas para construí-la. Ela ainda ganhou piso, móveis, peças de decoração, iluminação (Figura 2.7a, b), recebeu uma cobertura plástica transparente (Figura 2.7a) e foi ornamentada com plantas, sendo local de exposição de automóveis (Figura 2.7b).

Figura 2.7 – CASACOR *Gridshell* iluminada durante a noite. Vista externa (a) e *grid* vista internamente (b).



Fonte: Acervo pessoal do engenheiro Carlito Calil Neto (2015).

Ao final da mostra, essa estrutura foi desmontada e doada para a Universidade Estadual Paulista (Unesp) e reconstruída no Campus Experimental de Itapeva, quase em sua totalidade, para fins de estudos do seu comportamento estrutural. A tarefa, coordenada pelo professor Doutor em Engenharia Civil Julio Cesar Molina, contou com a participação de voluntários que auxiliaram na fabricação de diversas peças avariadas, criação de novos elementos de apoio e conexões metálicas.

### 2.2.2 Carioca Wave Gridshell ou Gridshell Onda Carioca

Este trabalho de dissertação converge esforços para a confecção de uma estrutura em madeira, porém é importante conhecer obras feitas com outros materiais que usam esse sistema estrutural e se destacam no Brasil. A Onda Carioca (Figura 2.8) é um exemplo dessas obras, sendo construída em aço e vidro.

Essa *gridshell* é criação do arquiteto israelense Nir Sivan, que se inspirou em paisagens do Rio de Janeiro para a criação de seu primeiro projeto no Brasil e tentou capturar o espírito da cultura carioca.

Figura 2.8 – Carioca Wave Gridshell.



Fonte: <<http://www.archiexpo.com/pt/prod/seeee/product-157231-1914404.html>>.

De acordo com Sivan, o projeto tem um conceito inspirado na felicidade das pessoas da cidade, na dança, na música popular brasileira (MPB), nos vestidos esvoaçantes das mulheres se movendo ao vento do mar e nas paisagens deslumbrantes do estado.

A *gridshell* tem uma forma livre e cobre o átrio do centro comercial CasaShopping (Figura 2.8), localizado no centro do Rio de Janeiro, próximo a Barra da Tijuca. A Onda Carioca fornece uma ligação entre as lojas e a entrada principal no nível inferior (Figura 2.9).

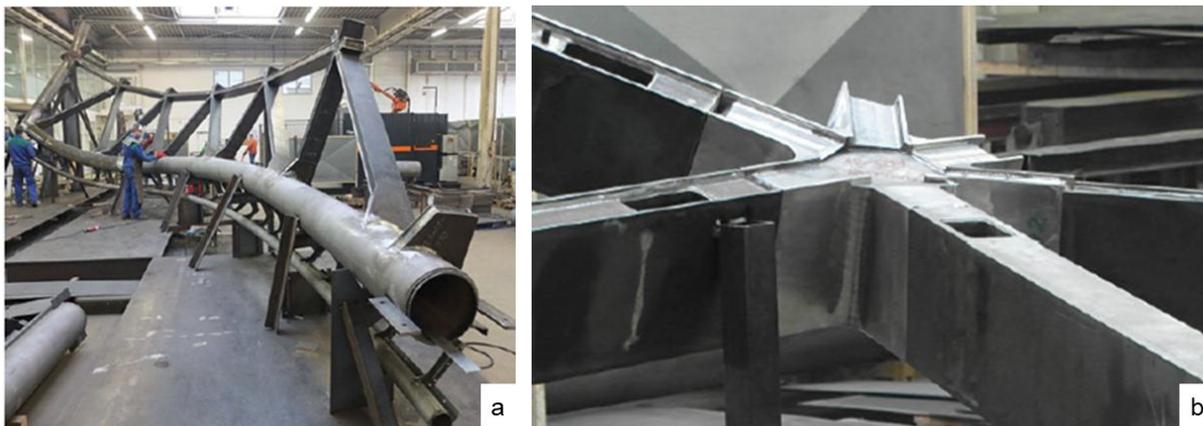
Figura 2.9 – Projeto de reforma das instalações do CasaShopping.



Fonte: © NSAA (apud HELBIG; GIAMPELLEGRINI; OPPE, 2014).

A geometria complexa da estrutura exigiu muito dos construtores, e como não havia empresas conhecedoras desse tipo de tecnologia no Brasil, as peças foram pré-fabricadas na Europa e na Ásia. Por fim, a estrutura foi montada e erguida no Rio de Janeiro em 2013 (Figura 2.10).

Figura 2.10 – Fabricação de viga da borda (a) e nó com membros da grade já fixados (b).



Fonte: © seele pilsen (apud HELBIG; GIAMPELLEGRINI; OPPE, 2014).

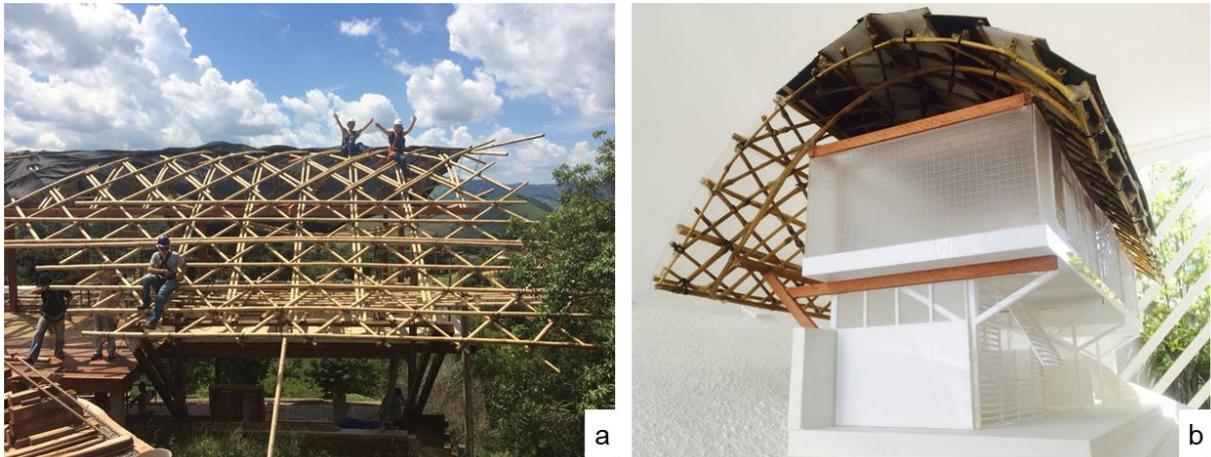
O projeto e a construção foram desenvolvidos de forma colaborativa entre o escritório do arquiteto Nir Sivan (Roma, Itália), o empreiteiro especial Se-áustria (Schoerfling, Áustria) e o Knippers Helbig Engenharia Avançada (Stuttgart, Alemanha) (HELBIG; GIAMPELLEGRINI; OPPE, 2014).

### 2.2.3 Gridshell Bambu Carbono Zero

A terceira *gridshell* abordada neste tópico (2.2 *Gridshells* em solo brasileiro) foi executada em bambu (Figuras 2.11 e 2.12) pelo construtor Bruno Sales. Esse projeto foi desenvolvido pelo escritório Gera Brasil e pela Bambu Carbono Zero em parceria com o engenheiro calculista, especialista em madeira, Alan Dias, da empresa Carpinteria.

A Bambu Carbono Zero trabalha com construções em bambu no Brasil, com foco em toda a cadeia produtiva. Ou seja, a empresa se preocupa com o plantio, a colheita, o transporte, o beneficiamento, o tratamento, a comercialização e a aplicação dos bambus em diferentes projetos.

Figura 2.11 – Telhado de *gridshell* em bambu em construção (a) e maquete da *Gridshell* Bambu Carbono Zero (b).



Fonte: Bambu Carbono Zero (2019).

A execução dessa *gridshell* em bambu contou com ensaios de cargas realizados pelo calculista Alan Dias (Figura 2.12b), com base em modernos programas computacionais para cálculo estrutural. A Bambu Carbono Zero também construiu uma maquete em bambu da obra para validar as técnicas de construção concebidas (Figura 2.11b).

Figura 2.12 – Obra em execução em seus estágios finais (a) e equipe empenhada nos detalhes finais da execução (engenheiro Alan Dias, à frente, e Equipe de Arquitetura Gera Brasil) (b).



Fonte: Bambu Carbono Zero (2019).

Segundo as informações disponibilizadas pela Bambu Carbono Zero, a obra está na fase final. Como se pode constatar nas Figuras 2.11 e 2.12, a obra não é apenas composta por bambu, fazendo uso de outros tipos de material, como madeiras e conexões metálicas.

### 2.3 As estruturas *gridshell* e as diferentes configurações de suas camadas

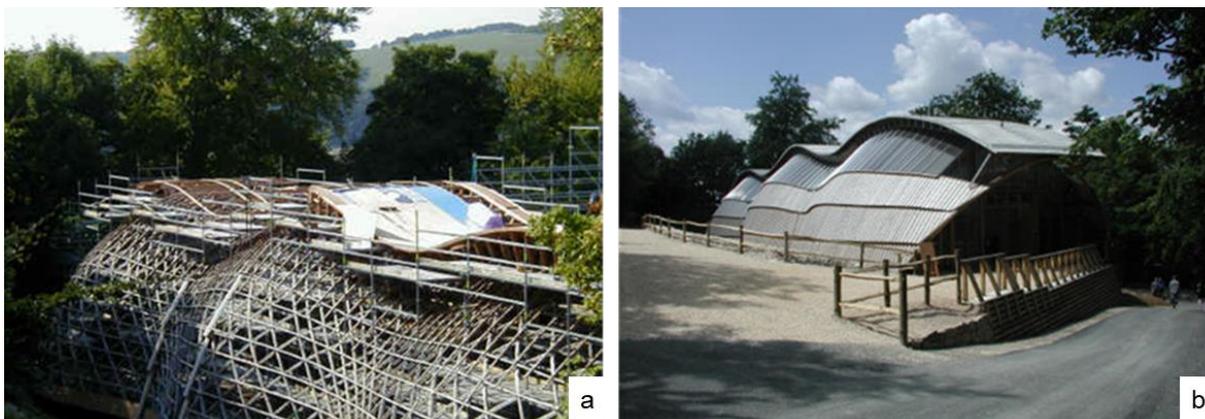
A principal função dos edifícios feitos pelo homem é fornecer abrigo às atividades humanas, embora também possam ser usados com outros propósitos. Então, a finalidade central dos prédios é proteger o ambiente interior dos agentes externos, proporcionando o maior conforto possível aos seus usuários. Mencionado isso, pode-se dizer que o sistema *gridshell* desempenha tal função com desenvoltura, pois, além de proporcionar estruturas funcionais, lhes garante beleza arquitetônica.

A grande versatilidade do método advém da flexibilidade dos elementos lamelares utilizados. As barras ou lamelas possuem largura bem inferior em relação ao seu comprimento, e assumem modelos variados em configuração reticular tridimensional. A malha pode assumir formas complexas, como as elípticas, hiperbólicas ou cilíndricas, no entanto, as unidades que a compõem possuem uma geometria simples, sendo triangulares ou quadrangulares.

Contudo, existem algumas diferenças em relação à rigidez do conjunto, sendo as estruturas triangulares mais rígidas do que as malhas quadrangulares. As *gridshells* em formato quadrangular dependem da rigidez das conexões para se manterem estáveis, enquanto as *gridshells* triangulares se beneficiam de um comportamento semelhante a uma concha (malha mais fechada), sem a necessidade de conexões rígidas (MESNIL et al., 2017).

Com o intuito de se valer das vantagens de ambas as geometrias, algumas estruturas combinam o uso das duas. Exemplo disso é o Museu Downland Gridshell (Figura 2.13a), de autoria das empresas Edward Cullinan Architects e BuroHappold Engineering, construído com madeira de carvalho. Ele apresenta a forma de uma ampolheta tripla (Figura 2.13b), com 50,00 metros de comprimento, largura variável em cada ondulação (tendo 12,50 metros nos vales e 16,00 metros nos topos), e altura variando entre 7,35 metros nos vales a 9,50 metros na cúpula central (KELLY et al., 2011).

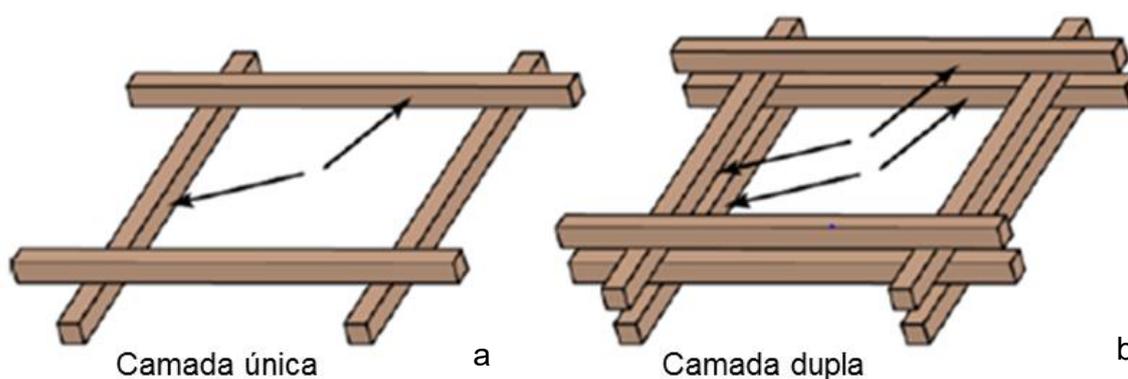
Figura 2.13 – Downland Gridshell, Sussex, Reino Unido (2002). Estrutura em construção (a) e finalizada (b).



Fonte: Weald & Downland Living Museum (2001).

As *gridshells* podem apresentar uma ou duas camadas de barras sobrepostas e interligadas nos nós (pontos de cruzamento) (LEFEVRE; DOUTHE; BAVEREL, 2015). O sistema de duas camadas, com quatro conjuntos de linhas dispostas em duas direções ortogonais intercaladas entre si (Figura 2.14b), permite que curvaturas maiores sejam obtidas, possibilitando resultados arrojados (NAICU; HARRIS; WILLIAMS, 2014).

Figura 2.14 – Grade de camada única (a) e grade de duas camadas (b).



Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014).

Com o intuito de minimizar problemas ocasionados por defeitos da madeira, é recomendável o emprego de mais de uma camada, pois a probabilidade de se ter uma deformidade considerável em qualquer seção transversal é reduzida, uma vez que as possíveis falhas estarão espalhadas. Dessa maneira, um conjunto com propriedades menos variáveis é alcançado (COLLINS; COSGROVE; MELLAD, 2017). Levando

essas observações em consideração, os projetos de estruturas *gridshell* costumam conter duas camadas de peças de madeira em malha (Figura 2.15).

Figura 2.15 – Detalhes das peças de conexão e componentes do telhado do Castelo Chiddingstone, Reino Unido (a) e cobertura finalizada (b).



Fonte: Carpenter Oak & Woodland Limited (2007).

A Figura 2.15a expõe a presença de dupla camada de barras, sendo, conforme seus autores, um projeto desafiador. A arquitetura é de autoria do escritório Peter Hulbert Chartered Architects e os cálculos estruturais foram feitos pela BuroHappold Engineering. Essa cobertura em *gridshell* suporta um telhado de vidro (Figura 2.15b), a primeira do Reino Unido com essa particularidade, e foi vencedora do prêmio *Wood Award Best Use of British Timber*, em 2007.

## 2.4 Métodos construtivos

Projetar e construir *gridshells* constitui uma tarefa complexa para arquitetos, engenheiros calculistas de estruturas e engenheiros de execução. Isso ocorre porque novos recursos para representação do projeto, assim como novos modelos matemáticos de análise de esforços atuantes, devem ser aplicados. Outra complexidade é a escolha do esquema construtivo a ser usado para realização do projeto.

Com base no exposto, indubitavelmente, representar uma obra dessa natureza e retirá-la do papel não é tão simples, sobretudo quando se fala de algo em grandes proporções. Ao considerar os referidos aspectos, é importante ressaltar que já na etapa de pré-projeto é essencial escolher o método construtivo a ser empregado. A escolha do processo de montagem dessa estrutura vai exercer influências em todas as fases de produção, desde o projeto até a manutenção.

A montagem da *gridshell* pode ser feita a partir de dois métodos:

- (i) O primeiro é o resultado da deformação elástica de uma grade inicialmente plana. A malha é montada sob o solo e em seguida erguida e presa na posição desejada (curva). Geralmente, opta-se pelo uso da madeira e de compósitos, quando esse processo é escolhido.
- (ii) O segundo emprega peças previamente curvadas, sendo o metal e a madeira os materiais frequentemente usados.

Portanto, para distinguir as obras erguidas com esses dois métodos construtivos, as primeiras são muitas vezes denominadas de “*gridshells* elásticas”, uma vez que todo esse processo pode ser reversível (HERNÁNDEZ, 2013), ou ainda, *gridshells* “pós-formadas”, pois a estrutura ou seus elementos são posteriormente envergados (PONE et al., 2013). Já as construídas do segundo modo são ditas *gridshells* “pré-formadas”, pois seus elementos são confeccionados em seus formatos finais.

#### **2.4.1 Metodologia construtiva das *gridshells* “pós-formadas”**

Quando se obtém uma geometria curva por meio da flexão de elementos elásticos, as *gridshells* são chamadas de “pós-formadas”, pois a “flexão ativa” é empregada. A Figura 2.16 mostra a estrutura Downland Gridshell sendo erguida com o auxílio de pistões hidráulicos (Figura 2.16f), após a grade ser montada horizontalmente sobre uma plataforma de andaimes (Figura 2.16b, c, e). Essa obra exemplifica como a metodologia construtiva de *gridshells* “pós-formadas” pode ser

empregada em edifícios de diferentes tamanhos, desde maquetes até estruturas enormes como esta, que possui cerca de 50,00 metros de comprimento. Vale salientar que uma estrutura dessa magnitude requer um cuidadoso projeto e deve ser planejada nos mínimos detalhes para que não ocorra o colapso de suas partes.

É importante destacar que o Downland Gridshell é formado por camadas duplas de madeira e que apesar de sua forma estrutural ser eficiente e ambientalmente sustentável, não é empregada com muita frequência em virtude das dificuldades encontradas durante o processo de curvatura, partindo da malha plana (KELLY et al., 2011) (Figura 2.16a, e, g, h). Ainda na Figura 2.16 pode ser observada a plataforma de andaimes montada para oferecer suporte ao soerguimento da rede, assim a gravidade trabalhou como uma aliada para atingir a forma planejada. Após a montagem, mais de 60 toneladas de andaimes foram retiradas (JOHNSON, 2000).

Figura 2.16 – Processo construtivo do imponente Museu Downland Gridshell, Reino Unido.

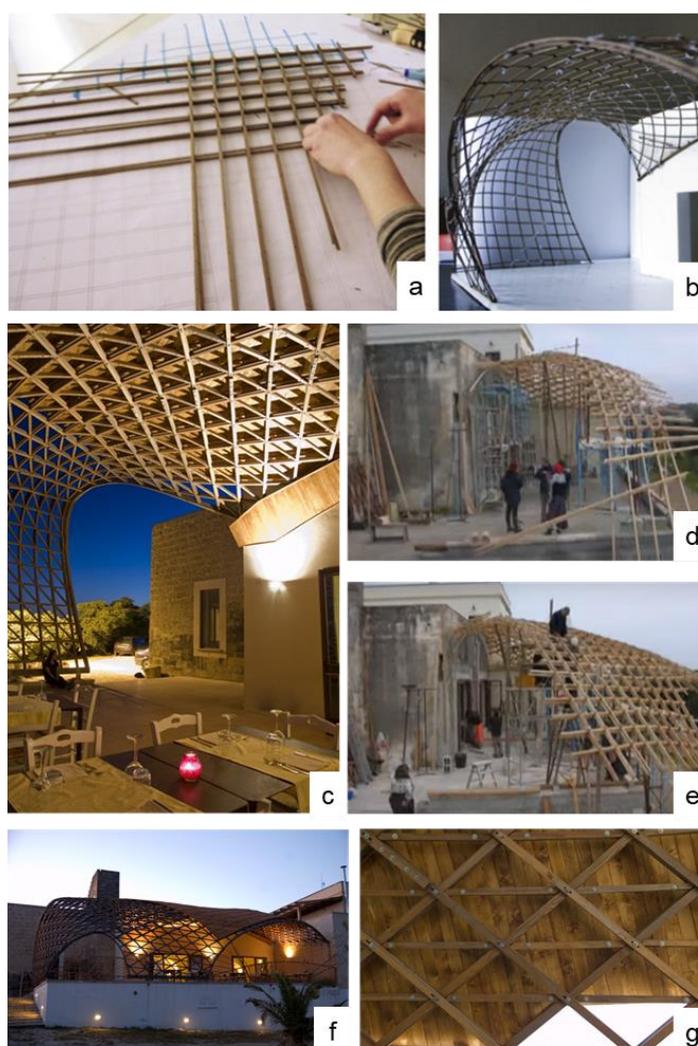
Grade pronta apoiada sobre andaimes (a); Torres de elevação nas bordas externas da grade (b); Torres de elevação internas e passarela para movimentação dos trabalhadores abaixo da malha (c); Aperto de elemento de conexão/ligação das camadas da malha (d); Malha no início do processo de encurvamento (e); Ajuste das torres de elevação (f); Encurvamento em estágio avançado (g); Malha na posição final (h).



Fonte: Weald & Downland Living Museum (2001).

As estruturas “pós-formadas” não necessariamente são montadas no plano horizontal, como é o caso da cobertura chamada de Trio Gridshell feita no ano de 2010, em Lecce, Itália (Figura 2.17). O projeto dessa obra é da CMMKM Architettura e Design, em parceria com B. D’Amico e F. Nigro. Nesse caso, também se constata que a gravidade foi usada a favor dos construtores, forçando as peças para baixo enquanto a estrutura estava sendo montada. Gradativamente, o telhado foi adquirindo a curvatura requerida e as partes foram sendo fixadas, gerando um resultado final surpreendente (Figura 2.17d, e, f). Destaca-se ainda que modelos físicos em escala reduzida foram utilizados durante a fase de projeto (Figura 2.17a, b).

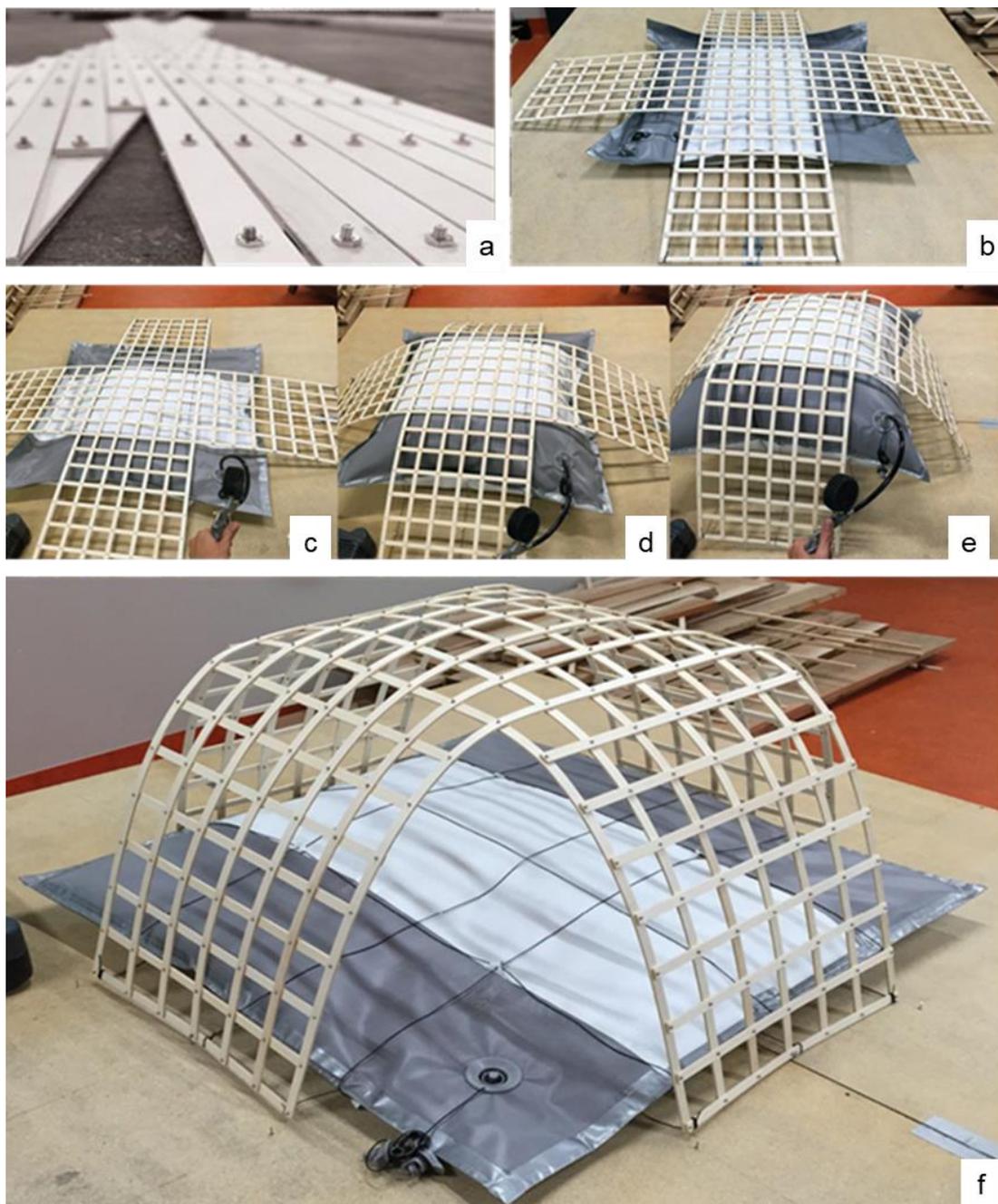
Figura 2.17 – Trio Gridshell – Estrutura “pós-formada” construída em Lecce, Itália. Montagem da malha (a); Maquete da estrutura (b); Cobertura pronta vista de dentro (c); Montagem da estrutura da malha em estágio inicial (d); *Gridshell* parcialmente pronta (e); Malha finalizada vista externamente (f); Detalhes da cobertura da grade elástica (g).



Fonte: D’Amico, Kermani e Zhang (2016) e Gridshell.it (2012).

A metodologia de execução das estruturas “pós-formadas” ainda compreende aquelas erguidas com a utilização de membranas infláveis, como mostrado nas Figuras 2.18 e 2.19, que descrevem um novo processo construtivo para erguer *gridshells* de madeira.

Figura 2.18 – Processo de elevação de *gridshell* por meio do emprego de membrana inflável. Malha pronta (retrátil) (a); Posicionamento da malha sobre a membrana (b); Início do processo de inflagem da membrana (c); Membrana parcialmente inflada (d); Membrana inflada ao máximo (e); Esvaziamento da membrana após elevação da estrutura (f).



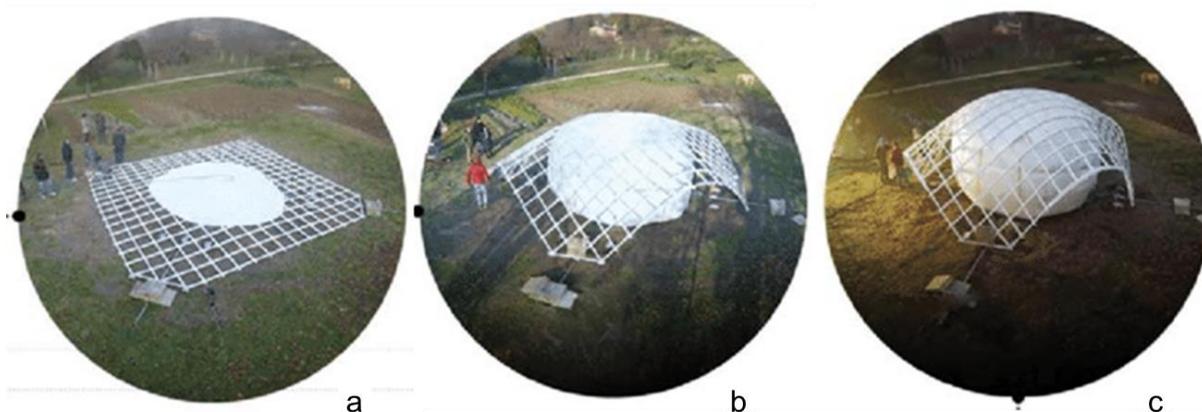
Fonte: Adaptado de Liuti e Pugnale (2015).

Segundo Liuti e Pugnale (2015), os procedimentos de construção de curvar a estrutura com guindastes, andaimes e traves apresentam deficiências que tornam as obras onerosas e laboriosas, o que leva apenas projetos excepcionais a fazer uso das *gridshells*, como o Museu Downland ou Multihalle Mannheim (Figura 2.16).

Liuti e Pugnale (2015) esperam que essa nova técnica com membranas infláveis possa ajudar a difundir tais estruturas, salientando que são construídas a partir de tecnologias básicas, por meio da autoconstrução, sendo rapidamente construídas e inteiramente recicláveis (Figura 2.18). Nesse exemplo, os autores projetaram uma membrana inflável para erguer, de acordo com as análises e testes, um protótipo de grade com 55,00 m<sup>2</sup>. Os autores citam ainda que a inspiração veio do estudo dos trabalhos de Dante Bini, arquiteto que realizou inúmeras cúpulas de concreto em todo o mundo.

Liuti, Colabella e Pugnale (2017) também descrevem uma obra usando a técnica de membrana inflável chamada de Airshell (Figura 2.19). Dessa vez, a inspiração veio dos trabalhos realizados por Frei Otto e Dante Bini. A elevação da estrutura foi feita com uso de membrana pneumática e uma placa Arduino que monitorou a altura da estrutura e a pressão da membrana ao longo do processo. O protótipo foi erguido em Pesaro (Itália), em dezembro de 2016, e replica a Woodome Gridshell feita em Lecce, em 2009, concebida com o método *push-up*, sendo essa uma das mais convencionais e explicada a seguir.

Figura 2.19 – O protótipo Airshell erguido com uso de uma membrana inflável. Posicionamento da malha montada sobre a membrana (a); Elevação parcial da estrutura (b); Encurvamento máximo da *gridshell* (c).



Fonte: Adaptado de Liuti, Colabella e Pugnale (2017).

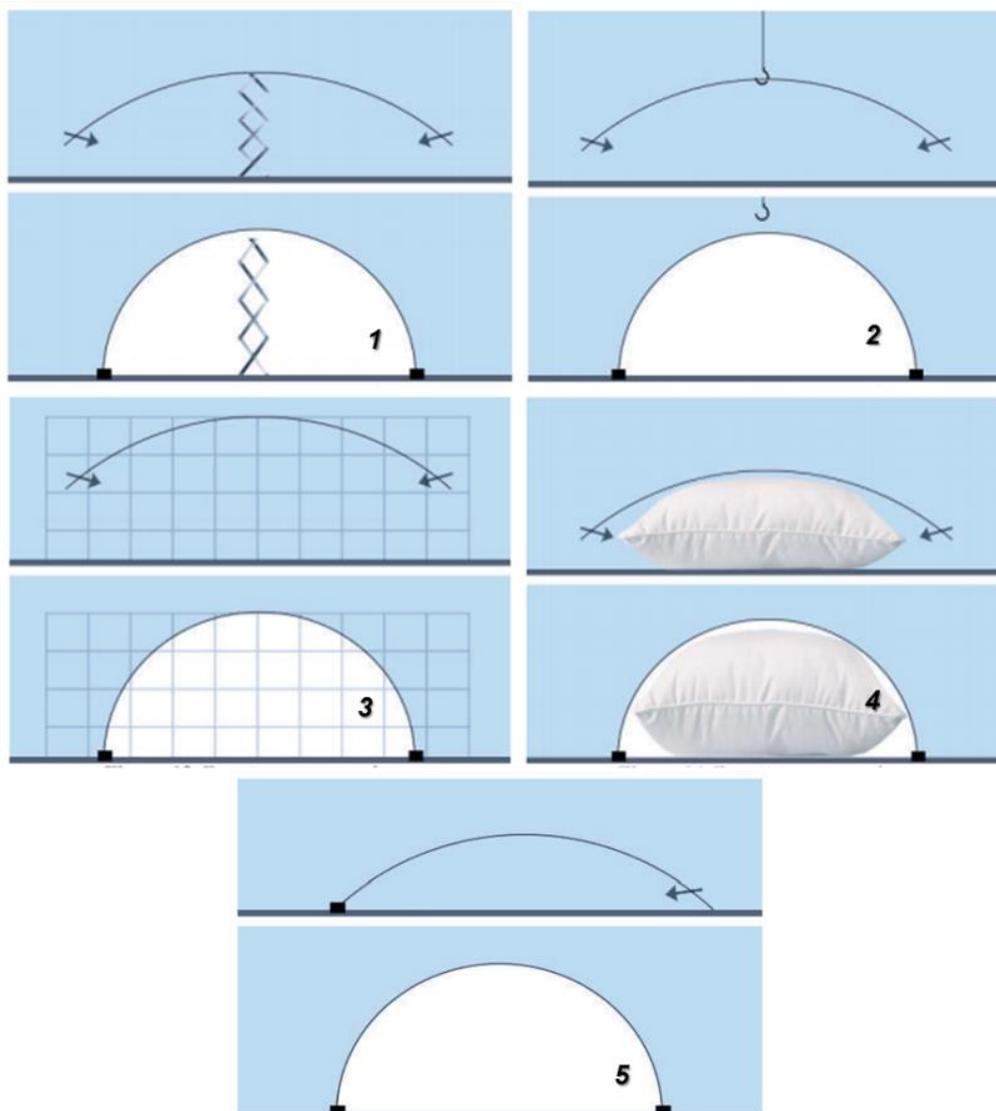
Ainda segundo Liuti, Colabella e Pugnale (2017), esse novo método de elevação confere rapidez e precisão à montagem da estrutura. Como já dito, o design geral da Airshell (Figura 2.19) replica a geometria de uma grade de madeira existente chamada de Woodome, medindo 7,50 m x 7,50 m x 3,30 m, erguida por meio do método *push-up* e fixada com um duplo conjunto de cabos de aço. Os autores tiveram acesso à documentação Woodome, desenhos e comentários sobre o comportamento da estrutura. O orçamento final da estrutura foi de aproximadamente AU \$8.000,00 (oito mil dólares australianos), o que corresponde a cerca de R\$ 21.674,80 (vinte e um mil, seiscentos e setenta quatro e oitenta centavos). Isso permitiu que se concentrassem em desenvolver essa nova tecnologia de montagem que é o sistema pneumático e fazer uma comparação direta entre os dois métodos de construção (método *push-up* versus método pneumático).

Resumidamente, as *gridshells* “pós-formadas” são construídas por meio de cinco principais processos construtivos, como descrito na Figura 2.20. Vale destacar que o processo de construção é um dos fatores mais importantes na criação de uma malha estrutural elástica de madeira, pois influencia totalmente no design e nas dimensões da estrutura. Por esse motivo, a criação de métodos padronizados é essencial, pois tornará o uso do sistema mais recorrente, dada a facilidade de construção e rapidez. Isso não é o que ocorre hoje, em partes devido às dificuldades encontradas nos projetos, os quais exigem quase sempre adaptações nos métodos construtivos usados, tornando as construções onerosas e lentas (FERNANDES; KIRKEGAARD; BRANCO, 2016).

Durante a curvatura das ripas, essas são fletidas e sofrem esforços até assumirem novas formas. As cargas aplicadas para deformação criam tensões de flexão nas ripas, podendo levá-las à ruptura. Isso ocorria com bastante frequência, mas tem diminuído conforme novas estruturas são construídas, como observaram Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016). Como destacam os autores, durante a construção do Multihalle Mannheim (1975), ocorreram inúmeras rupturas nas zonas das ligações das peças, já na construção do Museu Downland (2002), com aproximadamente 10.000 conexões, aconteceram 145 rupturas de elementos de madeira. No Savill Garden (2006), mais recente, ocorreu apenas um par de rupturas. Embora as estruturas apresentem diminuição de rupturas de peças de madeira

durante a sua construção, elas são executadas por meio de métodos construtivos mais dispendiosos e demorados (FERNANDES; KIRKEGAARD; BRANCO, 2016).

Figura 2.20 – Principais processos construtivos. 1 – *PUSH UP* (empurrar para cima); 2 – *PULL UP* (puxar para cima); 3 – *EASE DOWN* (encurvamento facilitado); 4 – *PNEUMATIC FRAMEWORK* (estrutura pneumática); 5 – *RECESSING / CONSTRAINING* (embutindo / restringindo).



Fonte: Adaptado de Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016).

Onde:

1 – *PUSH UP* – esse método faz uso de torres de elevação ou estacas com diferentes alturas de travamentos, que são postas na parte inferior da estrutura, elevando toda a grade para moldagem. A Multihalle Mannheim

Gridshell foi construída com aplicação desse método de elevação. O edifício foi inicialmente planejado para ser erguido usando quatro guindastes de 200 toneladas, mas os empreiteiros e os engenheiros precisaram cortar custos e um sistema mais barato com uso de torres de elevação foi projetado (QUINN; GENGNAGEL, 2014).

2 – *PULL UP* – utiliza gruas móveis ou guindastes para içamento e estacas de madeira ao longo do seu perímetro interior para auxílio. Um exemplo do uso desse método de montagem com cabos e guindastes é o Soliday's Festival Gridshell.

3 – *EASE DOWN* – usa andaimes em toda a parte inferior da grade, aproveitando a gravidade para dobrar as lamelas gradativamente para baixo, com bastante controle do deslocamento vertical e horizontal das peças. As malhas elásticas de madeira intituladas de Japan Pavilion (Pavilhão do Japão), Weald & Downland Centre Gridshell (Museu Downland), Savill Garden, construídas por Buro Happold, foram erguidas por meio do apoio de andaimes sob toda a área *gridshell* juntamente com o deslocamento incremental e controlado das ripas. Os modelos físicos em escala desempenharam um papel crucial no planejamento, previsão e verificação do processo de elevação. A medição e a marcação detalhada das estruturas durante a deformação foram realizadas para monitorar e controlar o processo (QUINN; GENGNAGEL, 2014).

4 – *PNEUMATIC FRAMEWORK* – método pouco usado e com muitas particularidades, pois a membrana ou bolha pneumática deve ser bem projetada, seguindo as peculiaridades de cada projeto para que a malha final fique exatamente na curvatura desejada, o que demanda altos custos. Um exemplo é a Airshell, construção já descrita (Figura 2.19).

5 – *RECESSING / CONSTRAINING* – ocorre a restrição de pontos da grade enquanto a *gridshell* é fletida, sendo necessária a simetria da grelha. Não foram encontrados registros consistentes de grandes estruturas construídas apenas com esse método, mas a Moving Gridshell utiliza os princípios desse método (Figura 2.21). Nesse projeto uma das laterais ficou

presa, enquanto a outra foi empurrada e curvada até chegar no barrote de travamento.

Figura 2.21 – Moving Gridshell (Áustria). Encurvamento da malha com uma de suas extremidades presa a um estrado de madeira (a); Elevação parcialmente completa (b); Elevação e encurvamento concluídos (c); Movimentação da estrutura, fechando e abrindo as unidades que compõem a cobertura (d);



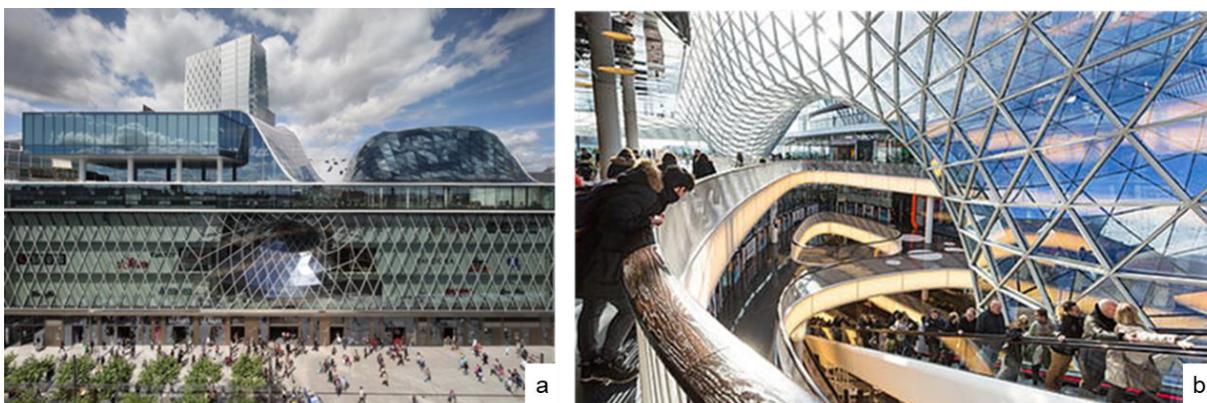
Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=HmvpUb71JVQ&t=13s>>.

A Moving Gridshell foi construída na Universidade Tecnológica de Graz, na Áustria. Essa obra temporária foi um projeto de verão realizado no ano de 2014. Essa *gridshell* foi assim intitulada por possuir movimento, podendo sua cobertura se manter fechada ou aberta, dependendo da posição de sua trama.

#### 2.4.2 Metodologia construtiva das *gridshells* “pré-formadas”

A proposta da metodologia das *gridshells* “pré-formadas” é trabalhar com peças já moldadas, na forma final que assumirão para compor uma dada estrutura. Como descreve Caffarello (2016), a fabricação com auxílio de recursos digitais é uma das técnicas usadas para produzir as peças, que são cortadas exatamente como serão aplicadas, por meio de comandos dados às máquinas. Com o uso de programas de computadores, ocorre a produção de modelos físicos. A produção de componentes também pode ocorrer por intermédio de profissionais que irão interpretar e materializar desenhos e modelos descritos em projetos. A vantagem do uso da fabricação computadorizada reside na precisão das formas que podem se tornar muito complexas para serem obtidas manualmente. Um exemplar que possui formas bastante ousadas é o MyZeil Shopping Center (Figura 2.22), que apresenta elementos pré-fabricados em aço.

Figura 2.22 – MyZeil Shopping Center. Vista externa (a) e interna (b) – Estrutura “pré-formada”. Frankfurt, Alemanha, 2009.



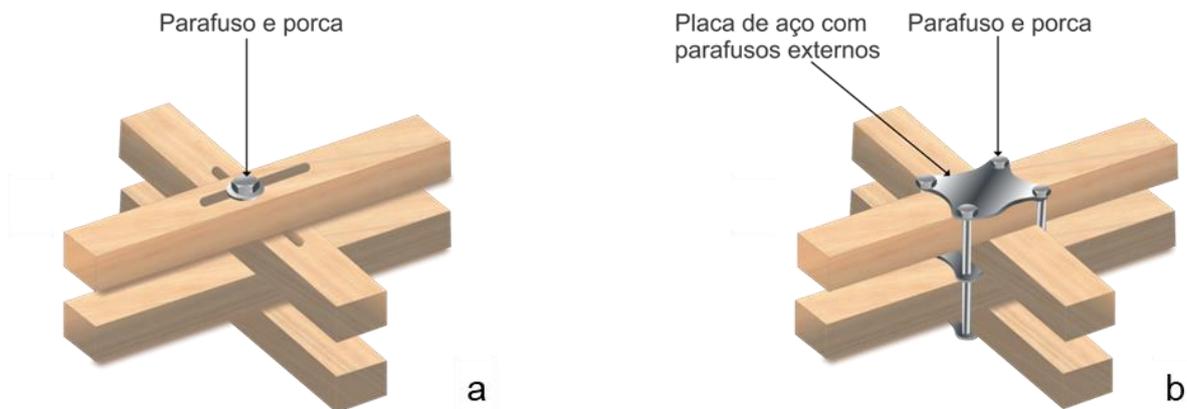
Fonte: MyZeil (2017).

O MyZeil é um shopping center localizado no centro de Frankfurt, na Alemanha. O prédio foi inaugurado em 2009 e foi projetado pelo arquiteto romano Massimiliano Fuksas. A entrada principal fica na rua Zeil, no centro comercial de Frankfurt. A fachada do edifício foi projetada com painéis de vidro fixados em uma estrutura de aço.

## 2.5 Tipos de ligação

Existem diferentes possibilidades de ligações entre as camadas da *gridshell*. Naicu, Harris e Williams (2014) compilaram algumas técnicas construtivas, uma delas envolve furos alongados em todas as peças das camadas (Figura 2.23a) por onde transpassa um parafuso, prendendo a estrutura e permitindo que as peças (de madeira ou outro material) possam deslizar umas sobre as outras. Dessa forma, a curvatura desejada pode ser alcançada, uma vez que, os elementos possuem uma folga para estabilização até que a flexão da grade esteja completa. Após atingir a curvatura final, os parafusos são apertados.

Figura 2.23 – (a) Conexão com orifício alongado (esquerda) e (b) conexão de placas de aço e parafusos externos (direita).



Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014).

Outro tipo de ligação é constituído de uma placa de aço galvanizado (ou inoxidável) e quatro parafusos também de aço, que se projetam em ambos os lados (Figura 2.23b), prendendo as peças em seu ponto de interseção. No processo de

montagem da estrutura, apenas dois parafusos são encaixados e apertados antes de a malha assumir sua forma final, isso é feito para que as peças possam mover-se ligeiramente e se acomodarem conforme a curvatura projetada da estrutura (Weald & Downland Living Museum, 2001) (Figura 2.24).

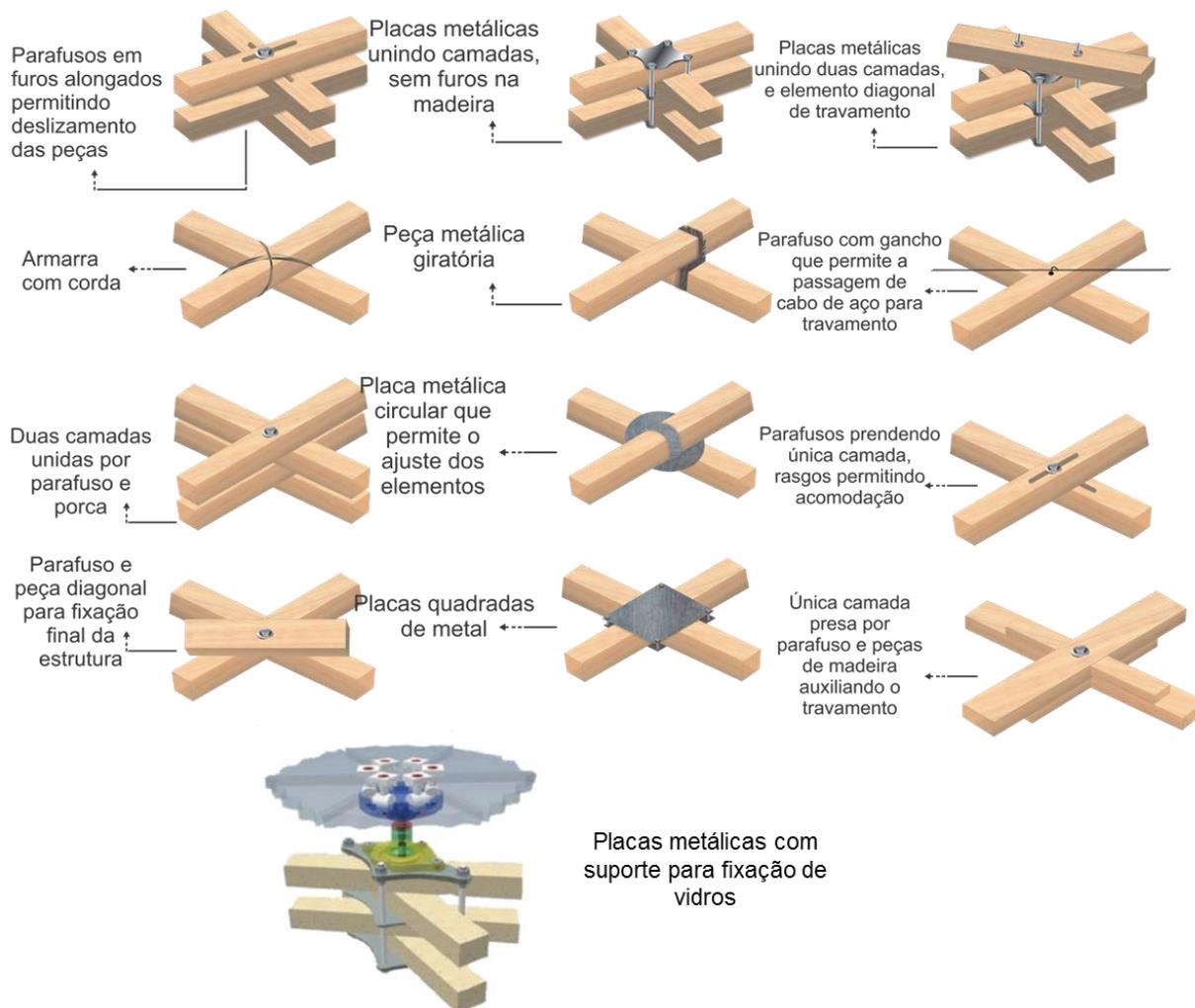
Figura 2.24 – Elemento de ligação/conexão feito com placa de aço galvanizado do Downland Gridshell, Reino Unido.



Fonte: Weald & Downland Living Museum (2001).

A seguir, tem-se uma compilação de ligações descritas pelos trabalhos de Naicu, Harris e Williams (2014) e Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016). Esses esquemas mostram ligações utilizadas em diversas obras ao redor do mundo (Figura 2.25).

Figura 2.25 – Tipos de ligação compilados.



Fonte: Adaptado de Naicu, Harris e Williams (2014) e Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016).

As ligações descritas utilizam não apenas peças metálicas como parafusos e placas, mas também amarras feitas com cordas e cabos de aço. O tipo de ligação escolhida tem relação direta com o tipo de material empregado e a com a própria constituição da malha.

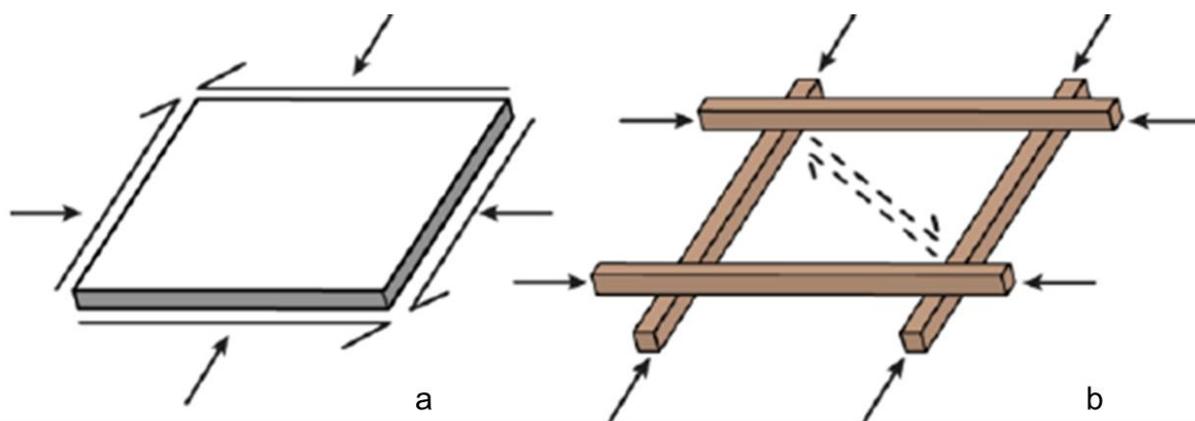
## 2.6 Forças atuantes e travamentos

Esse é um sistema de construção complexo de peças curvadas que trabalham em conjunto para resistir às cargas. Tais elementos podem ter sido encurvados durante o processo de montagem da estrutura ou no momento da fabricação dos

segmentos, como no caso de *gridshells* metálicas. É imprescindível entender que os membros que compõem a *gridshell* experimentam sobretudo tração e compressão, sendo a última a principal força atuante. O cisalhamento também atua no conjunto, entretanto, a adição de membros diagonais que são posicionados triangularmente às células proporciona mais rigidez ao cisalhamento (PAOLI, 2007). Ainda podem ocorrer efeitos de borda nas extremidades da casca onde ficam os apoios, sendo necessário construir superfícies espessas ou de elevada inércia (CAFFARELLO; MASCIA; OSTORERO, 2014).

Ainda cabe ressaltar que uma estrutura mal projetada pode ser instável, isso porque ripas muito finas podem ser levadas rapidamente a sua tensão resistente máxima, podendo romper, causando conseqüentemente o colapso da *gridshell*. Por esse motivo, a preocupação com a integridade do todo é uma prioridade para os projetistas estruturais, pois estes trabalham para aproveitar o máximo da capacidade resistente do material empregado, com segurança e obediência ao projeto arquitetônico. Uma estrutura sólida, como uma casca inteira, pode transferir cargas em todas as suas direções, entretanto, uma *gridshell* (casca em grelha ou vasada) só transmite cargas axialmente na direção das suas ripas (CAFFARELLO, 2016) (Figura 2.26).

Figura 2.26 – Esforços internos distribuídos em uma célula de casca (a) e em uma célula *gridshell* (b).

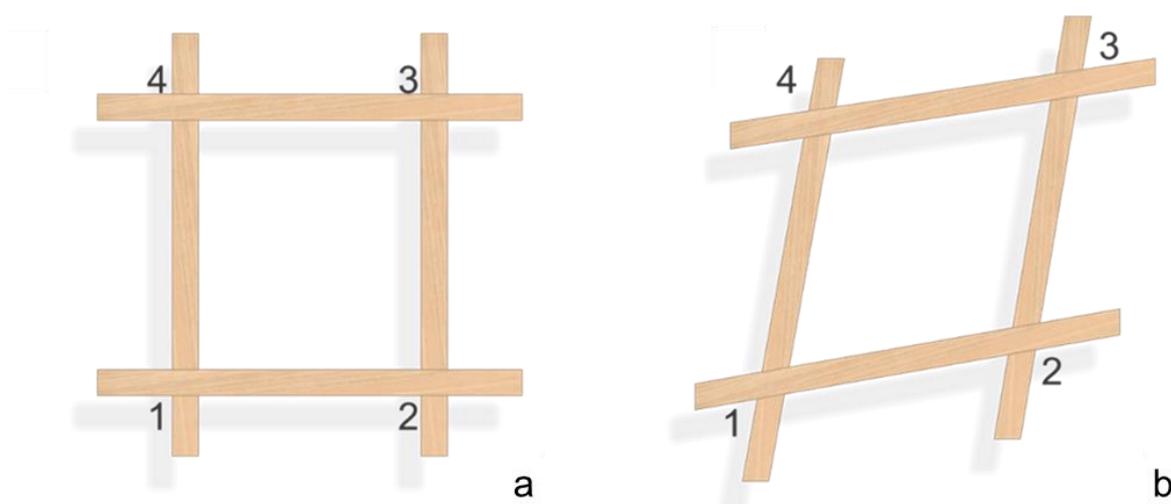


Fonte: Naicu, Harris e Williams (2014).

É importante destacar ainda que quando a grade de uma *gridshell* de camada dupla “pós-formada” ou de flexão ativa está sendo erguida, ocorre a rotação das ripas

nos nós, conferindo um aspecto de paralelogramo às células. Ocorre, também, o deslizamento das peças que compõem a camada exterior em relação à camada interna. As estruturas *gridshell* possuem um número bastante significativo de nós e, portanto, a escolha da articulação a ser usada nos cruzamentos é essencial para o sucesso da estrutura. Na montagem de uma grade, os comprimentos das diagonais são iguais (Figura 2.27a), entretanto, na elevação dessa grelha os comprimentos das diagonais passam a ser diferentes (Figura 2.27b).

Figura 2.27 – Antes da rotação das peças lamelares nas articulações (a) e depois da rotação (b).



Fonte: Collins e Cosgrove (2016).

Ou seja, após o encurvamento da trama uma das diagonais passa a ser maior que a outra. A Figura 2.27b exemplifica esse processo, no qual a diagonal 1-3 se torna maior do que a diagonal 2-4 em virtude da rotação das ripas (processo denominado *scissoring*, em inglês) (KELLY et al., 2011; COLLINS; COSGROVE, 2016).

Essa rotação das peças no momento da elevação é essencial no processo, mas ao atingir a curvatura desejada, a *gridshell* deve ser travada por meio de elementos diagonais para aumentar a rigidez do conjunto e a transmissão de esforços de corte na diagonal. Isso pode ocorrer através de segmentos de madeira, por exemplo, ou por meio de cabos de aço instalados na direção diagonal às unidades da trama.

## 2.7 Projetos inspiradores

Para desenvolvimento da malha, quatro outros projetos já executados anteriormente foram analisados com vistas à apreensão das técnicas usadas no processo construtivo das *gridshells*, são eles: (i) Wood Gridshell “NeT” ou Siracusa Gridshell; (ii) UMinho *Gridshell*; (iii) Woodome; (iv) UMass Timber Grid Shell.

O primeiro a ser detalhado foi desenvolvido na Universidade de Catania (Itália), construído em 2013 e chamado também de Siracusa Gridshell. Esse projeto foi bastante elucidativo, pois seus responsáveis detalharam com muita precisão a montagem e elevação do conjunto. A *gridshell* foi resultado de uma oficina experimental de madeira, que contou com a presença dos alunos de licenciatura em Arquitetura da Universidade de Catania (Figura 2.28).

Figura 2.28 – *Gridshell* construída na Universidade de Catania, Itália (2013). Parafuso sextavado usado e ao fundo montagem de módulo (a); Peças instaladas entre as camadas da grade e detalhes construtivos (b); Montagem da primeira camada de um dos módulos (c); Módulo pronto sendo movimentado (d); Parte da equipe envolvida no projeto e ao fundo projeção computacional da estrutura (e); Estrutura sendo molhada no momento da elevação (f); Sargento e peça de madeira usados no suporte a ponto crítico da grade durante encurvamento (g); Aspecto final da estrutura (h).



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=Pr3Alddaj70&t=236s>>; <<http://www.confindustriasr.it/public/allegati/Cantiere%20Didattico%20Sperimentale%202013%20%20Comunicato.pdf>> e <<http://www.agenda.unict.it/8328-net-la-gridshell-degli-studenti-di-architettura.htm>>.

A grade de madeira Wood Gridshell “NeT” (em português, Textura Natural Ecológica) é uma estrutura pós-formada, em “concha”, resistente à forma, feita no local de construção como uma treliça plana, e subseqüentemente submetida a uma ação de deformação que “induz” a estrutura a assumir a configuração final predefinida.

Esse é um modelo estrutural que faz parte de uma série de pesquisas e experimentos realizados sobre o tema pelo grupo de trabalho coordenado pelo professor Sergio Pone na Faculdade de Arquitetura de Nápoles. O protótipo foi feito em Siracusa, no período de abril a julho de 2013, com a colaboração de patrocinadores, e foi colocado em um pátio e destinado à sala de leitura.

A realização do protótipo está entre as atividades do “Canteiro Didático Experimental”, que é organizado anualmente pelo professor e arquiteto Luigi Alini. Após a experiência do “Pavilhão de papelão” (2009), do “DOME” (2011) e do “MoAbS” (2012), as pesquisas na área continuam sobre o uso inovador de materiais tradicionais na definição de sistemas de construção de alta eficiência (ZAMMÙMULTIMEDIA, 2013).

Com base nos estudos feitos sobre esse projeto, foi possível desenvolver a malha que deu origem à Dunas Gridshell, aqui proposta. Apesar de os projetos serem bastante diferentes nos detalhes, como número e tipo de ligações feitas, conexões entre módulos e dimensões das peças, em essência eles são bem semelhantes. Isso porque ambas as *grids* são constituídas por nove módulos e apresentam peças de travamento na horizontal, como pode ser observado na Figura 2.28h. Esse projeto também influenciou a opção pela dupla camada de ripas na formação da grade, em detrimento da camada única. Além disso, a presença dos furos alongados nas ligações também foi observada e replicada em parte das ligações da Dunas Gridshell.

O segundo projeto inspirador foi a construção da primeira malha estrutural em madeira de que se tem registro em terras portuguesas. A construção ocorreu durante o Workshop Malhas Espaciais em Madeira, realizado nos dias 13 e 14 de junho de 2016, na Universidade do Minho. A estrutura foi montada nos jardins da Escola de Arquitetura da UMinho, em Guimarães (Figura 2.29).

Figura 2.29 – Workshop Malhas Espaciais de Madeira, na Universidade do Minho, Portugal (2016). Vista superior dos nove módulos sendo montados (a); Uso de material de apoio (manual de montagem) (b); Peças instaladas para posterior amarração da estrutura na posição curvada (c); Grade pronta (d); Estrutura quase finalizada (peças de concreto oferecendo suporte aos pontos de apoio) (e); Aspecto final da *grid* (f).



Fonte: <<https://www.facebook.com/MalhasMadeira/>> e Barroso (2016).

Essa estrutura foi erguida por estudantes da Escola de Engenharia da UMinho, no âmbito das suas dissertações de mestrado e suas teses de doutorado nas áreas

de Arquitetura e Engenharia Civil. Ela resultou da deformação de uma grelha de madeira plana que se sustenta na significativa relação geometria-eficiência do sistema (RÁDIO FUNDAÇÃO, 2016).

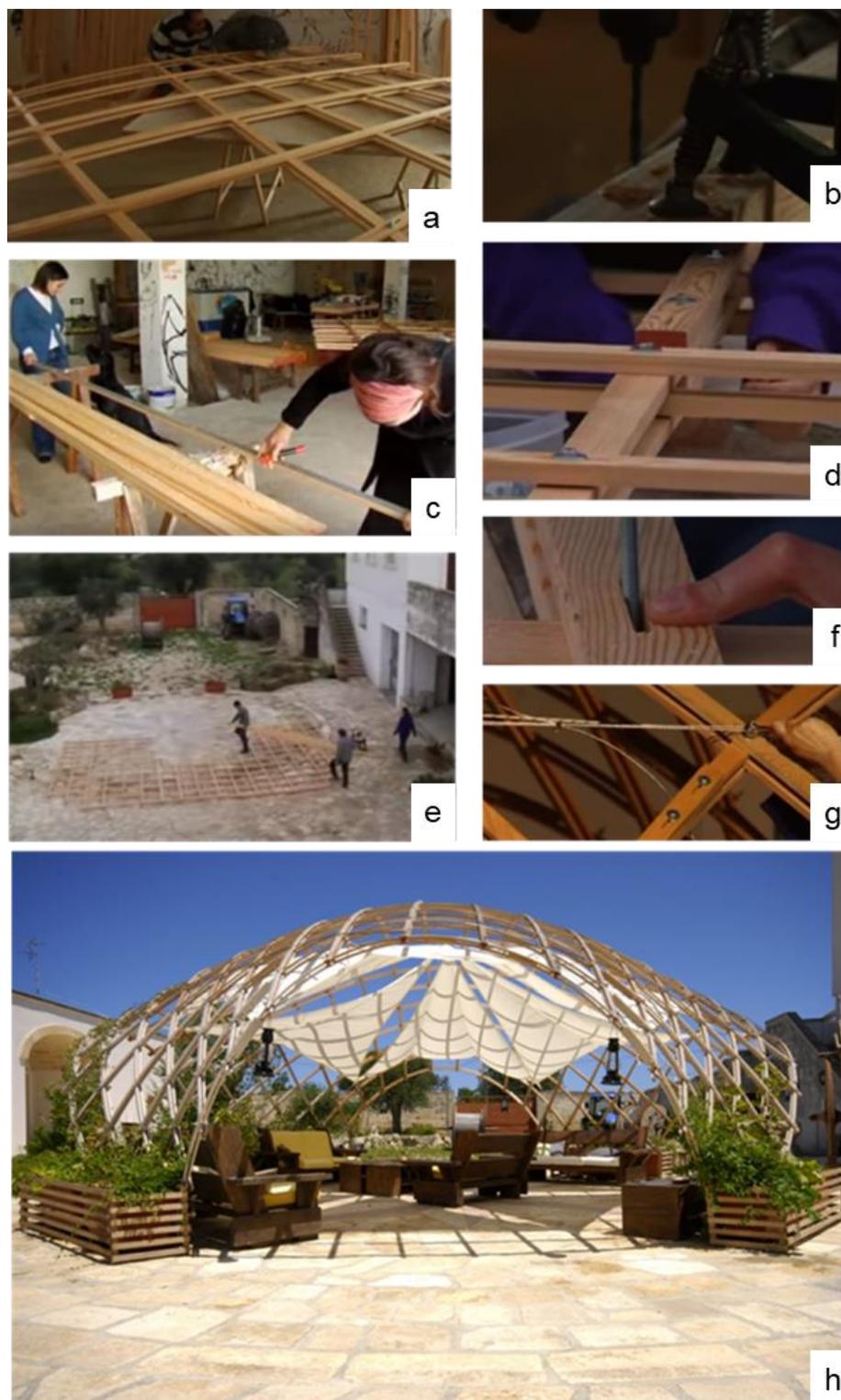
A obra foi erguida no decorrer do Workshop organizado pelos professores Jorge Branco e Bruno Figueiredo, pelo arquiteto Jorge Fernandes e pelo aluno João Barroso. Participaram do evento cerca de trinta pessoas, oriundas de diversas universidades, que também deram sua contribuição durante as várias fases de construção da malha (RÁDIO FUNDAÇÃO, 2016). Dessa forma, os voluntários tiveram uma experiência única de envolvimento, desde o projeto até a concretização do protótipo em escala real, o que proporcionou mais domínio desse sistema ainda pouco explorado (BARROSO, 2016).

Essa grade também foi dividida em nove módulos, incentivando ainda mais a confecção de uma malha fragmentada em partes para facilitação da montagem (Figura 2.29a). Outro detalhe também observado foi a confecção de um manual explicativo feito para auxiliar na montagem e união dos módulos (Figura 2.29b), o que serviu de inspiração para a elaboração de um material semelhante com informações pertinentes à obra.

O terceiro projeto examinado, realizado na Itália, é chamado de Woodome e foi construído na cidade de Lecce, nas dependências do Hotel Masseria Ospitale (Figura 2.30). O projeto foi do escritório CMMKM Architettura e Design, elaborado por Pia D'Angelo e Felice Grasso, que também participaram de sua construção juntamente com Bianca Parenti, Sergio Pone, Valeria Margheriti, Oronzo Trio e Ars Mea. Esse projeto ainda contou como o consultor estrutural Oreste Mammana (GRIDSHELL.IT, 2012).

Nesse projeto foi observada a forma de confecção das peças, envolvendo várias fases e equipamentos diferentes. Todas as etapas processo construtivo foram feitas pelos próprios participantes, que marcaram e furaram orifícios alongados nos elementos antes da montagem feita ao ar livre (Figura 2.30). Para erguê-la, foi necessário o uso de pontaletes de madeira e cabos de aço tracionados (Figura 2.30g). Todas essas estratégias descritas serviram de inspiração e estimularam a execução do projeto proposto ao longo desta dissertação.

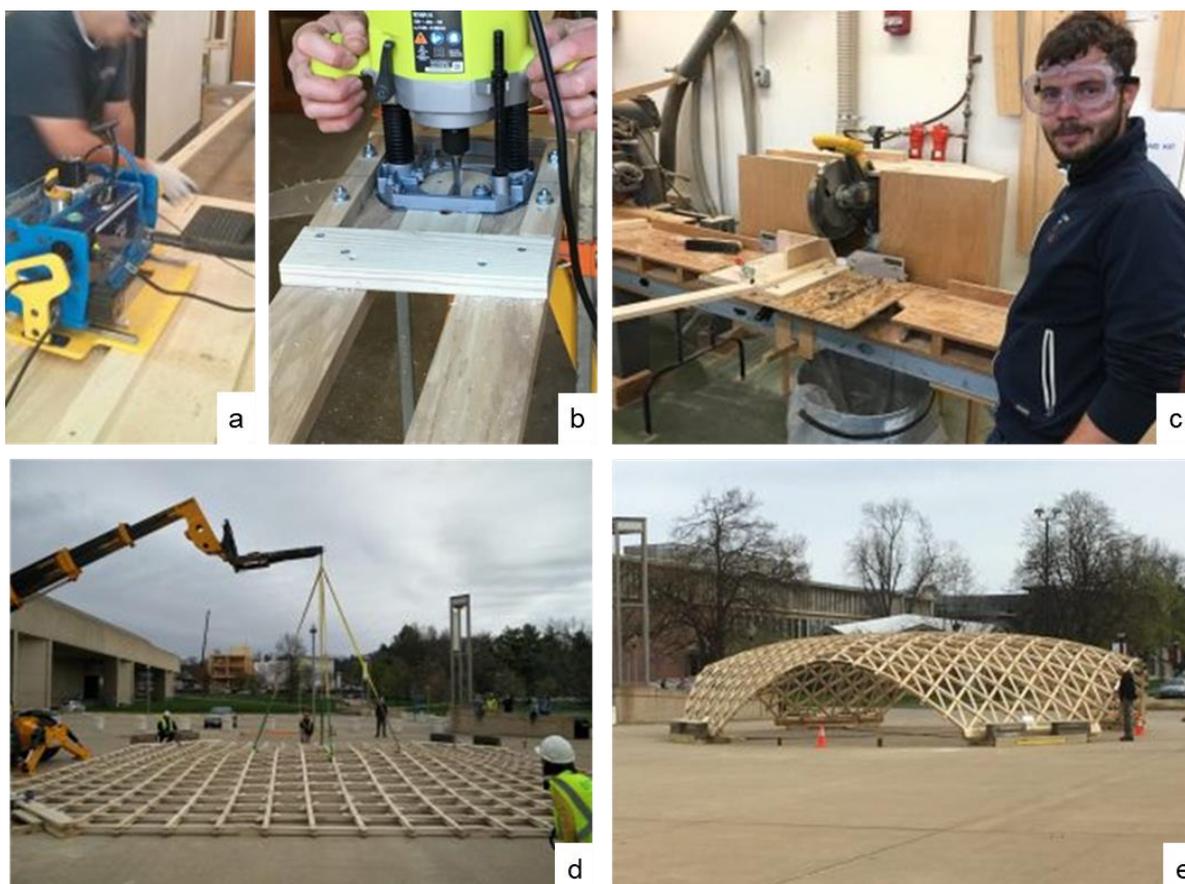
Figura 2.30 – Pavilhão no pátio do Hotel Masseria Ospitale, Lecce, Itália (2009). Montagem dos módulos ainda na oficina (a); Uso de furadeira de bancada na confecção dos furos nas peças (b); Medição e marcação das peças de madeira (c); Detalhe de nós onde as peças se cruzam em dupla camada (d); Montagem parcial da grade (sexto módulo sendo transportado) (e); Conexão das peças nos nós através de orifícios alongados (f); Uso de cabo de aço auxiliando o travamento final da grade já curvada (g); Estrutura finalizada e decorada (h).



Fonte: Gridshell.it (2012).

A quarta *gridshell* analisada foi um projeto criado na Universidade de Massachusetts Amherst, em 2016, nos Estados Unidos da América: “UMass Timber Grid Shell Wood on the Plaza”. A iniciativa pretendia montar uma exposição de arte pública sobre Arquitetura e Engenharia em Madeira na praça do Centro de Belas Artes da UMass, Amherst. Segundo seus organizadores, buscou-se demonstrar a beleza, a sustentabilidade e a sofisticação da nova era da construção com madeira. A chefe do projeto foi Peggi Clouston e a fabricação foi chefiada por John Fabel.

Figura 2.31 – Pavilhão “UMass Timber Grid Shell Wood on the Plaza”, EUA (2016). Equipamento para corte das peças (a); Tupia de coluna usada para rasgo dos furos alongados (b); Serra circular de bancada para corte das ripas nos comprimentos desejados (c); Grade pronta sendo içada por guincho (d); *Gridshell* finalizada (peças de travamento já instaladas) (e).



Fonte: <<http://woodontheplaza.info/>>.

Nesse projeto um guincho foi usado para içar a estrutura e facilitar sua envergadura, processo construtivo chamado *PULL UP* (Figura 2.31d). Além disso,

equipamentos de fácil manuseio, como tupa de coluna (Figura 2.31b), foram usados para a fabricação das peças. Para tal, observou-se a elaboração de gabaritos que ajudaram na preparação dos elementos, conferindo mais celeridade à produção. Todos esses detalhes foram estudados e adaptados à realidade do projeto a ser desenvolvido.

## CAPÍTULO 3

# Metodologia

Sendo uma pesquisa qualitativa, não foram usadas técnicas ou métodos estatísticos, portanto, os desdobramentos e problemas foram descritos e analisados indutivamente. A análise do exemplo real estimulou a compreensão dos questionamentos surgidos ao longo do trabalho, identificando os fatores que determinaram ou contribuíram para a ocorrência de diferentes fenômenos, dando causa aos problemas.

Essa pesquisa pode ser considerada como bibliográfica, pois foi elaborada a partir de material já publicado, principalmente na forma de artigos científicos de periódicos e eventos, livros, teses e dissertações disponíveis on-line em sua maioria. Entretanto, também ocorreram procedimentos classificados como experimentais, nos quais as variáveis influenciadoras foram identificadas, foram definidas as formas de controle e observados os efeitos produzidos nos objetos após os testes. Exemplo disso foram os ensaios de flexão da madeira realizados em alguns conjuntos de peças da estrutura, que serão oportunamente apresentados.

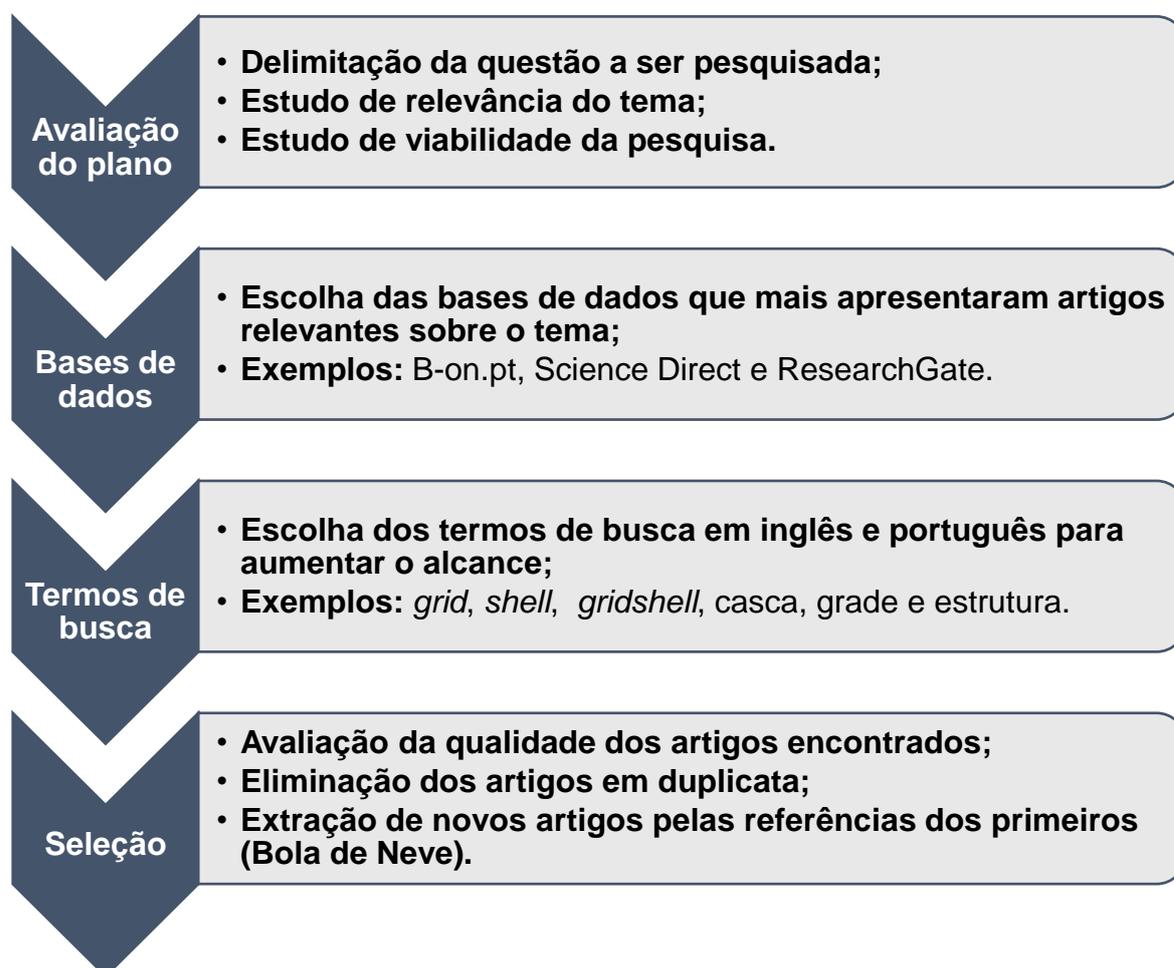
### 3.1 Coleta das informações

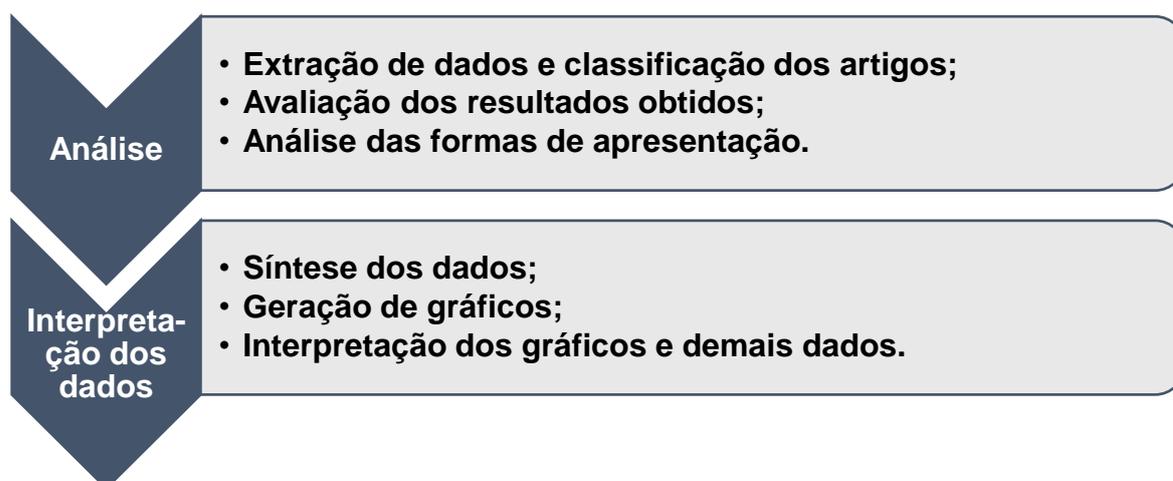
Para a coleta de informações a respeito do tema estudado, foram feitas buscas em bases de dados digitais, tais como: B-on.pt (Biblioteca do Conhecimento Online), SciELO, Science Direct, Google Acadêmico, Springer Link, HAL (Hyper articles en ligne) e ResearchGate e em repositórios de universidades nacionais e internacionais. As dissertações, as teses e os artigos considerados relevantes serviram de fonte de informação para o desenvolvimento desta dissertação. Porém, foi feito um trabalho mais aprofundado de coleta, triagem e classificação de todos os artigos científicos encontrados durante as buscas. Os resultados dessa pesquisa realizada trazem informações relevantes que serão citadas a seguir.

Portanto, nessa fase da pesquisa foi feita uma revisão de literatura, através do estudo de mapeamento sistemático (*Systematic Mapping Study*) dos trabalhos existentes na área, oferecendo condições de traçar um panorama geral sobre o tema *Gridshell*. Esse método se baseia em ações sistematizadas, ou seja, são capazes de serem reproduzidas por outros autores em trabalhos futuros, uma vez que os passos executados são bem definidos e preestabelecidos (Figura 3.1).

A revisão sistemática é, portanto, um método de pesquisa similar a *survey*, a principal diferença é que nesse os participantes são os estudos e não pessoas respondendo aos questionamentos. Pode-se dizer ainda que esse método tem o objetivo de sumarizar pesquisas prévias para testar hipóteses levantadas, responder perguntas ou ainda reunir evidências sobre determinadas hipóteses formuladas anteriormente (KOLLER; DE PAULA COUTO; HOHENDORFF, 2014).

Figura 3.1 – Passos metodológicos da coleta de informações (plano detalhado de mapeamento do tema).





Fonte: Elaborado pela autora.

Após a definição dos passos metodológicos da coleta de informações (Figura 3.1), as buscas foram iniciadas. No primeiro momento foram averiguadas as seguintes bases de dados digitais: B-on.pt, SciELO, Science Direct, Google Acadêmico, Springer Link, HAL e ResearchGate. Essas bases de dados congregam acervos de várias revistas e anais de eventos, fornecendo a estudantes e pesquisadores acesso a milhões de documentos científicos de periódicos, livros, patentes e obras de referência.

Essa primeira fase de buscas resultou no levantamento de repositórios de algumas editoras e revistas científicas com publicações frequentes na área, tais como: SAGE Publishing, Wiley Online Library, Elsevier e Taylor & Francis Online. Também foram identificados muitos veículos de publicação especializados no tema, a saber: International Journal of Space Structures (SAGE Journals), Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS), Engineering Structures (Journal – Elsevier), Automation in Construction (Journal – Elsevier), Computers & Structures (Journal – Elsevier), Building and Environment (Journal – Elsevier), Steel Construction: Design and Research (Wiley), Mobile and Rapidly Assembled Structures IV (WIT Press) e Meccanica (Springer). Além disso, foram encontrados anais de alguns congressos e conferências internacionais, bem-conceituados, que também foram incluídos na pesquisa, tais como: World Conference on Timber Engineering (WCTE), IABSE Symposium Report (Ingenta Connect Publication) e Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. Com o

objetivo de encontrar outros títulos, ainda foi realizado o mapeamento pelo método Bola de Neve (*Snowball Sampling*), para identificar artigos pertinentes ainda não selecionados anteriormente.

### 3.2 Triagem do material

Ao final de todo o trabalho de buscas, foram baixados 360 arquivos, que foram posteriormente triados, sendo 41 deles repetidos, os quais foram excluídos. Após essa primeira eliminação, houve a separação dos gêneros textuais, sendo encontradas e descartadas 5 apresentações (aulas ou palestras), 25 teses e dissertações, 1 catálogo de produtos, 3 livros e 35 notícias e reportagens. Portanto, foram selecionados para análise 250 artigos, dos quais 72 foram eliminados por não possuírem relação direta com o tema *gridshell*, mesmo contendo as palavras utilizadas na *string* de busca. Sendo assim, restaram 178 artigos que foram explorados individualmente e classificados como relevantes para o estudo (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Parte da planilha utilizada para triagem dos artigos.

TÍTULO	AUTORES	INSTITUIÇÕES DOS AUTORES	PAÍS	ANO DE PUBLICAÇÃO	ABORDAGEM	CLASSIFICAÇÃO	MATERIAL
Uso do sistema estrutural Gridshell na criação de formas complexas em estruturas de madeira	Maurício Kunz / Márcio Baldissera Prauchner	Faculdade Meridional / École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes	Brasil	2015	Teórica / Prática	1	Madeira
Typological and constructive transformations of spatial structures in Mexico. The Sports Palace for the XIX Olympics	Edwin González Meza / Jesús Anaya Díaz	Universidad Politécnica de Madrid	Espanha	2016	Teórica / Prática	3	Aço, alumínio, madeira e cobre
PROJETO ESTRUTURAL EM GRID SHELLS DE MADEIRA	Flavio Caffarello / Carlo Ostorero / Nilson T. Mascia	Unicamp / Politecnico di Torino / Unicamp	Brasil / Itália	2014	Teórica	2	Madeira

Fonte: Elaborado pela autora.

Os 178 artigos selecionados foram triados em uma planilha no Microsoft Excel (Figura 3.2) e descritos e/ou classificados quanto ao: (i) Título; (ii) Autores; (iii) Instituições dos autores; (iv) País(es) dos autores; (v) Ano de publicação; (vi) Abordagem (teórica/prática); (vii) Classificação do conteúdo; (viii) Material usado na confecção da *gridshell*; (ix) Veículo de publicação do artigo; (x) Base de dados; (xi) Número de citações do artigo por outros pesquisadores; (xii) Palavras-chave usadas no artigo; e (xiii) *String* de busca usada para encontrar arquivo na base de dados.

### 3.3 Indicadores analisados

#### 3.3.1 Evolução do número de publicações ao longo dos anos

Com o objetivo de não limitar o resgate de artigos nas bases de dados, não foram estabelecidos marcos temporais para a seleção das publicações, o que resultou na captura de artigos publicados desde 1983 até 2018 (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Evolução do número de publicações realizadas de 1983 a 2018.



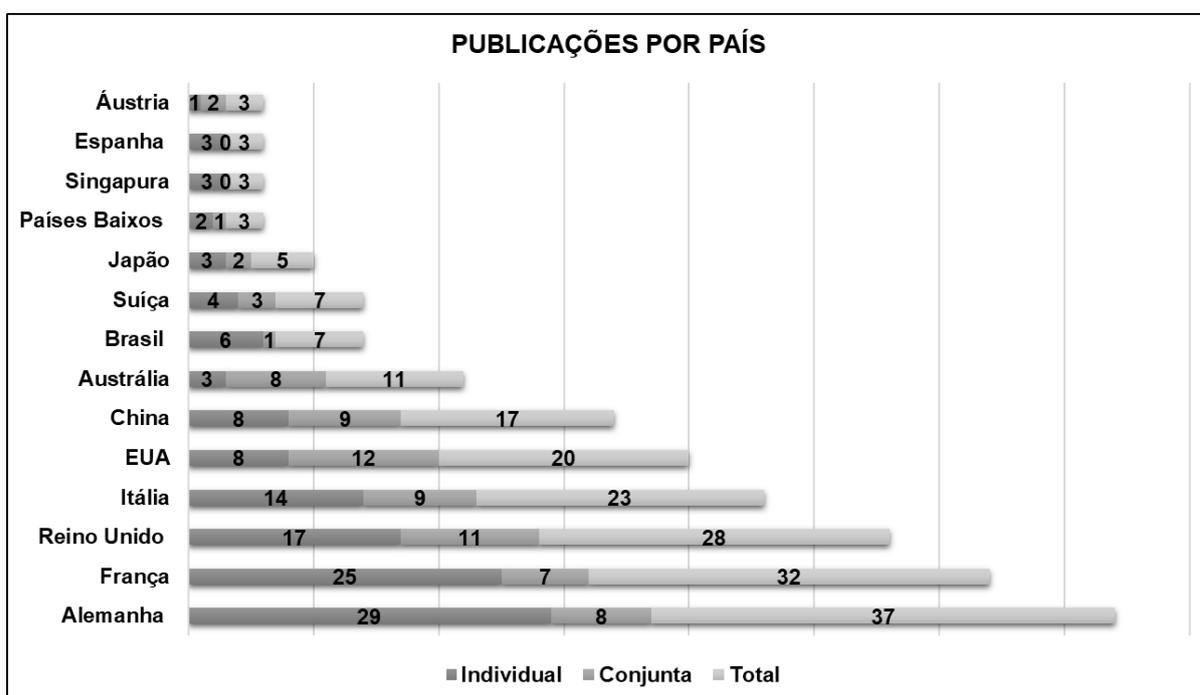
Fonte: Elaborado pela autora.

Salienta-se que houve um aumento considerável no número de publicações a partir do ano de 2013. O ano em que foram registradas mais publicações foi 2015, com 30 artigos encontrados. Diante desse cenário, observa-se que o interesse dos pesquisadores pelo assunto tem aumentado na última década, mas ainda é pequeno, considerando que foram encontrados apenas 178 artigos relevantes numa janela temporal de 35 anos. Isso demonstra o quanto ainda é preciso explorar o tema, havendo assim muitas possibilidades e potencialidades que podem ser desenvolvidas.

### 3.3.2 Publicações por país

O país que mais se destacou no número de publicações a respeito das *gridshells* foi a Alemanha, totalizando 37 artigos, sendo 29 individuais, ou seja, feitos apenas por pesquisadores alemães, e 8 feitos em conjunto com outros países, tais como: EUA, Reino Unido, França e Suíça (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Artigos feitos pelos países que mais publicam sobre o tema *Gridshells*.



Fonte: Elaborado pela autora.

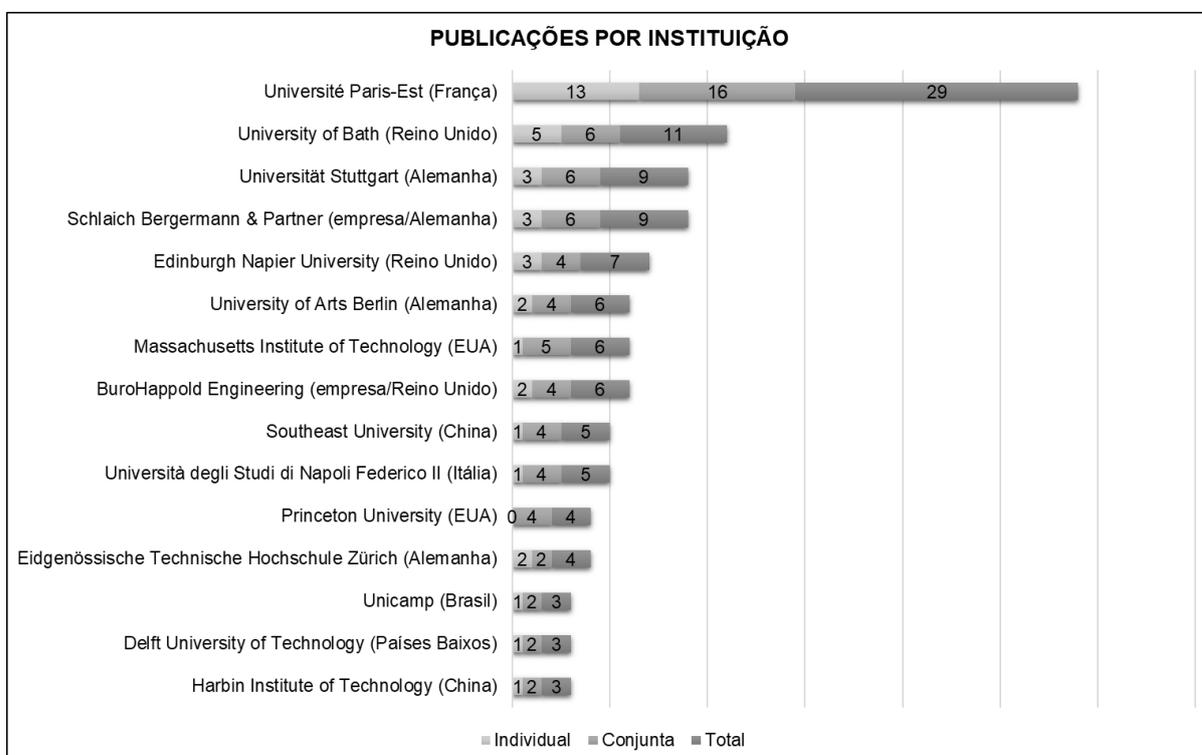
Em segundo lugar no ranking está a França, com 32 artigos, sendo 25 feitos só por pesquisadores do país e 7 em conjunto com instituições de outros países, como: Itália, Alemanha e EUA. Na terceira posição, temos o Reino Unido, com 28 publicações, seguido da Itália, com 23, e dos Estados Unidos da América, com 20 trabalhos. Observa-se ainda que o Brasil está na 8ª posição da lista, com 7 trabalhos, empatado com a Suíça e acima do Japão, com 7 e 5 artigos, respectivamente, na área. Salienta-se ainda que 6 dos trabalhos brasileiros foram originados de investigações realizadas apenas com pesquisadores do país e somente 1 publicação foi oriunda de parceria com estudioso da Itália. Existe ainda um trabalho que relata

uma na qual onde o cliente é brasileiro e algumas empresas que trabalharam na *grid* também são do Brasil, porém os pesquisadores que escreveram o artigo são de instituições alemãs. Frisa-se que esse trabalho foi usado como critério de desempate com a Suíça. Isso demonstra o quanto o assunto é pouco estudado em solo brasileiro, indicando a necessidade de envolvimento de novos pesquisadores na área e até mesmo a formação de parcerias entre universidades e empresas de outras nações.

### 3.3.3 Publicações por instituição

A Figura 3.5 apresenta a quantidade de publicações por instituição, sendo listadas apenas as que apresentaram o maior número de trabalhos. Esse gráfico, além de instituições de ensino e pesquisa, traz duas empresas, cujos engenheiros trabalharam em projetos inovadores e geraram artigos para publicação.

Figura 3.5 – Instituições que mais publicaram durante o período coberto pela pesquisa (1983-2018).



Fonte: Elaborado pela autora.

A universidade que mais fez estudos acerca das *Gridshells* foi a Université Paris-Est, localizada na França, com 29 artigos, dos quais 13 foram produzidos apenas por pesquisadores pertencentes à instituição e 16 foram feitos em conjunto com outras universidades. Em seguida, aparece a University of Bath, que fica no Reino Unido (Figura 3.5). Logo após, com 9 publicações, estão empatadas a Universität Stuttgart, da Alemanha, e a empresa também alemã Schlaich Bergermann & Partner. A única instituição brasileira que aparece na Figura 3.5 é a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), localizada em São Paulo, com três artigos na área.

Além das análises sistemáticas sobre a literatura encontrada, salienta-se ainda que o tipo de material empregado em cada *gridshell* descrita nos artigos foi destacado a fim de gerar informações sobre os tipos de insumo mais empregados para a confecção de *gridshells*. Desse modo, foi possível identificar que cerca de um terço das obras utilizaram a madeira como principal material de construção. Outro terço utilizou o aço como principal insumo empregado e o terço restante fez uso de materiais variados como epóxi, alumínio, fibra natural, *glass fibre reinforced plastics* (GFRP) – plástico ou polímero reforçado com fibra de vidro, compósitos, vidro, tubos de papel, favo de mel e até mesmo concreto armado. Destaca-se ainda que alguns artigos que tratavam de *shells* ou cascas construídas em concreto armado foram incluídos na pesquisa, uma vez que esses trabalhos traziam informações pertinentes ao tema *gridshell*. Todo esse levantamento demonstra que a madeira figura como material bastante importante quando o assunto é a construção de estruturas *gridshells*, o que reforça ainda mais a escolha desse material para a construção da *grid* aqui proposta.

### 3.4 Fases da pesquisa

Além da etapa de investigação do tema, coleta e análise de informações e confecção do referencial teórico, o projeto executado nesta dissertação abrangeu 18 fases que compreenderam atividades desde a concepção do projeto até a sua execução, demandando assim tempo e organização para seu desenvolvimento (Figura 3.6). O início da concepção do projeto ocorreu em dezembro de 2017, e em fevereiro de 2018 se deu a definição da geometria e a divisão desta em módulos. As demais atividades foram concluídas ao longo do ano de 2018, sendo a construção da

*grid* executada entre setembro e novembro do mesmo ano. Em janeiro de 2019 ocorreu a pintura da estrutura.

Figura 3.6 – Etapas do projeto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Essas fases principais e suas subetapas estão descritas nos próximos quatro capítulos desta dissertação.

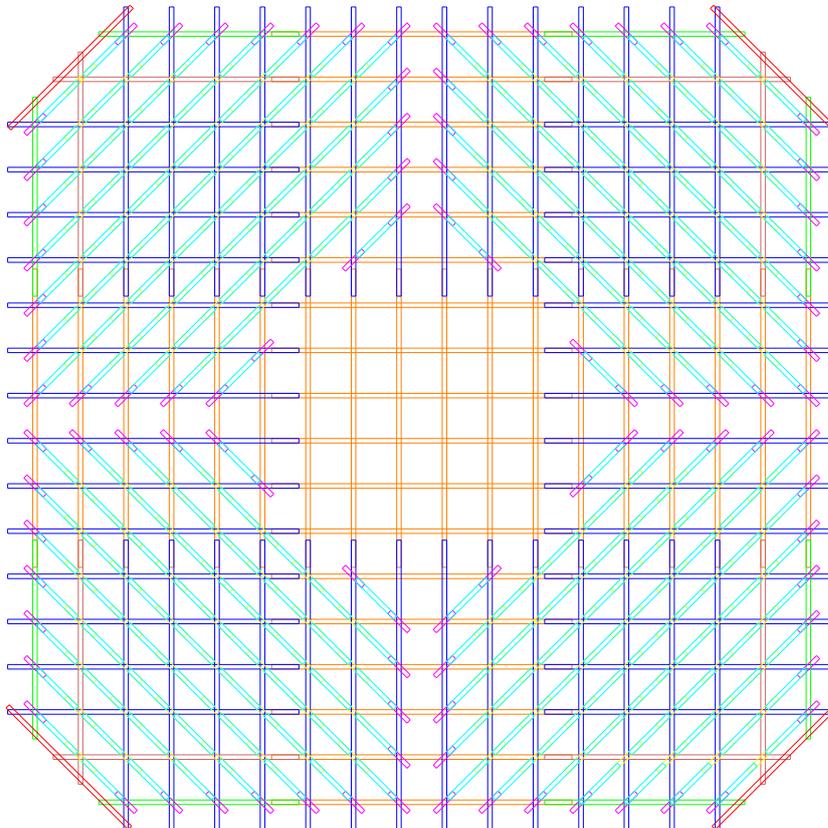
## CAPÍTULO 4

# Dos modelos à mão livre aos computacionais

### 4.1 Definição da geometria

O processo de definição da geometria foi realizado em etapas, sendo a primeira delas a concepção do modelo de grade pretendido em esboço, em seguida foi feita a projeção da estrutura no software AutoCAD® (2016). A estrutura foi projetada de forma que a grade fosse totalmente simétrica (Figura 4.1), para facilitar sua construção.

Figura 4.1 – Esboço do projeto em AutoCAD® (2016), mostrando as 712 peças em diferentes cores.



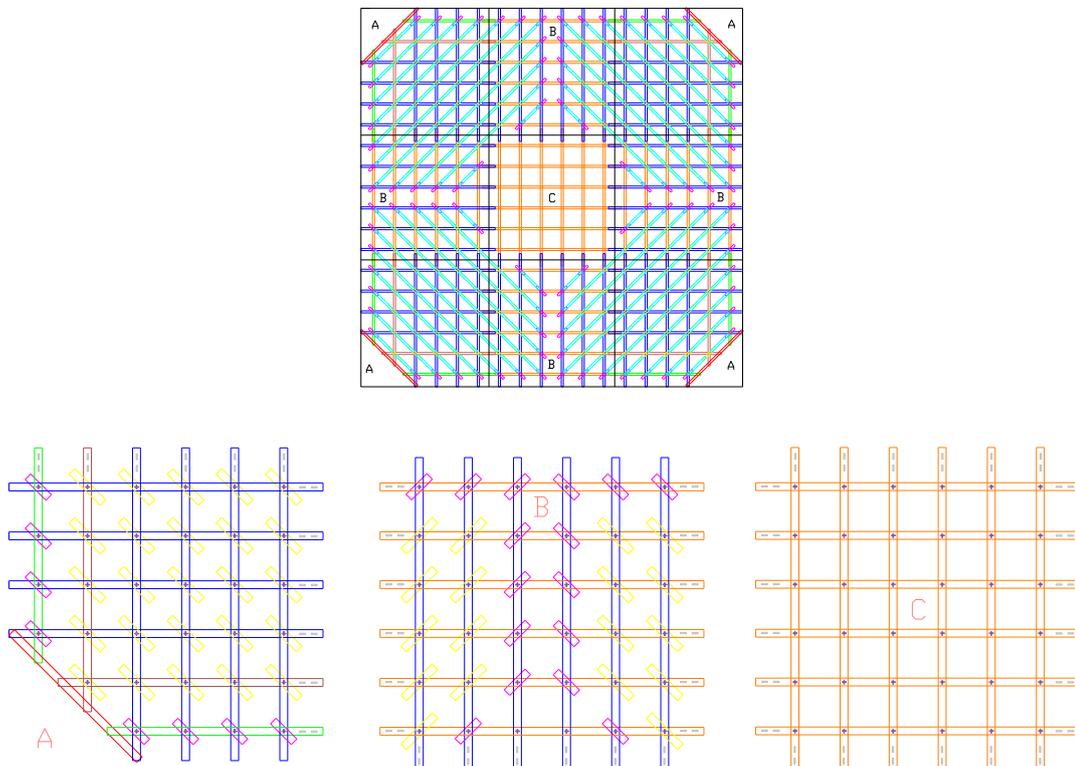
Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, o projeto foi concebido com cerca de 81,00 m<sup>2</sup>, ou seja, 9,00 metros de lado, no entanto, por dificuldades técnicas analisadas e limitações impostas pelo mercado das madeiras do RN, optou-se por modificá-lo e refazê-lo com 6,00 metros de lado aproximadamente.

#### 4.2 Divisão da estrutura em módulos

O projeto desenvolvido utilizou cerca de 0,69 m<sup>3</sup> de madeira, cortados em ripas de 5,00 cm de largura e 2,20 cm de espessura, em peças que variam desde 20,00 cm até 220,00 cm. A malha final, portanto, foi feita em formato quadrado, com 6,07 m de lado, com área de 36,84 m<sup>2</sup> antes de ser içada. Após a estrutura ser erguida, curvada e fixada, compreendeu uma área de cobertura equivalente a cerca de 16,00 m<sup>2</sup>. A *gridshell* abrangeu nove módulos, como mostrado na Figura 4.2. Cada módulo teve as dimensões de cerca de 2,00 x 2,00 metros, compreendendo três tipos diferentes.

Figura 4.2 – Esboço do projeto em AutoCAD® (2016), mostrando os nove módulos e seus três diferentes tipos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, o sistema estrutural foi concebido em pequenos núcleos que dão origem à grade final quando unidos. Esses conjuntos foram obtidos a partir da associação de elementos discretos, ripas de madeira de diferentes tamanhos, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Descrição das 712 peças a serem fabricadas.

<b>Peça</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>
<b>Tamanho (metros)</b>	2,2	2,13	1,8	1,47	1,27	0,40	0,30	0,20
<b>Número de Camadas</b>	2	2	2	2	2	1	1	1
<b>Cor</b>	Laranja	Azul	Goiaba	Verde	Vermelho	Ciano	Amarelo	Rosa
<b>Quantidade</b>	72	112	16	16	8	220	172	96
<b>Comp. total (metros)</b>	158,40	238,93	28,80	23,47	10,13	88,00	51,60	19,20

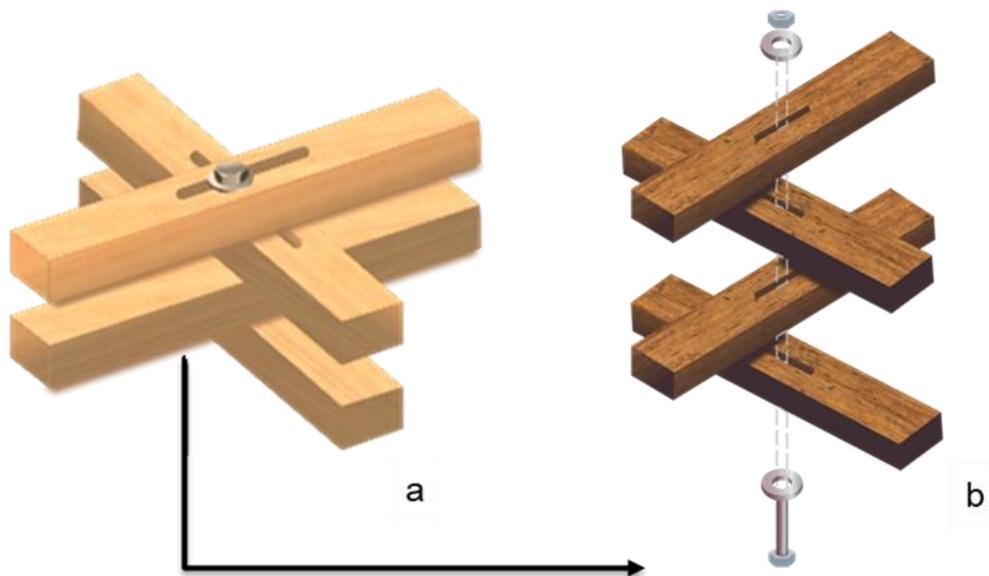
Fonte: Elaborado pela autora.

Em virtude da simetria do conjunto, houve apenas três modelos possíveis de grelha, chamados de módulos A, B e C, o que facilitou os planos de cortes e, conseqüentemente, a fabricação das peças.

### 4.3 Definição das furações e descrição das ligações escolhidas

Com base nos projetos analisados ao longo desta dissertação, foram escolhidos alguns tipos de ligações para a junção das peças da estrutura. Uma vez que o tamanho das peças influencia em seus custos, optou-se pela escolha de ripas com comprimento reduzido, sem que isso afetasse o desempenho da malha como um todo. Portanto, a grade foi projetada em dupla camada de ripas que se interligam em suas interseções (nós) através de parafusos rosqueáveis (Figura 4.3). Por isso, a grade foi considerada flexível, reversível e de baixo custo.

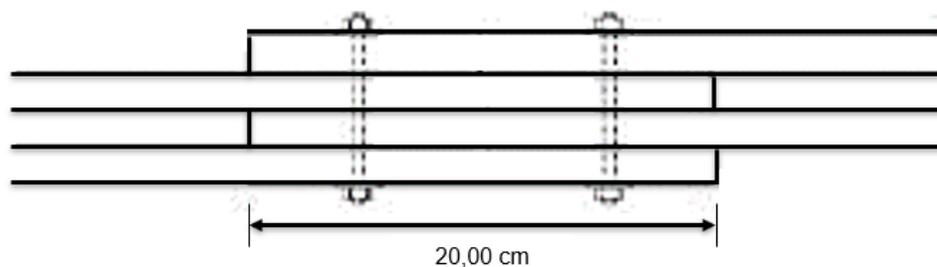
Figura 4.3 – Detalhe do nó dos pontos que compreendem duas camadas (a) e vista explodida dessa ligação (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante notar que os furos nos nós são alongados com o objetivo de permitir o deslizamento e acomodação das peças durante o encurvamento da grade (Figura 4.3). Essa necessidade surgiu em virtude do tipo da malha, classificada como elástica ou de flexão ativa. Já para unir os conjuntos, a melhor solução foi investir na sobreposição de 20,00 cm das peças entre módulos (Figura 4.4), de maneira que as cargas se transferissem entre os elementos.

Figura 4.4 – Ligação de continuidade entre módulos com sobreposição de 20,00 cm.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado na Figura 4.4, os elementos das duas camadas foram sobrepostos de modo que se encaixassem, permitindo assim que uma única ligação de continuidade fosse realizada. Isso tornou a malha mais linear e concisa, o que facilitou a sua construção e diminuiu o custo das ligações. Essa mesma estratégia já foi usada inúmeras vezes em projetos similares ao aqui apresentado, como exemplo pode-se citar a Siracusa *Gridshell* (Figura 4.5a).

Figura 4.5 – Conexões com orifício alongado, Siracusa *Gridshell*. Sobreposição das peças entre módulos com uso de três parafusos unindo-as (a); Interseção das camadas em nó de continuidade, conexão com parafuso de rosca infinita (b); Módulo em montagem, parafusos ainda sem arruelas e porcas (c).

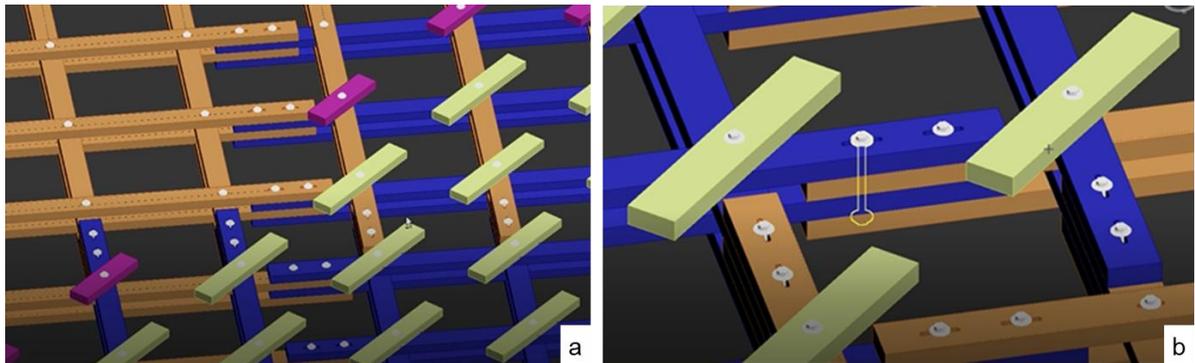


Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=Pr3Alddaj70&t=236s>>.

Entretanto, nesse caso, a ligação foi realizada com três parafusos contínuos, ao invés de dois (Figura 4.5a). Vale destacar que todos os furos alongados foram projetados com 40,00 mm de comprimento e 6,00 mm de diâmetro e sendo

posicionados de forma simétrica em todas as peças, permitindo assim conexão com o módulo seguinte (Figura 4.6).

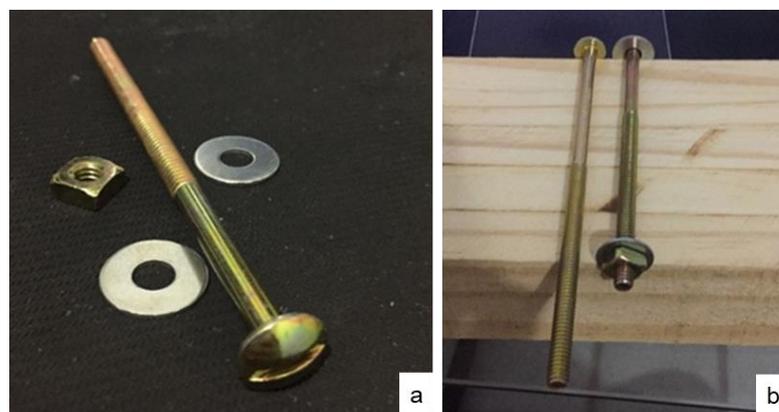
Figura 4.6 – Interseção entre módulos, junção de continuidade formada por dois parafusos (a); Detalhe das furações alongadas para permitir adaptação da malha no momento de flexão das peças e parafuso ultrapassando todas as peças na ligação (b). Projeto feito no 3ds Max® (2018).



Fonte: Elaborado pela autora em conjunto com os arquitetos Lobão e Silva (2018).

A Figura 4.6 mostra, portanto, as interligações dos módulos entre si por meio ligações duplas alongadas, de conexões constituídas por parafusos de cabeça de fenda (conhecidos como “parafusos de cama”). Foram escolhidos parafusos de rosca parcial de 6,00 mm de diâmetro ( $d$ ) e comprimento ( $L$ ) variando entre 120,00 e 150,00 mm, conforme a Figura 4.7b. Essa opção foi considerada a mais viável técnica e economicamente.

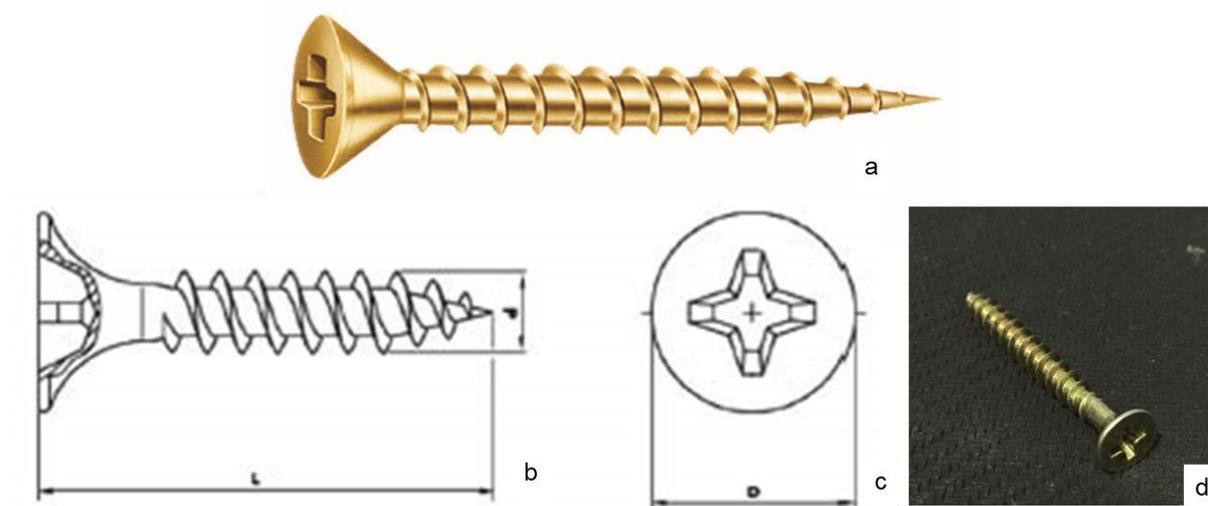
Figura 4.7 – Tipo de parafuso, arruela e porca selecionados para a montagem dos módulos (a); Comprimentos escolhidos para os parafusos (b); (Especificações: Diâmetro ( $d$ ) = 6,00 mm; Comp. ( $L$ ) = variável – 120,00 mm e 150,00 mm);



Fonte: Acervo pessoal.

A estrutura foi preconcebida para ser conectada por 456 parafusos, 456 porcas e 912 arruelas, isso apenas na primeira parte de sua montagem, para a formação da grelha linear (modelos de parafusos na Figura 4.7). Após essa etapa, foram necessários mais 440 parafusos autoatarraxantes para a fixação das peças de travamento da estrutura na posição final (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Parafuso selecionado para a fixação das peças de travamento da estrutura (Especificações: Parafuso de rosca autoatarraxante; Diâmetro ( $d$ ) = 4,00 mm; Cabeça: Chata; Fenda: Philips; Comp. ( $L$ ) = 40,00 mm; Ponta: agulha); Parafuso renderizado (a); Projeto do parafuso (b); Parafuso adquirido (c).

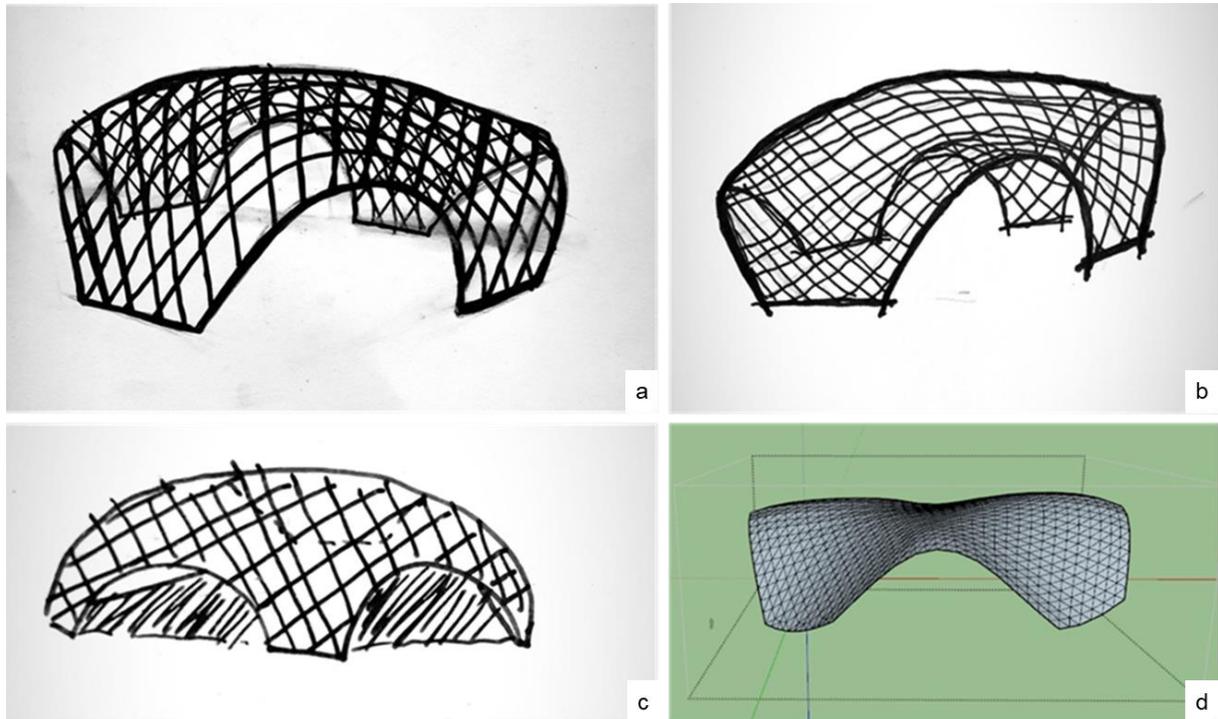


Fonte: <<http://ciser.com.br/htcms/media/images/linhas/originals/391.jpg>> e acervo pessoal.

#### 4.4 Estudos preliminares da forma

Para melhor compreensão do funcionamento da malha após a flexão, alguns desenhos esquemáticos em três dimensões foram feitos, inicialmente à mão livre (Figura 4.9a, b, c), e em seguida com o auxílio do software *SketchUp* (2017) (Figura 4.9d). Embora as formas ainda fossem sem as exatas dimensões, elas fizeram parte da evolução dos estudos da malha projetada (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Primeiras projeções da estrutura após a flexão. Desenho à mão livre demonstrando a curvatura das peças (a); Tentativa de retratar a posição dos arcos (b); Projeção dos apoios (c); Tentativa de projeção usando o software *SketchUp* (2017) (d).

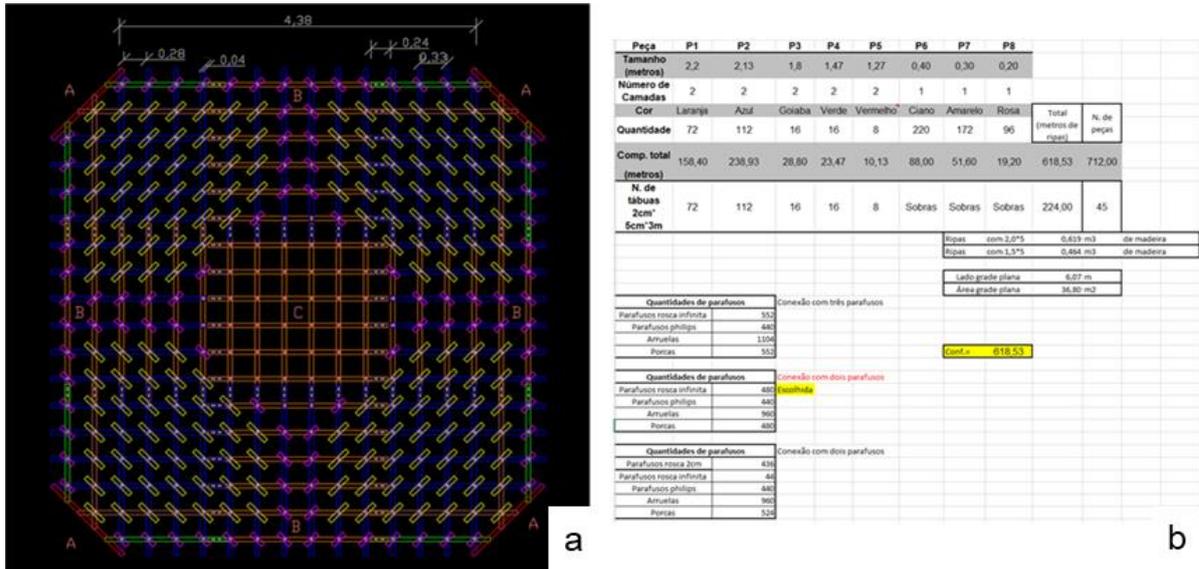


Fonte: Contribuição de Juliana Silva Barros (2018).

#### 4.5 Definição dos softwares e suas características

O processo de escolha dos softwares a serem utilizados na representação do projeto não foi simples, dada a complexidade das formas curvas da estrutura. Para otimizar o tempo, e trabalhar o essencial antes da construção, foi preciso definir as ferramentas computacionais que auxiliariam o processo de modelagem em cada fase. Por isso, inicialmente foram feitos desenhos no AutoCAD® (2016), em apenas duas dimensões, e em seguida planilhas Excel foram desenvolvidas para auxiliar na contabilização das diferentes peças de madeira e seus conectores metálicos (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Exemplos dos dados utilizados para a modelagem; Vista superior da grade feita no AutoCAD® (2016) (a) e planilha Excel (b).



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nesses dados iniciais, foram usados os programas *SketchUp* (2017) e *3ds Max*® (2018). Em seguida, para complementar a modelagem, optou-se também pelo uso do *Unreal Engine 4.20* (2018), dada a sua capacidade de interoperabilidade com o *3ds Max*® (2018). Desse modo, foi possível importar o modelo produzido no *3ds Max*® (2018) e aplicar-lhes texturas e efeitos para renderização, gerando imagens mais realistas do modelo.

#### 4.5.1 3DS MAX®

O software *3ds Max*® (2018), anteriormente chamado de *3D Studio Max*, foi desenvolvido com o objetivo de facilitar tarefas de modelagem em 3D, animações e renderizações 3D em alta qualidade. Esse programa é oriundo do MS DOS e hoje é eficaz na visualização de projetos de arquitetura e experiências em realidade virtual. Ele ainda tem a interoperabilidade considerada bastante flexível, ou seja, é capaz de se comunicar de forma eficaz com outros programas (semelhantes ou não), sendo compatível com o Revit, Inventor, Fusion 360 e também o SketchUp, Unity e Unreal (AUTODESK, 2018).

#### 4.5.2 UNREAL ENGINE 4

O programa *Unreal Engine 4.20* (2018) é usado para desenvolvimento de jogos eletrônicos (EPIC GAMES, 2018). Seu núcleo é escrito na linguagem de programação computacional C++ e possibilita a portabilidade. Ele pode funcionar em múltiplas plataformas, incluindo Microsoft Windows, Linux, Mac OS e Mac OS X.

#### 4.6 Modelagem

O processo de modelagem foi realizado com base em dados tabelados contendo o quantitativo e o dimensionamento dos componentes da *gridshell*, juntamente com os arquivos em formato CAD, contendo vistas de topo da *gridshell*. A modelagem proporcionou inúmeras alterações no projeto e auxiliou na visualização de muitos detalhes construtivos. Destaca-se dentre essas alterações a unificação da dimensão dos furos alongados das peças, modificados para terem comprimento de 40,00 milímetros e diâmetro de 6,00 milímetros, mudança que facilitou a produção dessas em fase futura do projeto. Outra questão que se pôde prever foi a posição intercalada dos módulos na grade final, o que permitiu sua planicidade e aparência uniforme após a curvatura definidas após avaliações do processo (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Reunião com grupo de trabalho para discussão de detalhes construtivos.



Fonte: Acervo pessoal.

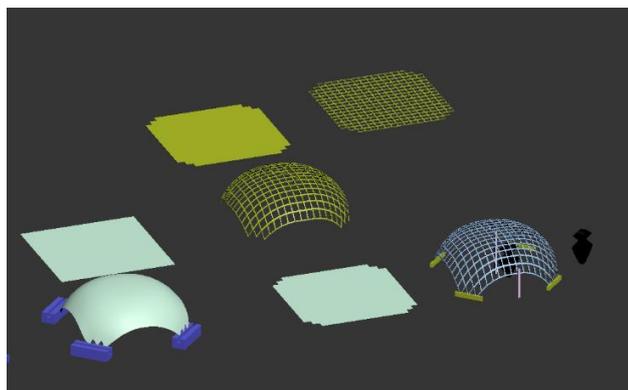
Com a importação dos arquivos para o *3ds Max*® (2018), foi realizada uma simulação da ordem de montagem das peças, sendo possível visualizar, por exemplo, que os quadrantes A e B possuiriam duas versões diferentes cada, devido ao encaixe entre eles.

Para a modelagem dos furos nas barras, os espaçamentos foram modelados como peças separadas e posicionados onde estariam os furos. As barras no modelo foram furadas com o comando *proboolean*, onde uma peça se subtrai da outra. As operações foram realizadas e os furos foram feitos no sentido correto em todas as peças simultaneamente. O *proboolean* removeu automaticamente os modelos usados para subtrair, restando apenas as peças da *gridshell*.

Além disso, foram criados modelos aproximados dos parafusos e porcas, os quais foram importantes para perceber que, após a montagem da estrutura, alguns parafusos permaneceriam passando pelas peças, enquanto outros estariam completamente escondidos dentro da madeira, dependendo do posicionamento e da quantidade de peças que conectariam.

Com as peças de madeira e metais modelados e posicionados, foi possível exportar imagens individuais e coletivas de cada peça, do quadrante e da *gridshell* completa. As imagens individuais das peças em madeira foram cotadas para as seguintes finalidades: confecção da estrutura de ensaio para análise da curvatura; criação do manual de montagem da *gridshell*; corte e furação das peças e registro geral dos dados. Além dessa modelagem, protótipos também foram criados no *3ds Max*® (2018), na tentativa de visualizar as alturas que os arcos da *gridshell* teriam quando curvados (Figura 4.11).

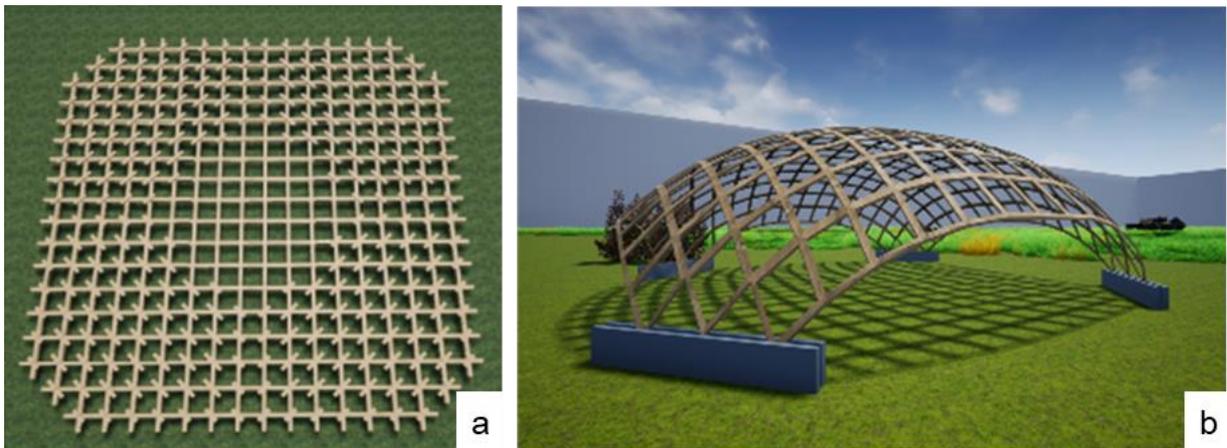
Figura 4.12 – Experimentos com a volumetria no *3ds Max*® (2018).



Fonte: Contribuição dos arquitetos Lobão e Silva (2018).

Antes mesmo da finalização da modelagem tridimensional, as peças de madeira trabalhadas no *3ds Max*® (2018) foram exportadas para o programa utilizado para visualização arquitetônica (renderização das imagens), o *Unreal Engine 4.20* (2018). Esse procedimento foi responsável pela melhor visualização da estrutura final, sendo um importante aliado na apresentação do projeto. Uma exportação no formato *fbx* do *3ds Max*® (2018) pôde ser importada para o *Unreal Engine 4.20* (2018), resultando em uma malha similar à produzida pelo software de origem. Os materiais foram então configurados e aplicados, e como resultado foi obtido o *render* em tempo real. O software utilizado permitiu ver tanto a *gridshell* antes de sua curvatura (Figura 4.13a), como as possibilidades analisadas após a curvatura final da estrutura (Figura 4.13b).

Figura 4.13 – (a) Renderização da malha não curvada (esquerda) e (b) renderização de uma das estimativas de curvatura da *gridshell* (direita).



Fonte: Elaborado pelos arquitetos Lobão e Silva (2018).

Dada a natureza do software (utilizado largamente para elaboração de jogos eletrônicos), foi possível visualizar em tempo real sua renderização e fazer capturas de tela de forma instantânea (Figura 4.13).

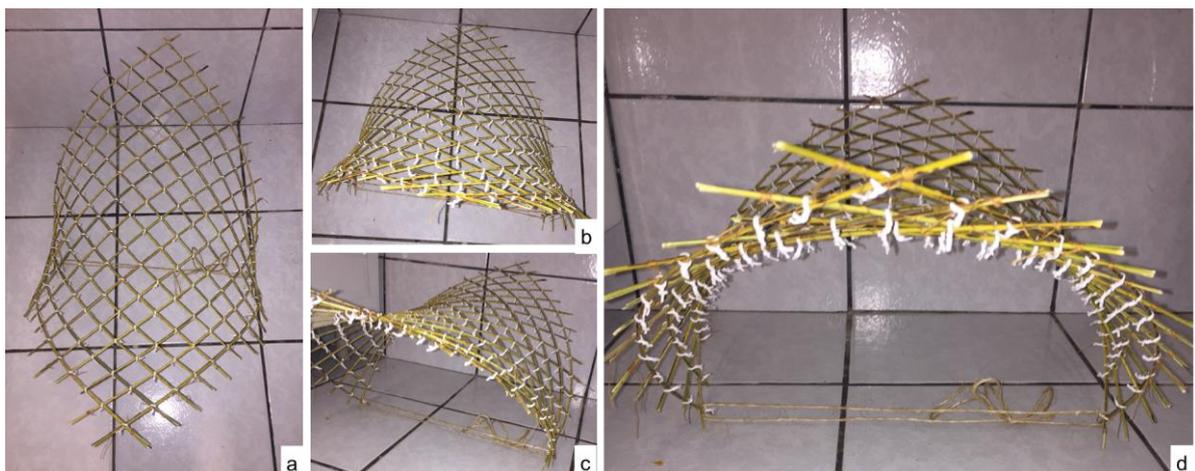
## CAPÍTULO 5

# Modelos físicos e processo *form-finding*

### 5.1 Análise da forma por meio de modelo inicial

Com o intuito de estudar melhor o comportamento das malhas elásticas de madeira, foi construída uma maquete utilizando palha de coqueiro, linha e arame plastificado (lacres). Esse primeiro modelo físico executado foi uma grade de apenas uma camada (um *layer*) que serviu para estudo das várias formas geométricas possíveis de serem adotadas com o emprego do sistema construtivo das *gridshells* (Figura 5.1). Com base nas análises feitas com uso desse exemplar, a forma a ser alcançada foi vislumbrada e o número de camadas foi definido. Salienta-se que o mesmo material foi empregado para realização do modelo em escala, apresentado a seguir, no item 5.3 deste capítulo.

Figura 5.1 – Primeira malha feita como modelo inicial. Vista superior com dois apoios no solo (a); Vista superior com três apoios no solo (b); Vista lateral com dois apoios no solo (c); Vista frontal com dois apoios no solo (d).



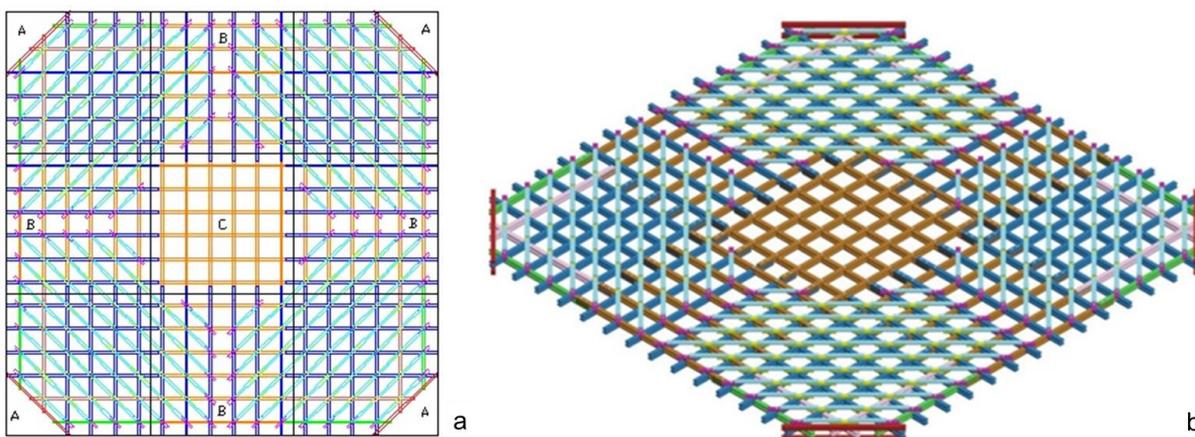
Fonte: Acervo pessoal.

## 5.2 Adequações e melhorias do projeto

Vale frisar que o trabalho desenvolvido se detém ao estudo do processo construtivo de uma *gridshell*, desde o projeto até sua montagem. Dada a impossibilidade de se deter à análise estrutural da *gridshell* projetada por meio de softwares, optou-se por uma análise estrutural empírica baseada em maquetes em escala reduzida, como passo inicial, e ensaios de peças nas mesmas dimensões projetadas (*mockups*) para a execução final, como passo posterior.

Para facilitar o trabalho de montagem da maquete, com base na vista superior da grade em AutoCAD® (2016) (Figura 5.2a), foi feito um desenho 3D (com três dimensões) da malha (Figura 5.2b). Isso permitiu a melhor visualização dos elementos e facilitou a montagem dos nove módulos da estrutura separadamente, que em seguida foram unidos.

Figura 5.2 – (a) Grade plana dividida em nove módulos (esquerda) e (b) grade em 3D mostrando suas duas camadas (direita).



Fonte: (a) Elaborado pela autora e (b) contribuição dos arquitetos Lobão e Silva (2018).

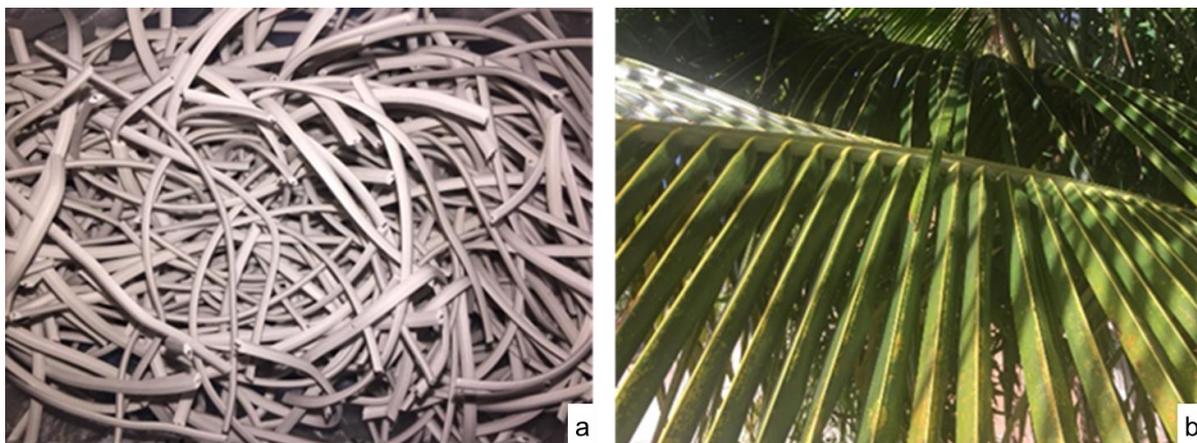
O primeiro projeto de grade foi elaborado com a área de 81,00 m<sup>2</sup>, mas como já discutido, esse foi reduzido em 1/3, ficando assim com 6,07 metros de lado e uma área aproximada de 36,84 m<sup>2</sup>. Essa redução da malha tornou-se vantajosa do ponto de vista dos custos, diminuindo gastos com madeira e conexões metálicas.

## 5.3 Montagem da maquete em escala

### 5.3.1 Passo a passo da montagem da maquete

Passo 1: Escolha dos materiais – Para atingir a curvatura desejada para a malha, foi necessária a seleção de materiais flexíveis e de fácil acesso. Para tal, foi escolhido o lacre plástico para execução das conexões (Figura 5.3a) e palito da palha de coqueiro (Figura 5.3b), para a representar as lamelas, sendo estas previamente limpas e processadas (Figura 5.4a).

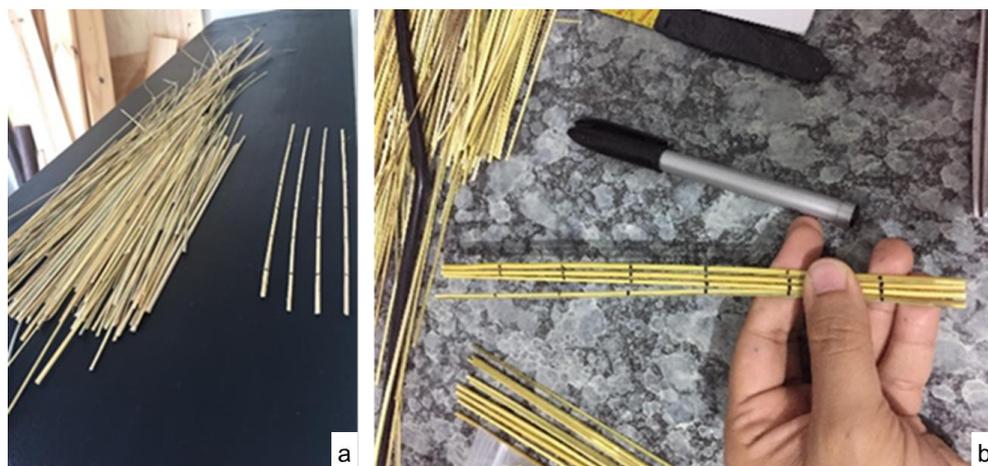
Figura 5.3 – (a) Lacres plásticos (esquerda) e (b) palhas de coqueiro (direita).



Fonte: Acervo pessoal.

Passo 2: Corte e marcação das peças – A malha real foi diminuída dez vezes para a execução da maquete, portanto ficando numa escala de redução de 1:10. Ao todo, foram feitas 224 peças, sendo essas: 72 com 22,00 cm, 112 com 21,30 cm, 16 itens com 18,00 cm, 16 com 14,70 cm e 8 com 12,70 cm. É interessante observar que os elementos de travamento (pequenas peças nas cores ciano, rosa e amarelo) não foram confeccionados, pois em virtude do tamanho da estrutura, a função deles seria comprometida. Depois que as peças estavam cortadas no tamanho certo, foram marcadas para que assumissem a posição correta na hora da junção (Figura 5.4b).

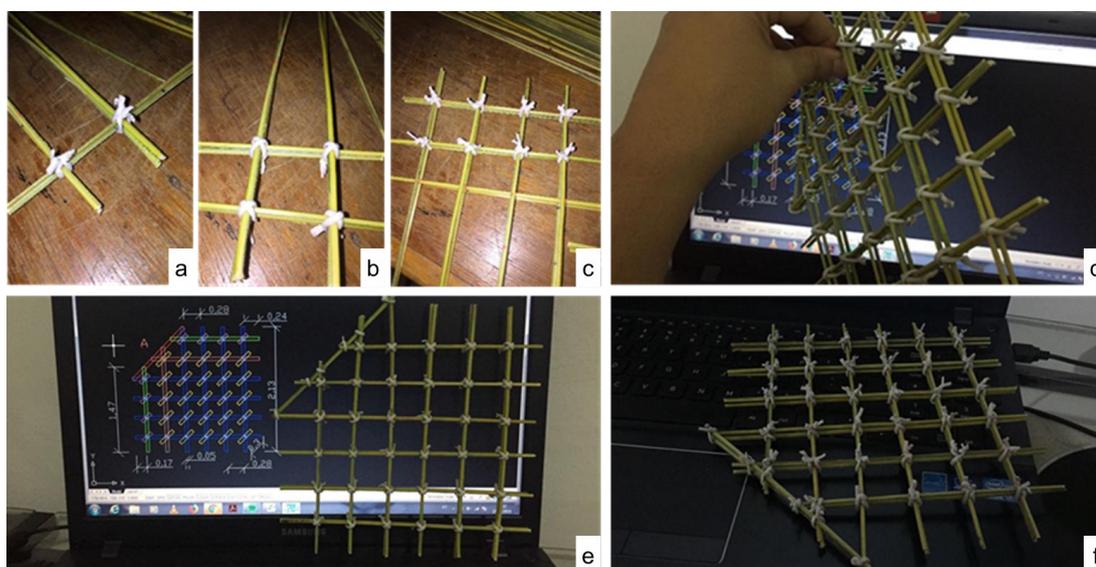
Figura 5.4 – (a) Seleção dos palitos de coqueiro; (b) Marcação das peças já cortadas.



Fonte: Acervo pessoal.

Passo 3: Montagem dos módulos – Dada a presença de duas camadas na estrutura real, optou-se por manter a mesma configuração na maquete. Cada ligação foi feita usando dois lacres, formando uma amarra em “X” que ofereceu mais estabilidade ao conjunto (Figura 5.5a). Porém não houve travamento total das peças, permitindo assim, a mobilidade necessária para a flexão da malha como um todo (Figura 5.5). Ou seja, as peças puderam deslizar umas sobre as outras quando fletidas.

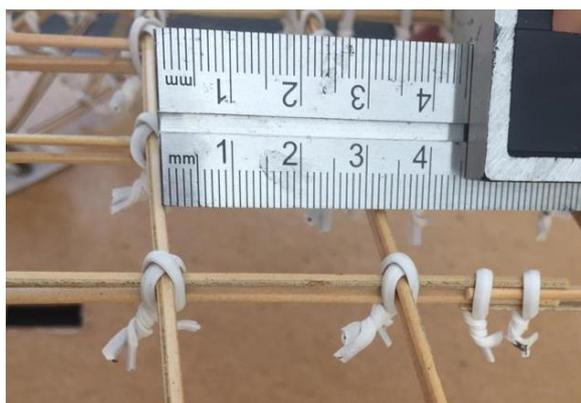
Figura 5.5 – Detalhes das conexões feitas com lacres e montagem dos módulos. Primeiros passos para montagem de um módulo (a); Confeção gradativa das ligações (b, c); Módulo visto lateralmente (d); Maquete de módulo sendo comprada ao projeto (e); Módulo finalizado (f).



Fonte: Acervo pessoal.

Por uma limitação do diâmetro dos palitos de coqueiro, os espaçamentos entre as lamelas da malha precisaram ser adaptados. Na estrutura real, a distância planejada foi de 28,00 cm, o que na maquete corresponderia a 2,80 cm. Porém, esse espaço correspondeu a 3,20 cm aproximadamente, como mostra a Figura 5.6.

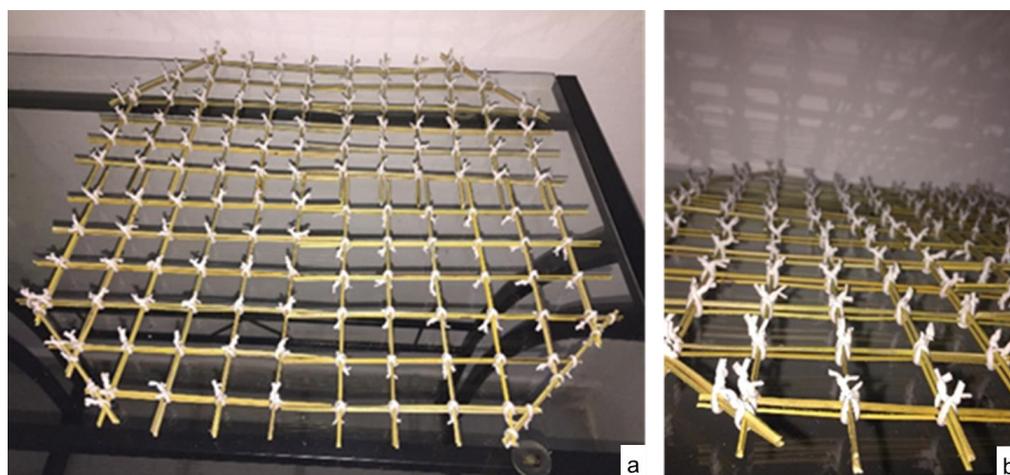
Figura 5.6 – Largura da trama.



Fonte: Acervo pessoal.

Passo 4: União dos módulos – Cada módulo foi executado tomando-se o cuidado de avaliar a posição das peças na junção com o próximo módulo, uma vez que a grade final pudesse permanecer nivelada (Figuras 5.7).

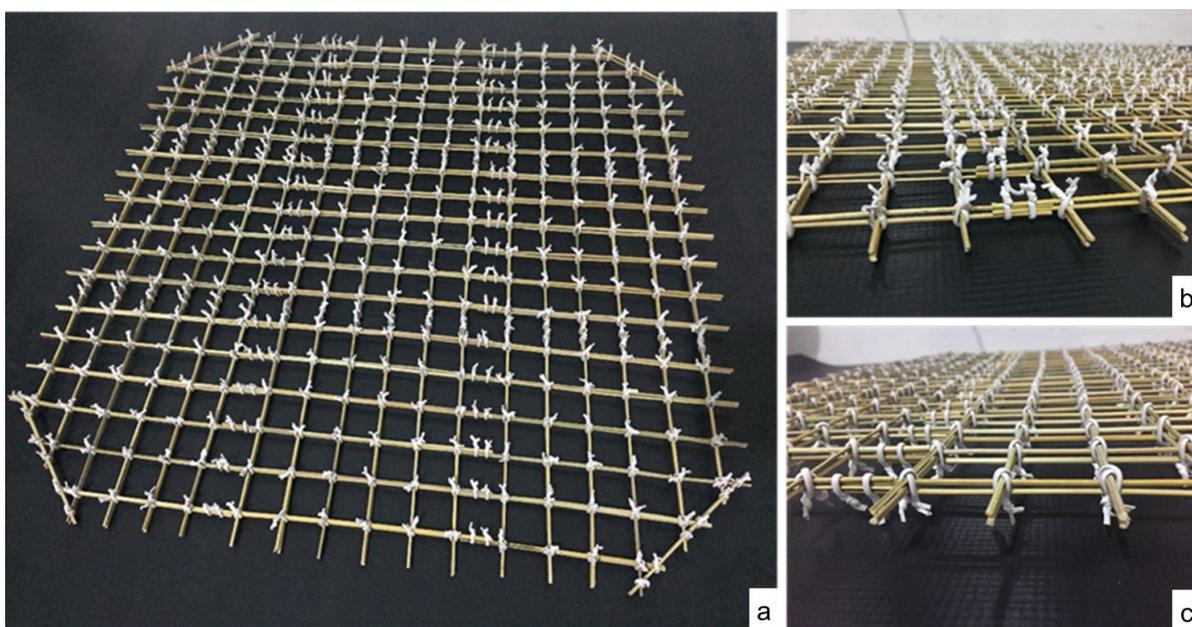
Figura 5.7 – Todos os módulos do tipo A prontos (a); Detalhes da trama e dos pontos de ligação (b).



Fonte: Acervo pessoal.

A elaboração de desenhos da grade em 3D colaborou para o aprimoramento do projeto final, conferindo clareza aos detalhes de união entre as peças e suas posições em relação à grade como um todo. Outro procedimento favorável à montagem foi a determinação da sequência de união dos módulos. Nesse caso, a estratégia consistiu na união de três conjuntos com três módulos cada um e, em seguida, ocorreu a junção desses agrupamentos com ligações de continuidade (Figura 5.8).

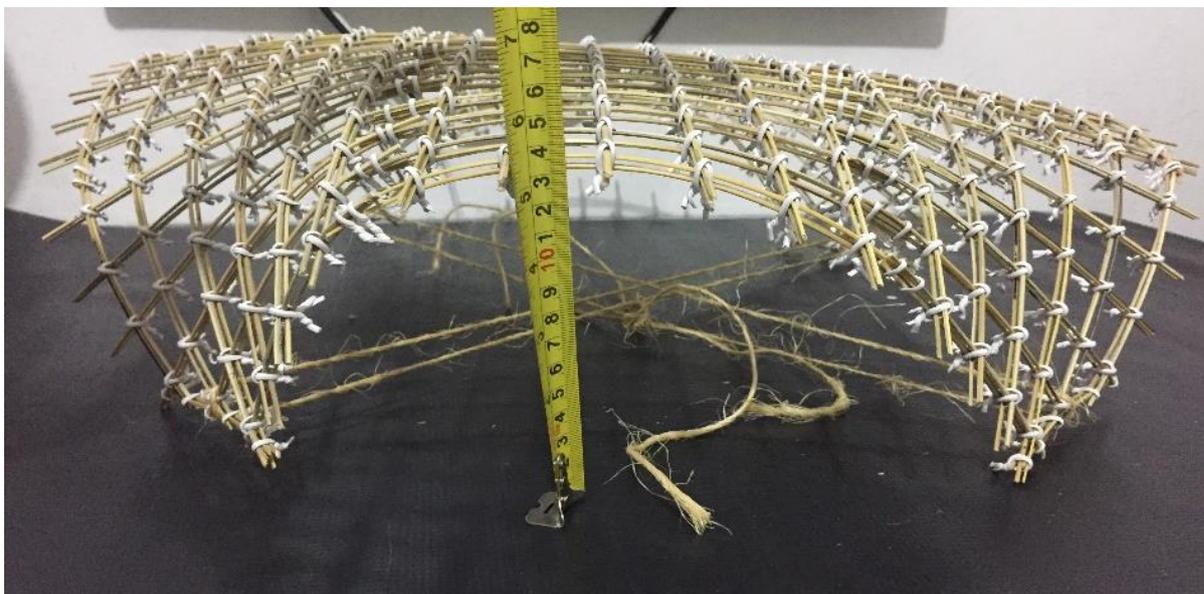
Figura 5.8 – Resultado final da grade (a); Detalhes construtivos nas ligações entre módulos (b); Perfeito alinhamento das peças conectadas (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Passo 5: Flexão ou curvatura da malha – A grade completa foi fletida primeiramente para avaliação de sua configuração inicial de equilíbrio estrutural a partir dos requisitos arquitetônicos (início do processo *form-finding*). Para simular o sistema construtivo, foram utilizados dois barbantes de sisal de 4,00 mm de diâmetro, um em cada diagonal, que representaram as cordas usadas na construção da malha real (Figura 5.9).

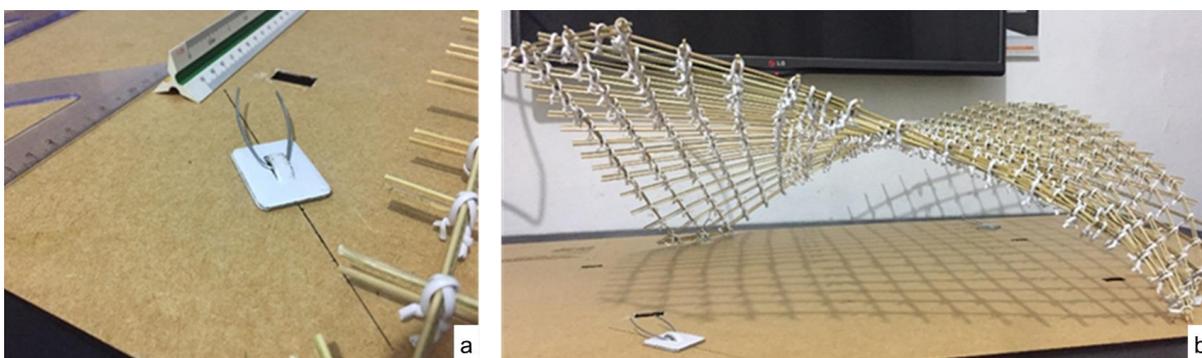
Figura 5.9 – Sistema de tração feito com barbantes para simulação do processo construtivo e avaliação da curvatura da malha fletida (início do processo *form-finding*).



Fonte: Acervo pessoal.

Passo 6: Fixação da malha em suporte – A malha foi posicionada em uma placa de MDF (*Medium Density Fiberboard*, em português placa de fibra de média densidade), e presa quando assumiu a forma desejada e as medidas preestabelecidas de afastamento dos apoios. Foram usadas presilhas de metal e arames de 1,00 mm para simular a fundação da malha, mantendo essa na posição definida (Figura 5.10a).

Figura 5.10 – (a) Detalhes das presilhas de suporte da grade (esquerda) e (b) *grid* sustentada apenas por dois apoios durante flexão total da trama (direita).



Fonte: Acervo pessoal.

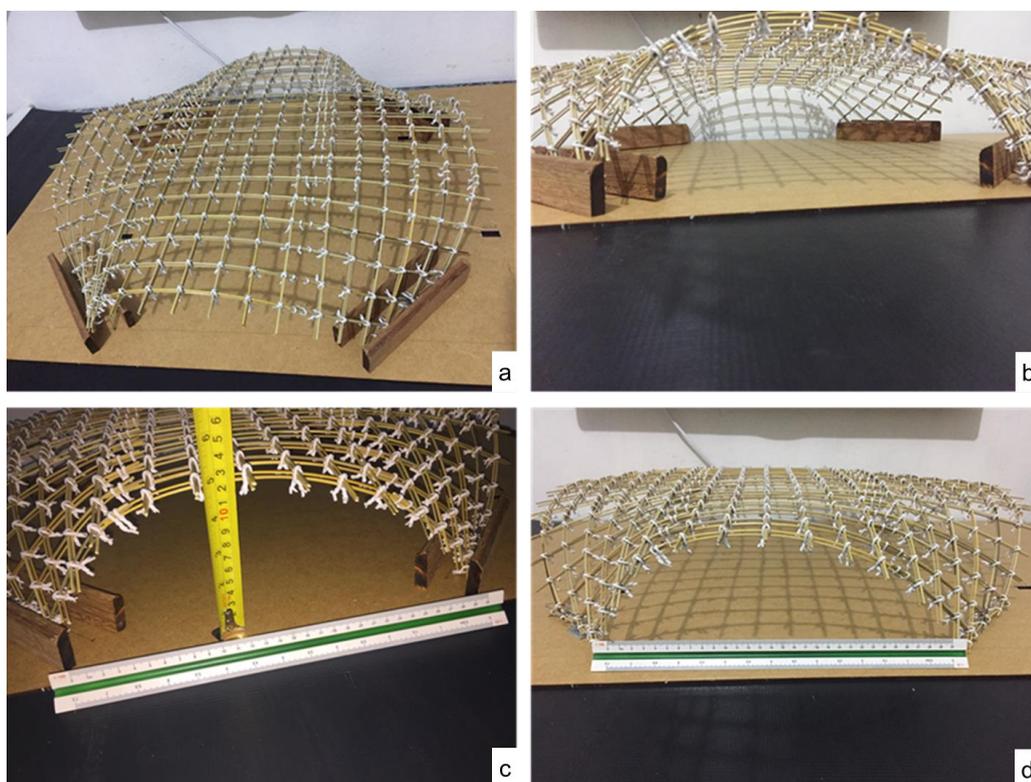
Essa abordagem física em escala dos elementos forneceu uma visão essencial da geometria final da malha (Figura 5.10b).

### 5.3.2 Processo *form-finding*

O projeto de estruturas *gridshell* envolve a determinação da configuração inicial de autoequilíbrio, que é chamada em inglês de processo *form-finding*, *shape finding*, ou ainda *3D shape definition*. Esse procedimento busca a otimização da estrutura, ou seja, é uma tentativa de encontrar a forma ou configuração ideal de um determinado projeto de acordo com requisitos estruturais e arquitetônicos. Portanto, essa definição da forma em três dimensões é sempre perseguida pelos projetistas de estruturas como as *gridshells*.

Nesse sentido, a criação da maquete permitiu o desenvolvimento de um processo *form-finding*, oferecendo mais bases formais para o projeto em escala real. É importante observar que a distância entre os apoios foi de cerca de 30,00 cm, enquanto a altura final dos arcos foi de aproximadamente 12,00 cm (Figura 5.11).

Figura 5.11 – Modelo físico simplificado da malha a ser construída na sua forma final. Vista superior da maquete (a); Vista frontal da maquete (b); Medição de um dos arcos de entrada da *grid*, apresentando 12,00 cm de altura (c); Medição da distância entre os apoios, apresentando 30,00 cm de comprimento (d).

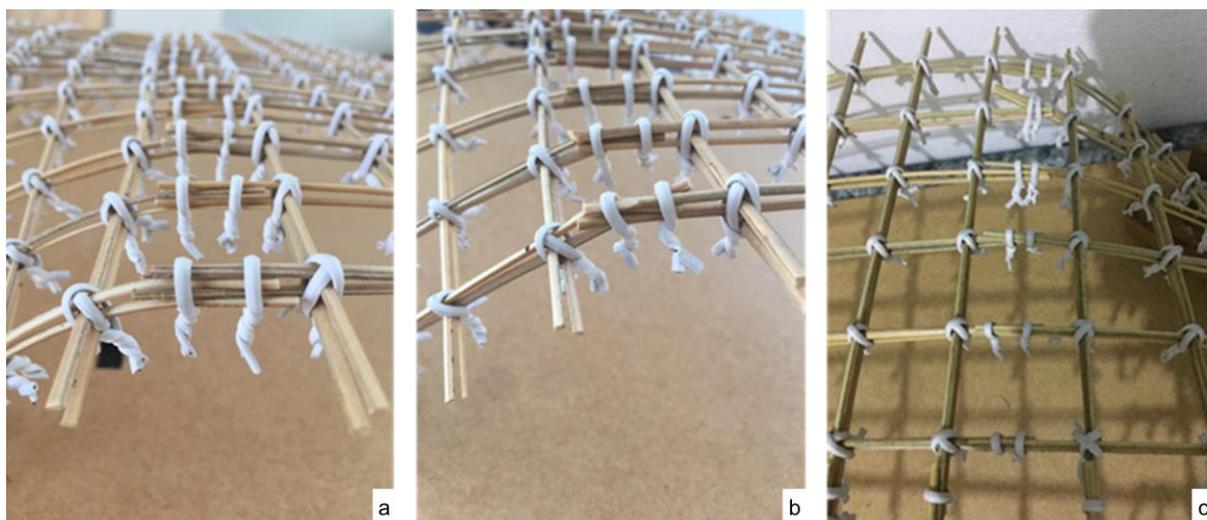


Fonte: Acervo pessoal.

### 5.3.3 Defeitos observados após a flexão

A montagem da maquete forneceu também a possibilidade de simular o processo construtivo da malha real em pequena escala, o que se mostrou como algo importante. Isso porque os detalhes de execução foram observados e possíveis problemas foram identificados, tais como a quebra de elementos submetidos à flexão excessiva durante a deformação. Essa análise permitiu o estudo de estratégias para diminuir esses prováveis “defeitos” na grade definitiva em escala real. Na Figura 5.12, pode-se observar a quebra de elementos. Essas observações foram de grande valia para a execução da *gridshell* final.

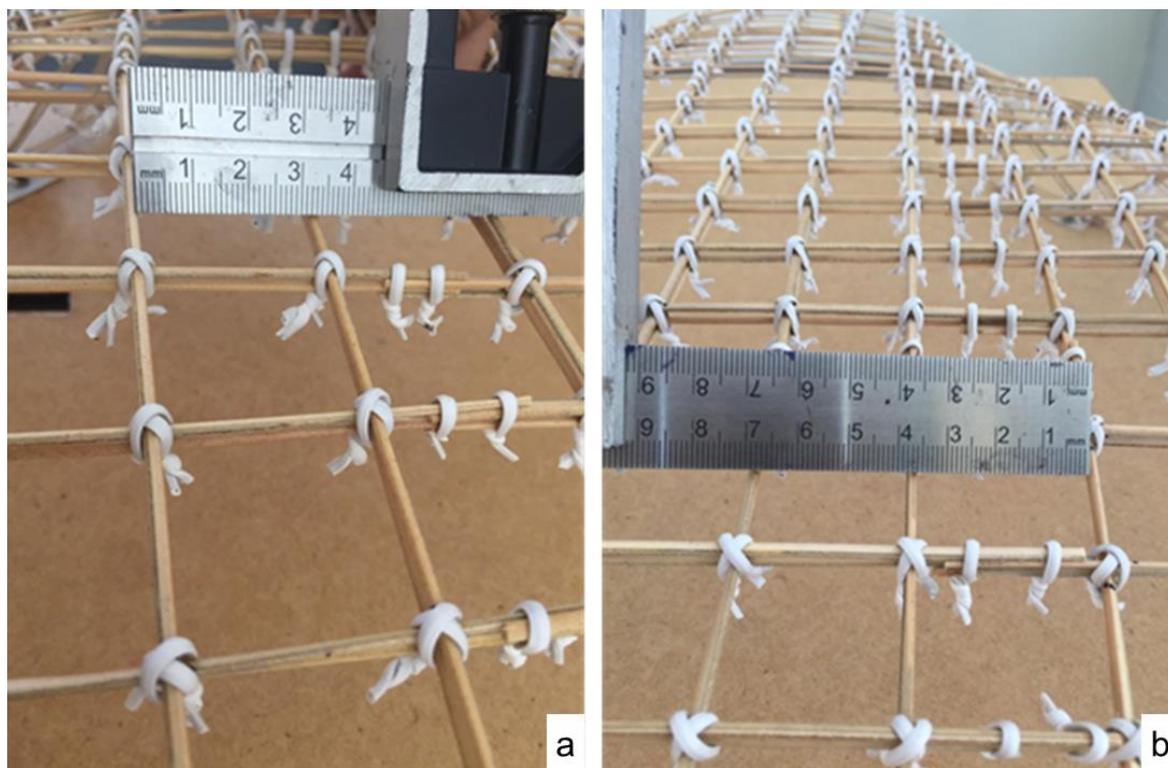
Figura 5.12 – Pressão excessiva nas ligações entre módulos (a); Quebras de elementos nesses pontos (b); Deslocamento dos elementos de conexão (arames) em virtude da pressão exercida pelos palitos (representando as ripas) (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Outro detalhe interessante foi observado em relação ao espaçamento da trama, no encontro entre módulos a distância foi de aproximadamente 4,10 cm, maior do que nas tramas internas, com cerca de 3,20 cm, como mostra a Figura 5.13.

Figura 5.13 – Largura da trama internamente, medindo 3,1 cm (a) em comparação com a largura da trama na união dos módulos, medindo 3,6 cm (b).



Fonte: Acervo pessoal.

Acredita-se que esse fato se deu em virtude da acomodação das peças durante o encurvamento da grade.

## CAPÍTULO 6

# Avaliação teórica e experimental

### 6.1 Madeiras escolhidas para a construção

A crescente consciência ambiental intensifica a adoção de posturas visando a preservação das florestas nativas brasileiras. Dessa forma, o uso de madeiras oriundas de reflorestamento tem sido uma alternativa para a indústria AEC, sobretudo as provenientes das espécies eucalipto e pinus, para substituição das madeiras nativas.

Esse contexto, aliado às propriedades mecânicas de resistência e rigidez e disponibilidade comercial, elegeu o pinus como material construtivo para a execução da *gridshell*, sendo sua sustentação realizada sobre uma fundação com elementos roliços de eucalipto tratado.

#### 6.1.1 *Pinus elliottii* Engelm.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2009), o pinus, também conhecido como pinheiro ou pinheiro-americano, tem como nome científico *Pinus elliottii* Engelm., *Pinaceae*. Essa espécie foi introduzida no Brasil a partir dos estados do Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Ainda segundo o IPT (2009), o pinus é bastante comum nos Estados Unidos da América e no Canadá.

O pinus apresenta uma cor clara, branco-amarelada, e sensorialmente o cerne e o alburno não se distinguem pela coloração. Possui uma densidade considerada baixa, produzindo, portanto, uma madeira leve que apresenta brilho moderado. Pode-se dizer também que ela é macia ao corte, sendo fácil de serrar, aplainar, furar e lixar. Essas características a fazem ter uma boa trabalhabilidade, mas também influenciam negativamente na sua durabilidade natural, pois fazem com que essa espécie exiba

uma baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos, dentre os quais pode-se citar: fungos (manchadores, emboloradores e apodrecedores), cupins, brocas e perfuradores marinhos, para os quais são previstos tratamentos químicos.

O pinus possui vários usos correntes na construção civil, tais como forros, lambris, rodapés etc. Além disso, também são usados temporariamente para confecção de fôrmas para concreto, pontaletes, cavaletes e andaimes. Essa madeira ainda é usada em diversas outras atividades industriais, como na fabricação de móveis, cabos de vassoura, fósforos, paletes, bobinas e madeiras processadas (chapas compensadas e laminadas) (IPT, 2009).

A Tabela 6.1 traz algumas das propriedades físicas e mecânicas dessa espécie aferidas pelo IPT em 1989 (IPT, 2009). Essas características foram analisadas e se mostraram dentro dos parâmetros exigidos para a obra.

Tabela 6.1 – Propriedades da espécie pinus

<b>PROPRIEDADES DO PINUS</b>
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS<sup>1</sup></b>
<b>Densidade de massa (<math>\rho</math>):</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho_{ap15}</math> (aparente a 15% de umidade): 480kg/m<sup>3</sup>;</li> <li>• <math>\rho_{básica}</math> (densidade básica): 420kg/m<sup>3</sup>;</li> </ul>
<b>Contração:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radial: 3,4%;</li> <li>• Tangencial: 6,3%;</li> <li>• Volumétrica: 10,5%.</li> </ul>

<sup>1</sup> Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

---

## PROPRIEDADES MECÂNICAS<sup>2</sup>

---

### Flexão:

- Resistência ( $f_M$ ):
  - Madeira verde: 48,0 MPa;
  - Madeira a 15% de umidade: 69,6 MPa;
- Módulo de elasticidade (madeira verde): 6463 MPa;
- Limite de proporcionalidade (madeira verde): 19,7 MPa.

### Compressão paralela às fibras:

- Resistência ( $f_{c0}$ ):
  - Madeira verde: 18,5 MPa;
  - Madeira úmida (15% de umidade): 31,5 MPa.
- Coeficiente de influência de umidade: 6,7 %;
- Limite de proporcionalidade (madeira verde): 13,7 MPa;
- Módulo de elasticidade (madeira verde): 8846 MPa

### Outras propriedades:

- Resistência ao impacto na flexão – Madeira a 15% (choque): 14,5
- Cisalhamento (madeira verde): 5,8 MPa
- Dureza janka paralela (madeira verde): 1932 N
- Tração normal às fibras (madeira verde): 3,0 MPa
- Fendilhamento (madeira verde): 0,4 Mpa

---

Fonte: IPT (1989b).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) traz em seu anexo E os valores médios das propriedades de rigidez e resistência de seis espécies de pinus (madeiras nativas e de florestamento) (Quadro 6.1), sendo esses valores mais atuais do que os apresentados pelo IPT (1989). Segundo essa norma, tais valores devem ser aplicados para o cálculo estrutural de projetos em madeira com uso dessas espécies.

---

<sup>2</sup> Resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT MB26/53 (NBR 6230/85).

Quadro 6.1 – Valores médios de madeiras coníferas nativas e de florestamento.

Nome comum (coníferas)	Nome científico	$\rho_{ap} (12\%)^1$ kg/m <sup>3</sup>	$f_{c0}^2$ MPa	$f_{t0}^3$ MPa	$f_{t90}^4$ MPa	$f_v^5$ MPa	$E_{c0}^6$ MPa	$n^7$ n
<b>Pinho do Paraná</b>	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15225	15
<b><i>Pinus caribea</i></b>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	28
<b><i>Pinus bahamensis</i></b>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	32
<b><i>Pinus hondurensis</i></b>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	99
<b><i>Pinus elliotti</i></b>	<i>Pinus caribea</i> var. <i>elliotti</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889	21
<b><i>Pinus occarpa</i></b>	<i>Pinus oocarpa</i> <i>shiede</i>	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904	71
<b><i>Pinus taeda</i></b>	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15
1) $\rho_{ap} (12\%)$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.								
2) $f_{c0}$ é a resistência à compressão paralela às fibras.								
3) $f_{t0}$ é a resistência à tração paralela às fibras.								
4) $f_{t90}$ é a resistência à tração normal às fibras.								
5) $f_v$ é a resistência ao cisalhamento.								
6) $E_{c0}$ é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.								
7) $n$ é o número de corpos-de-prova ensaiados.								
NOTAS								
1 Coeficiente de variação para resistência a solicitações normais $\delta = 18\%$ .								
2 Coeficiente de variação para resistência a solicitações tangenciais $\delta = 28\%$ .								

Fonte: Transcrita da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Com base no exposto, pode-se inferir que o pinus apresenta resistência e rigidez adequadas para a execução da *gridshell*, e seu baixo módulo de elasticidade é um importante critério para seleção de madeira empregada em *gridshells* pós-formadas. Assim, de acordo com a Equação 6.1, a seguir, oriunda da Lei de Hooke, é possível identificar que um valor de tensão dividido por uma alta deformação, gerará um módulo de elasticidade menor do que quando essa mesma tensão é dividida por uma deformação inferior. Isso se dá porque o módulo de elasticidade é inversamente proporcional à deformação.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

(Equação 6.1)

Onde:

$E$  é o módulo de elasticidade (Megapascal, MPa ou N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma$  é a tensão aplicada (Megapascal, MPa ou N/mm<sup>2</sup>);

$\varepsilon$  é a deformação elástica do corpo de prova (sem dimensão ou adimensional).

Uma avaliação do desempenho da madeira de pinus na composição do “arco de entrada” sob flexão foi realizada por meio de *mockup*, sendo descrita no item 6.2 do presente capítulo. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a madeira de primeira categoria é assim qualificada somente se todos os elementos forem isentos de defeitos, por classificação visual normalizada e mecânica que garanta a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote de madeira a ser empregado em determinado serviço. Portanto, não é permitido classificar as madeiras como de primeira categoria apenas por meio de método visual de classificação.

As peças serão classificadas como de segunda categoria quando não houver a aplicação simultânea da classificação visual e mecânica. Já o mercado interno trabalha sem parâmetros de seleção, ou seguindo classificações genéricas (sem regras padronizadas), tais como: “primeira”, “segunda”, “extra” etc. Essa falta de organização gera conflitos de interesses entre vendedores e compradores.

Essa ausência de padronização é um fator que dificulta também a aplicação de elementos estruturais de madeira na construção civil, uma vez que para dimensionar uma estrutura de modo eficiente é necessário conhecer as peças vendidas corriqueiramente no mercado.

Neste trabalho foi usada uma seleção visual simplificada dos elementos, para eleger as peças considerando a quantidade, tamanho e posição dos nós, de modo a posicionar aquelas com menor quantidade de defeitos em locais com menor encurvamento.

### 6.1.2 Eucalipto tratado

Foram adquiridas no mercado local 12 toras de eucalipto, com dois metros e meio de comprimento e em média doze centímetros de diâmetro, para confecção da fundação da *gridshell*. Essa espécie apresenta naturalmente uma boa resistência ao apodrecimento e fica ainda mais durável com o tratamento em autoclave com aplicação de solução de CCA (Cobre, Cromo e Arsênio). Isso confere à madeira proteção contra os ataques de cupins, fungos de apodrecimento, brocas e insetos (EUCATRATUS, [200 -?]).

O cerne é mais difícil de ser tratado, entretanto, o alburno é mais permeável (IPT, 2009). Ela ainda apresenta camadas de crescimento pouco distintas e boa trabalhabilidade, porém requer o uso de técnicas para minimizar os efeitos das tensões e o conseqüente aparecimento de trincas. A secagem é difícil e as madeiras de espécies de eucalipto costumam apresentar rachaduras e empenamentos quando não tratadas adequadamente.

Em relação às propriedades mecânicas, quando o assunto é a resistência à flexão da madeira verde, a espécie *Eucalyptus Citriodora* (atualmente denominada *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill e L.A.S. Johnson, *Myrtaceae*) apresenta um módulo de elasticidade em torno 13.337 MPa. Já a espécie Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., *Myrtaceae*), apresenta um módulo de elasticidade, nas mesmas condições, de 9.689 MPa. Assim, ambas as espécies exibem valores para módulo de elasticidade mais altos do que o do pinus. Portanto, pode-se dizer que essas madeiras são menos dobráveis do que o pinus (IPT, 2009). Os usos da *Corymbia citriodora* na construção civil vão desde vigas e caibros nos ambientes internos até a fabricação de postes, dormentes e mourões, usados em ambientes externos. Essas características cancelam o uso do eucalipto nas estruturas de fundações propostas para a *gridshell*.

A NBR 7190 (ABNT, 1997) também apresenta valores médios das propriedades de rigidez e resistência para algumas madeiras nativas e de florestamento de várias espécies de eucalipto que devem ser considerados para o dimensionamento de projetos de estruturas de madeira com uso dessas espécies, como as mostradas na Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Valores médios de madeiras dicotiledôneas nativas e de florestamento.

Nome comum (dicotiledôneas)	Nome científico	$\rho_{ap}^{(12\%)}$ <sup>1)</sup> kg/m <sup>3</sup>	$f_{c0}$ <sup>2)</sup> MPa	$f_{t0}$ <sup>3)</sup> MPa	$f_{t90}$ <sup>4)</sup> MPa	$f_v$ <sup>5)</sup> MPa	$E_{c0}$ <sup>6)</sup> MPa	<sup>7)</sup> n
<b>E. Alba</b>	<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13409	24
<b>E. Camaldulensis</b>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0	13286	18
<b>E. Citriodora*</b>	<i>Eucalyptus citriodora*</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18421	68
<b>E. Cloeziana</b>	<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5	13963	21
<b>E. Dunnii</b>	<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18029	15
<b>E. Grandis</b>	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813	103
<b>E. Maculata</b>	<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	115,6	4,1	10,6	18099	53
<b>E. Maidene</b>	<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14431	10
<b>E. Microcorys</b>	<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	118,6	4,5	10,3	16782	31
<b>E. Paniculata</b>	<i>Eucalyptus paniculata</i>	1087	72,7	147,4	4,7	12,4	19881	29
<b>E. Propingua</b>	<i>Eucalyptus propingua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15561	63
<b>E. Punctata</b>	<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9	19360	70
1) $\rho_{ap}^{(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade.								
2) $f_{c0}$ é a resistência à compressão paralela às fibras.								
3) $f_{t0}$ é a resistência à tração paralela às fibras.								
4) $f_{t90}$ é a resistência à tração normal às fibras.								
5) $f_v$ é a resistência ao cisalhamento.								
6) $E_{c0}$ é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.								
7) n é o número de corpos-de-prova ensaiados.								
NOTAS								
1 As propriedades de resistência e rigidez apresentadas neste anexo foram determinadas pelos ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.								
2 Coeficiente de variação para resistência a solicitações normais $\delta = 18\%$ .								
3 Coeficiente de variação para resistência a solicitações tangenciais $\delta = 28\%$ .								
*Atualmente <i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) K.D. Hill e L.A.S. Johnson, <i>Myrtaceae</i> .								

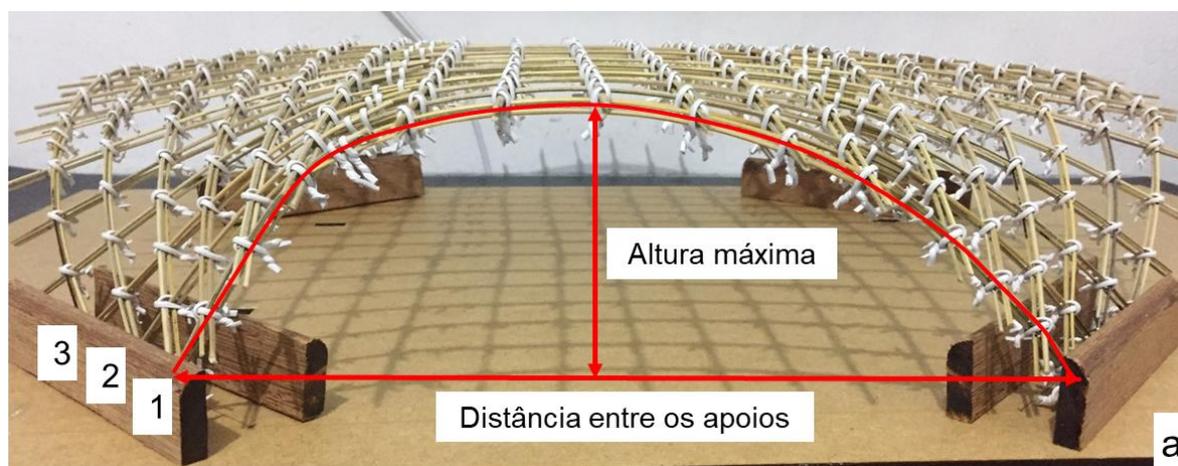
Fonte: Adaptada da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Embora exista uma incerteza acerca da exata espécie de eucalipto comercializada no mercado local, as características não diferem de maneira significativa de uma para outra. Dessa forma, as análises feitas foram essenciais na escolha do eucalipto para as fundações.

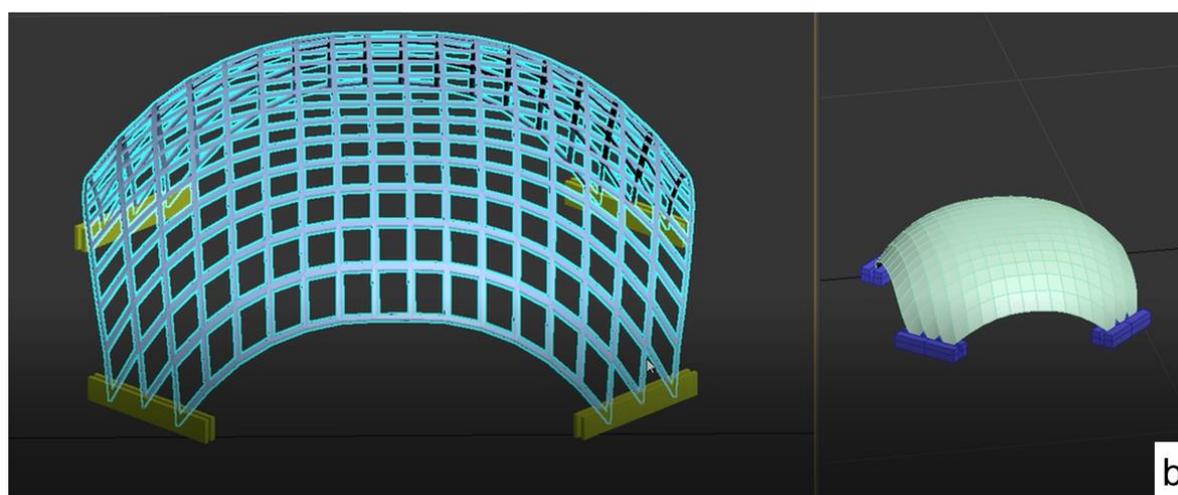
## 6.2 Encurvamento da malha

A curvatura da malha foi realizada com base na modelagem digital, associada à elaboração de maquetes, o que facilitou a compreensão de quais seriam os possíveis arcos mais exigidos durante a flexão da grade (Figura 6.1).

Figura 6.1 – Maquete da malha projetada (a) e estimativa de curvatura da *gridshell* feita no *3ds Max*® (2018) (b).



$$F1 = \frac{\text{altura máxima}}{\text{dist. entre apoios}} = \frac{11,70 \text{ cm}}{30,00 \text{ cm}} = 0,39 \quad F2 = \frac{11,85 \text{ cm}}{40,00 \text{ cm}} = 0,30 \quad F3 = \frac{12,00 \text{ cm}}{47,00 \text{ cm}} = 0,26$$



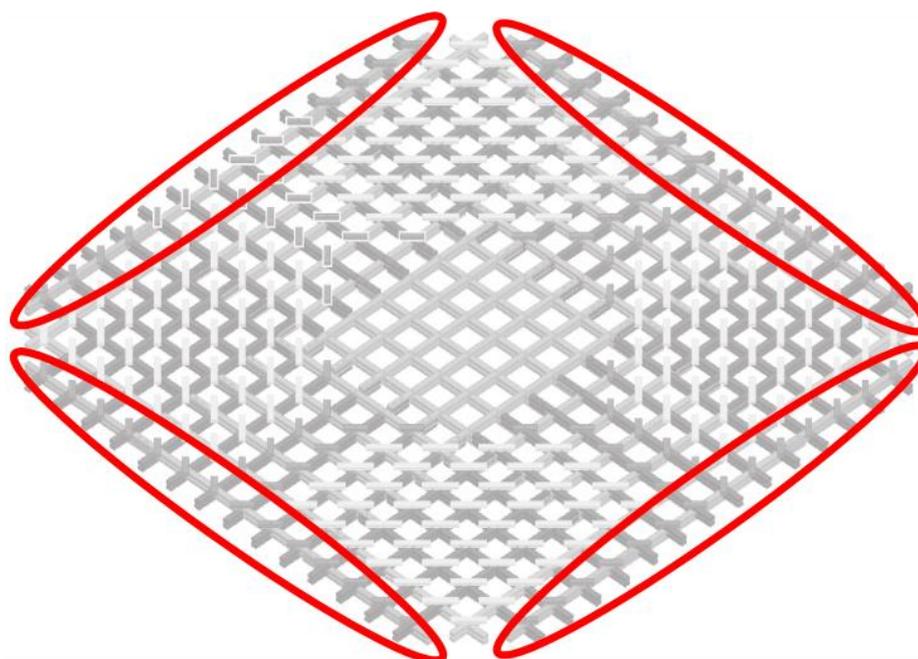
Fonte: Elaborado pela autora e contribuição dos arquitetos Lobão e Silva (2018).

Primeiramente foram avaliadas todas as alturas máximas dos arcos da maquete em relação aos seus apoios. Em outras palavras, foi mensurado o deslocamento perpendicular de cada seção da grade construída. Em seguida,

verificou-se as distâncias entre as extremidades (ou apoios) de cada arco, de forma perpendicular às alturas (Figura 6.1a). A razão entre esses valores para cada arco gerou um fator de comparação. Esse fator demonstrou que quanto maior for a distância entre as extremidades do arco em relação a sua altura máxima, menor será a força de flexão a que o conjunto estará submetido.

Exemplificando tal afirmação com valores obtidos na análise de três arcos da maquete (conforme a Figura 6.1a), é possível afirmar que quanto maior o fator (F1, F2 ou F3), mais o arco foi fletido para se atingir a curvatura desejada para o conjunto. Com base nas análises feitas, o arco da extremidade (arco 1 na Figura 6.1a) obteve o maior fator ( $F1=0,39$ ), quando comparado com os arcos seguintes da malha (arcos 2 e 3 na Figura 6.1a). Fato semelhante foi constatado nas medições realizadas em projeção de curvatura feita no *3ds Max*® (2018) (Figura 6.1b). Vale destacar que as proporções entre a maquete e a projeção em software são as mesmas, embora as medidas sejam em escalas distintas e os valores dos arcos um pouco discrepantes. Portanto, foi possível inferir que os conjuntos de ripas mais exigidos estruturalmente para suportar esforços de flexão seriam os mais externos, posicionados nas bordas da grade, como destaca a Figura 6.2.

Figura 6.2 – Conjuntos a serem mais fletidos.



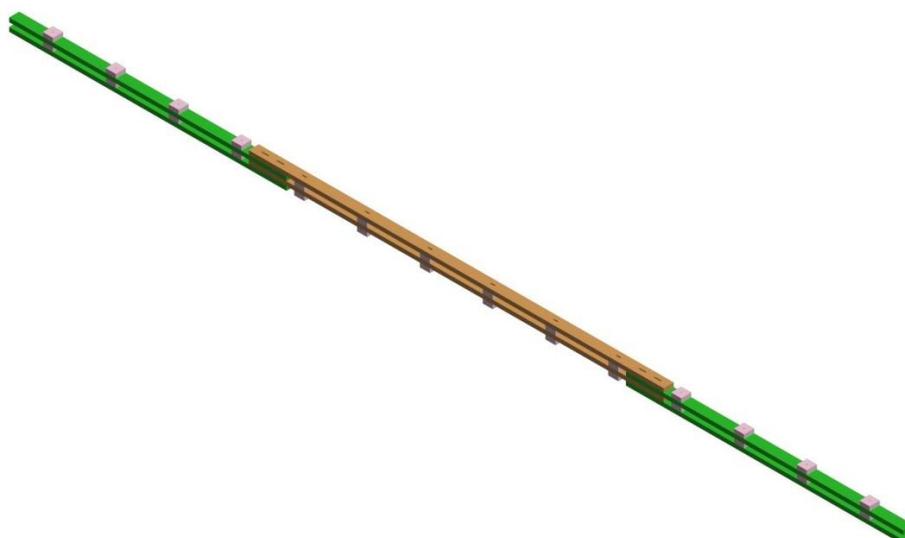
Fonte: Elaborado pela autora.

Cabe ressaltar que o software *3ds Max*® (2018) não é uma ferramenta que analisa a estrutura mostrando as tensões atuantes nas peças. Porém, as inferências feitas são hipóteses teóricas que partiram das análises feitas em um modelo físico da malha em escala reduzida, e essas podem ser testadas em futuros trabalhos voltados aos cálculos estruturais da grade aqui concebida.

### 6.2.1 Passo a passo do primeiro ensaio

Passo 1: Idealização do ensaio – Com o objetivo de prever o comportamento dos conjuntos de peças a serem mais solicitados do ponto de vista estrutural, ensaios foram idealizados e realizados. Para tal, uma metodologia descrita por Barroso (2016) foi analisada e adaptada à estrutura já projetada. Dessa maneira, foi criado um conjunto de peças em tamanho real, representando da forma mais fiel possível o posicionamento dos elementos na grade. Para tal, as dimensões das peças obedeceram às já escolhidas para a *grid* final, com ripas de 5,00 cm de largura e 2,20 cm de espessura. O conjunto foi composto por 28 pequenos quadrados (5,00 cm x 5,00 cm x 2,20 cm – largura x comprimento x espessura), simulando as ripas que cruzam perpendicularmente o arco, 4 peças com 1,47 m de comprimento e 2 com 2,20 m, como mostra a Figura 6.3.

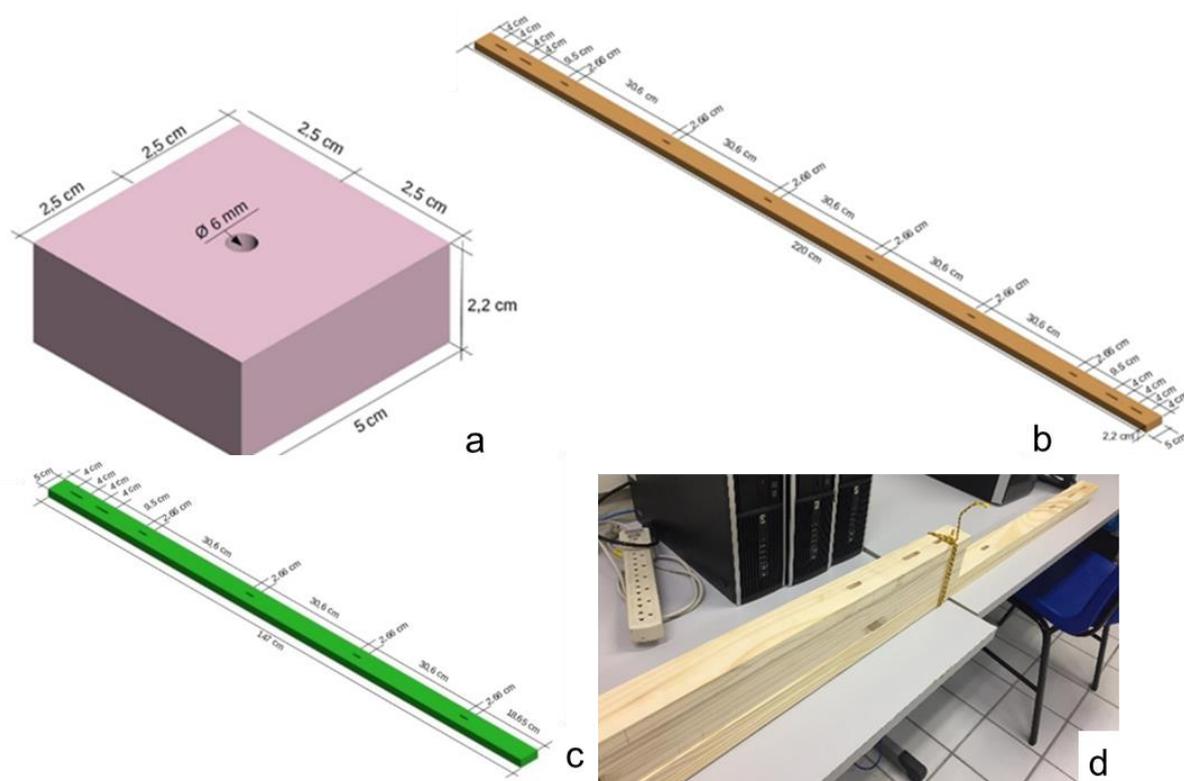
Figura 6.3 – Conjunto projetado para teste de flexão.



Fonte: Contribuição dos arquitetos Lobão e Silva (2018).

Passo 2: Corte e furação das peças – A madeira pinus foi escolhida para confecção do conjunto do ensaio e as peças foram cortadas e furadas conforme a previsão (Figura 6.4).

Figura 6.4 – Projeto de cada peça do conjunto a ser ensaiado (peça roxa – quadrado com 5,00 cm de lado criado apenas para o teste (a), peça laranja com 2,20 m de comprimento (b) e peça verde com 1,47 m de comprimento (c) e peças já confeccionadas (d).



Fonte: Contribuição dos arquitetos Lobão e Silva (2018) e acervo pessoal.

Passo 3: Montagem do arco – O conjunto foi montado e fixado utilizando-se parafusos de 6,00 mm de diâmetro (Figura 6.5a). Nas ligações das extremidades foram usadas porcas do tipo olhal a fim de permitir a passagem e a fixação de cordas para fletir o arco. Nos mesmos pontos foram usados parafusos de 8,00 mm. Após esse procedimento, o conjunto foi umedecido para facilitar o processo de encurvamento da madeira (Figura 6.5b).

Figura 6.5 – Conjunto sendo montado para o ensaio (a) e umedecimento das peças (b).



Fonte: Acervo pessoal.

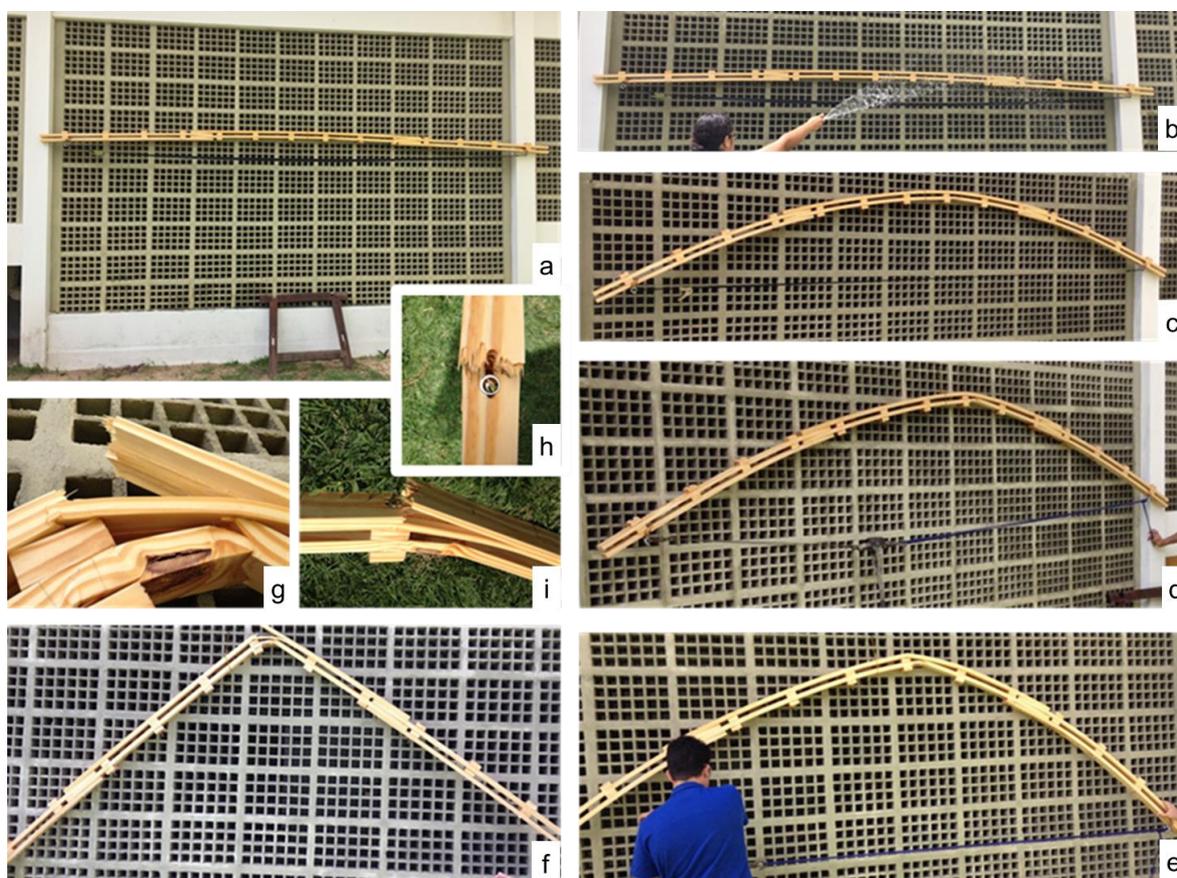
Passo 4: Flexão do arco – Com o conjunto fixado em uma parede, deu-se início ao processo de encurvamento, através da tração de cintas de nylon, acopladas a uma catraca manual. Vários ciclos de umedecimento do arco, tracionamento do cabo e medição da altura máxima foram empregados para avaliar o desempenho da madeira. Com o rompimento de elementos, o processo foi interrompido.

A presença de nós e de falhas de corte das peças promoveu a descontinuidade das fibras da madeira e seu consequente rompimento. Ainda se destaca que a pressão exercida pelos parafusos também foi um fator negativo nesse ensaio, pois os pontos de conexão entre peças deveriam estar mais livres, permitindo assim que as ripas deslizassem suavemente umas sobre as outras, buscando acomodação durante o encurvamento. Esse procedimento foi útil e adotado na etapa de construção da *grid*.

O conjunto tinha um comprimento aproximado de 4,73 metros e os primeiros sinais de fissuras entre as camadas de fibras da madeira ocorreram quando as cintas foram tracionadas 0,31 m, fazendo com que a medida entre as extremidades chegasse a 4,42 m (Figura 6.6c). A ripa inferior da parte central foi a primeira a romper e até a medida de 3,90 m (de ponta a ponta), a camada superior do conjunto suportou

o esforço de flexão exercido sobre esse (Figura 6.6d), e com 3,80 m ocorreu o colapso da ripa superior e, conseqüentemente, a perda da capacidade de suporte do conjunto (Figura 6.6e, f, g).

Figura 6.6 – Arco no processo de curvatura, passo a passo do primeiro ensaio. Arco posicionado para início do ensaio (a); Umedecimento do conjunto (b); Início do encurvamento (c); Peças centrais apresentando primeiros sinais de rompimento (d); Ripas centrais bastante comprometidas, prestes a romper (e); Ripas centrais já rompidas (f); Ponto da quebra, fibras da madeira rompidas (g); Vista superior do ponto de rompimento após retirada do carregamento (h); Vista lateral do ponto de rotura após relaxamento das tensões (i).



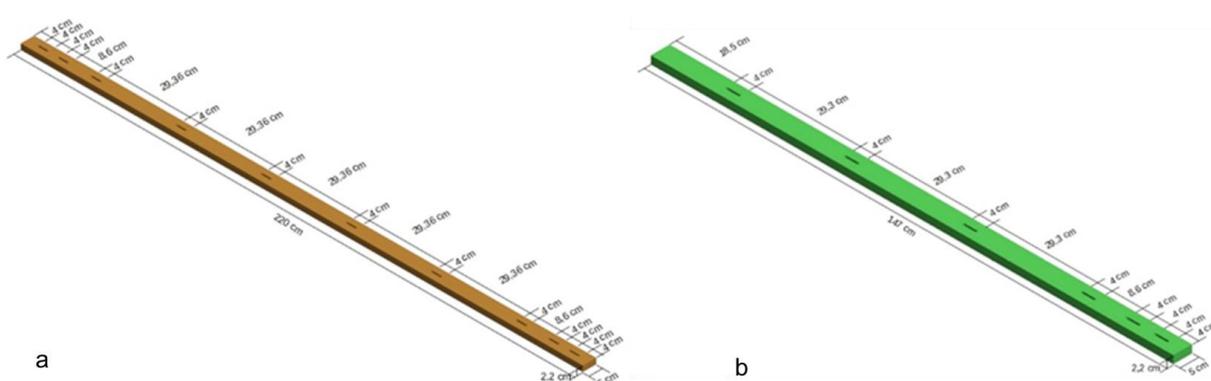
Fonte: Acervo pessoal.

### 6.2.2 Segundo ensaio

Para o segundo ensaio foram confeccionadas mais quatro peças (cor laranja) para substituição das danificadas no ensaio já realizado, com 2,20 m de comprimento. Os furos alongados, com 2,66 cm anteriormente, foram uniformizados ficando todos

com 4,00 cm de comprimento e 6,00 mm de diâmetro (Figura 6.7). Essa alteração teve o objetivo de facilitar a confecção das peças e permitir também um maior deslocamento das ripas umas sobre as outras, facilitando o processo de envergadura do arco.

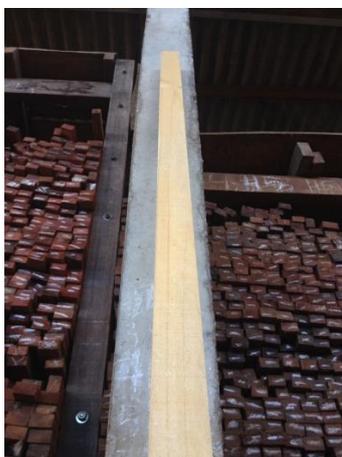
Figura 6.7 – Peças com furos alongados uniformizados com 4,00 cm. Peça laranja com 2,20 m de comprimento (a) e peça verde com 1,42 m de comprimento (b).



Fonte: Acervo pessoal.

As peças foram selecionadas antes do aparelhamento e furação. Assim, barrotes (Figura 6.8) sem a presença de rachaduras ou nós mortos (ou soltos) foram adquiridos, serrados e aparelhados para a obtenção de boas ripas com as dimensões de 5,00 cm x 2,20 cm x 220 cm (largura x espessura x comprimento).

Figura 6.8 – Um dos barrotes selecionados.



Fonte: Acervo pessoal.

O trabalho de furação realizado por tupia manual durou aproximadamente três horas e compreendeu a marcação das medidas e execução dos 40 furos alongados com 40,00 mm de comprimento e 6,00 mm de diâmetro, sendo 10 furos em cada ripa (Figura 6.9).

Figura 6.9 – Abertura dos rasgos nas ripas de pinus. Uso de tupia manual e manuseio da máquina em paletes sobre bancada (a); Revezamento do trabalho para prevenção de acidentes (b).

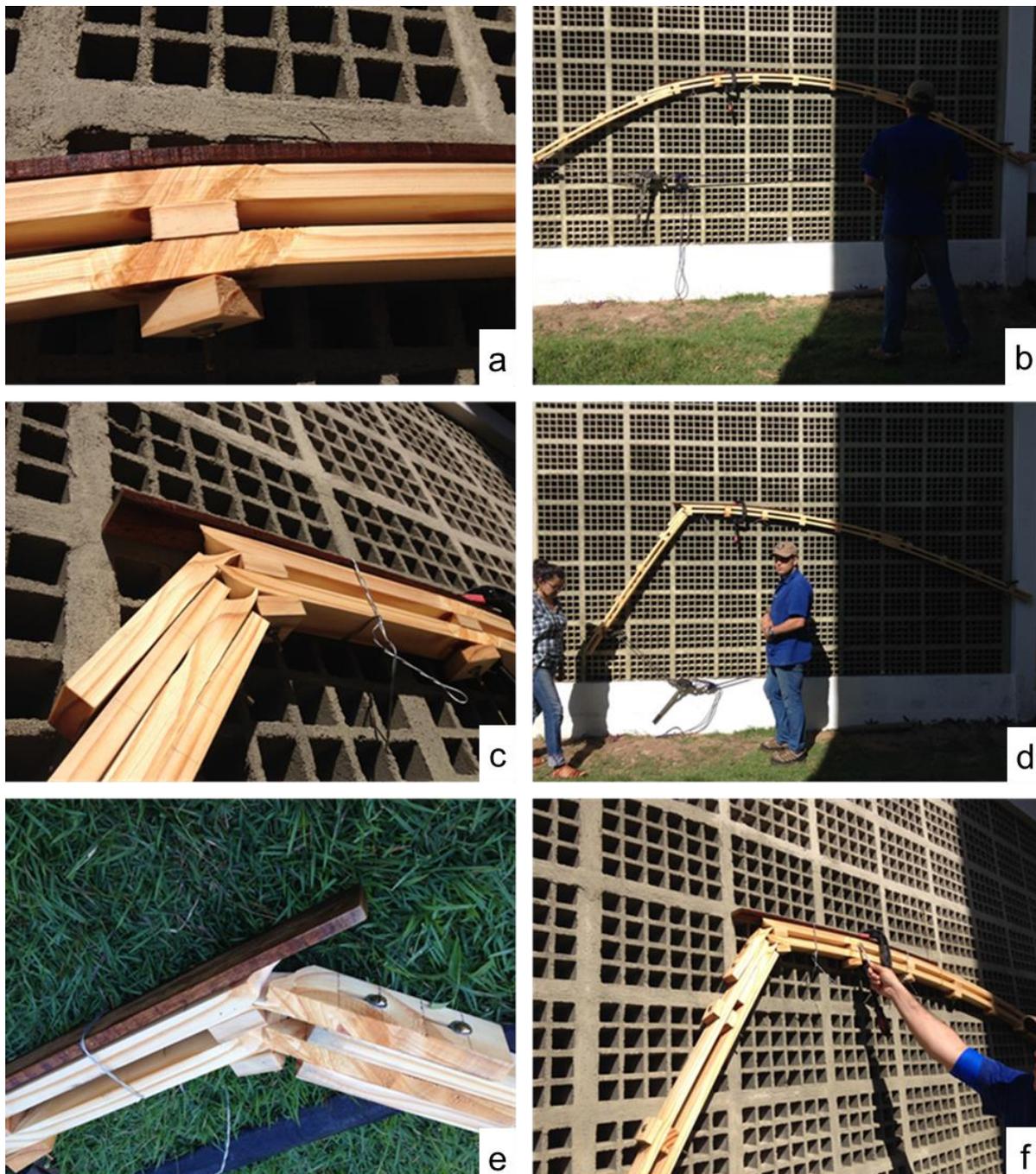


Fonte: Acervo pessoal.

Após a furação nova seleção visual foi realizada para concretização do segundo ensaio de flexão dos arcos analisados como os mais solicitados. Em seguida, um cabo de aço (com diâmetro de 4,50 mm) acoplado a um guincho manual do tipo tifor, de aço galvanizado com catraca esticadora, foi conectado a uma porca olhal em uma das extremidades, e na outra uma corda de 3,00 mm (com alma) foi presa. O uso desses equipamentos mais robustos permitiu que a tração exercida fosse mais uniforme e contínua.

Foi repetido o mesmo processo de tracionamento anterior (Figura 6.10a, b). Quando percebido o surgimento de trincas, procedia-se a colocação de uma ripa de angelim de cerca de 1,00 cm de espessura na parte superior do arco, como se observa na Figura 6.10, para evitar o rompimento da peça. Assim como da primeira vez, não foi possível atingir a curvatura esperada e as duas peças centrais romperam com cerca de 80,00 cm de tração nas cordas.

Figura 6.10 – Segundo ensaio. Ponto considerado frágil pela equipe (a); Conjunto já bastante tensionado (b); Ponto de quebra do arco ensaiado, vista frontal e inferior (c); Posição da rotura em relação ao conjunto (d); Vista posterior e superior da rotura (e); Análise da rotura pelos participantes, observando que as peças romperam próximo ao ponto de conexão entre módulos (f).



Fonte: Acervo pessoal.

A presença de nós e trincas está associada ao rompimento das peças (Figura 6.10a). Esses nós afetam a qualidade e o desempenho da madeira, e conseqüentemente sua flexibilidade, deixando-a mais suscetível a rachaduras e

roturas. Desse modo, tais defeitos limitam o uso das madeiras nas quais eles estão presentes, sendo indesejáveis em elementos estruturais. Como observado na Figura 6.11, a madeira rompeu justamente no ponto em que as fibras mudaram de direção em virtude da presença de um nó.

Figura 6.11 – Ponto de rotura do arco, próximo ao ponto de ligação entre as peças.



Fonte: Acervo pessoal.

Silva (2002), em matéria publicada na *Revista da Madeira*, cita que o nó nada mais é do que a base de galho ou ramo que se apoia no tronco ou em um galho maior de uma árvore. Seu início se dá na medula (centro) para a camada mais externa, o que provoca em seu entorno vários desvios ou descontinuidades dos tecidos lenhosos.

### 6.2.3 Terceiro ensaio

Erros cometidos durante os dois primeiros ensaios foram corrigidos para a montagem do terceiro conjunto de peças a ser testado (Figura 6.12a). A preparação consistiu nos mesmos passos dos anteriores e antes da flexão as peças foram umedecidas (Figura 6.12b).

Figura 6.12 – Último conjunto preparado para ensaio de flexão (a); Umedecimento das peças (b).

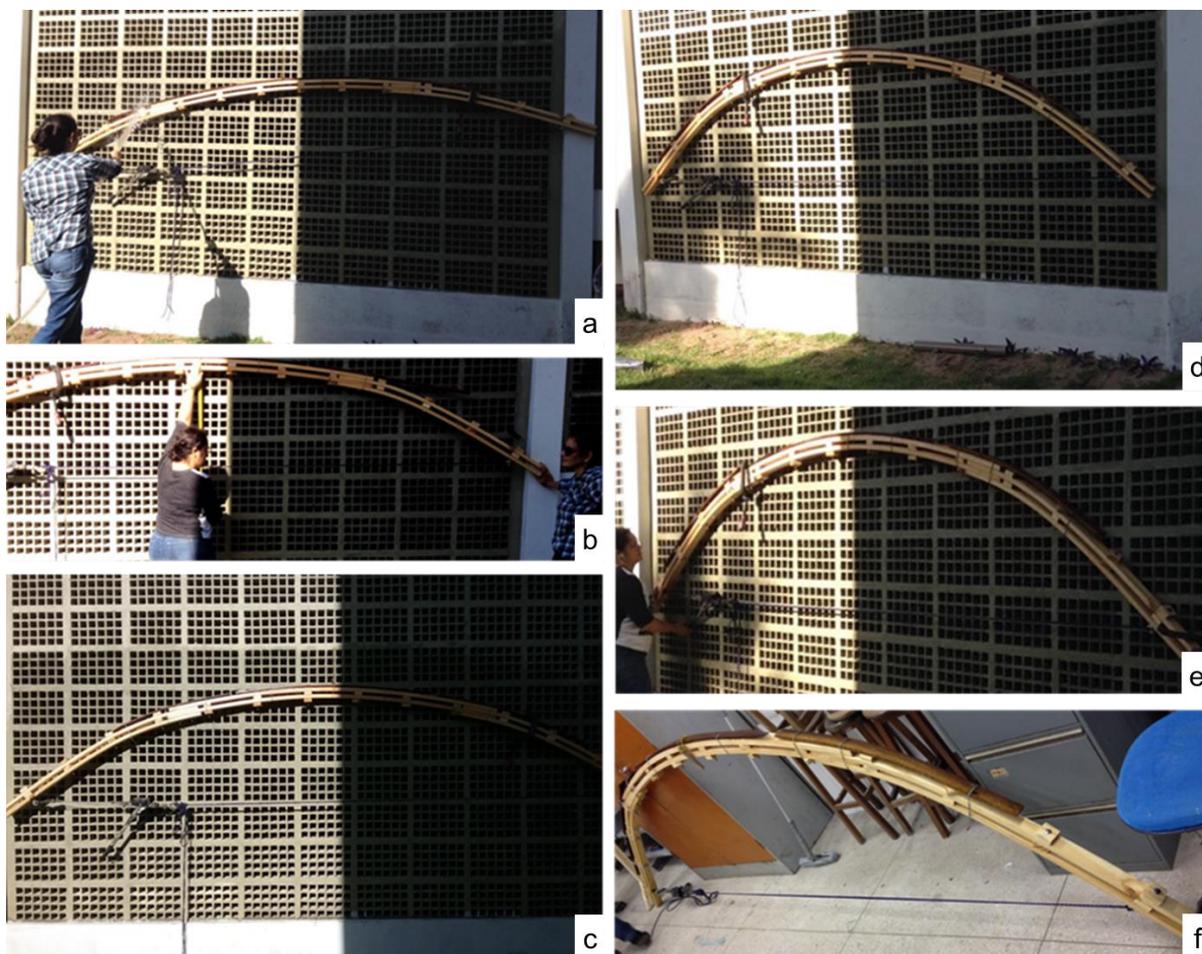


Fonte: Acervo pessoal.

No terceiro ensaio houve a instalação de ripas de angelim (5,00 cm de largura x 1,00 cm de espessura) em todo o comprimento do conjunto, com uso de arame galvanizado de 1,00 mm de diâmetro e grampo de fixação tipo C, para oferecer mais resistência e facilitar a distribuição das tensões dos elementos (Figura 6.13a). E, conforme o esperado, o arco foi fletido atingindo cerca de 1,12 m de flecha (Figura 6.13e, f).

Esse resultado atendeu aos requisitos estéticos do projeto. Todo o processo de encurvamento da peça durou cerca de 1 hora e 30 minutos, e foram feitos ciclos de umedecimento intercalados com tracionamento das cordas e cabos de aço, até atingir a altura requerida para o arco (Figura 6.13).

Figura 6.13 – Terceiro ensaio de flexão. Início do tensionamento do conjunto com umedecimento constante (a); Medição da flecha máxima no processo de flexão (b); Pausa para acomodação das fibras da madeira e análise da constância na curvatura (c); Continuação do processo de encurvamento do arco (d); Aplicação de mais tensão com o movimento do braço de alavanca da catraca de carga (e); Posição final do arco, com flexão pretendida alcançada (f).



Fonte: Acervo pessoal.

É importante destacar que apenas as peças centrais foram substituídas ao longo de todos os testes e que as últimas ensaiadas foram as mais isentas de nós e trincas (Figura 6.14).

Figura 6.14 – Peças de madeira selecionadas visualmente que obtiveram o melhor desempenho.



Fonte: Acervo pessoal.

Também cabe dizer que as ripas possuíam as fibras bastante organizadas horizontalmente ao longo de seu comprimento, como mostra a Figura 6.14. A disposição dessas fibras influenciou positivamente o comportamento das peças, uma vez que a madeira é um material anisotrópico e suas propriedades mecânicas dependem da disposição de suas fibras. Ou seja, as fibras ao longo dos elementos permitiram o encurvamento gradual sem ocorrência de trincas, que significa a mera separação entre essas. Tais observações são indícios de que as peças a serem colocadas em pontos de maior flexão precisariam passar por uma classificação visual.

### 6.3 Defeitos das madeiras

Os defeitos das madeiras podem ser classificados de maneira generalista em cinco categorias, sendo elas: (i) Defeitos de crescimento e desenvolvimento da anatomia interna da árvore (exemplos: presença de nós, grã irregular e irregularidades dos anéis de crescimento); (ii) Defeitos externos na forma do tronco (exemplos: tortuosidades e bifurcações); (iii) Defeitos de secagem (exemplos: rachaduras, fendilhamento e empenamento); (iv) Defeitos de processamento inadequado

(exemplos: cortes com presença de casca, alburno ou medula); e (v) Defeitos de alteração provocados por agentes físicos e bióticos (exemplos: descoloração de tecido em condições climáticas adversas, apodrecimento por fungos e bactérias e destruição por insetos).

Os nós (defeitos da madeira) podem ser considerados vivos ou mortos. Os nós vivos são formados quando os galhos considerados ativos fisiologicamente na árvore apresentam continuidade de seus tecidos com os tecidos lenhosos do tronco. Já os nós mortos são oriundos de galhos que morreram, secaram e deixaram de participar do desenvolvimento do tronco, estando fixados apenas pela compressão periférica gerada pelo crescimento diametral do fuste (SILVA, 2002).

Considerando a possibilidade da presença de defeitos nas madeiras das espécies escolhidas, foram determinados critérios de rejeição ou aceitação de peças para uso na malha estrutural elástica projetada. Nesse sentido, foi estabelecido a impossibilidade de uso em caso de presença de: nós mortos (soltos), podridão, perfurações e rachaduras que comprometessem a seção da peça. Com base nas experiências adquiridas, durante os ensaios de flexão feitos, também foi estipulado que as madeiras classificadas como de boa qualidade fossem destinadas aos pontos mais propensos às cargas de flexão. Por fim, tentou-se evitar grandes defeitos nas peças que fizeram parte da estrutura *gridshell* construída.

## CAPÍTULO 7

### Construção da *gridshell*

#### 7.1 Corte das peças

Para essa etapa foi elaborado uma guia de fabricação, o qual compreendia um plano de corte das peças que consistiu em uma tabela com as dimensões, cores, quantidades e comprimento total de madeira (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Medidas e quantidades de cada tipologia das peças.

<i>Peça</i>	<i>Medida (metros)</i>	<i>Cor da peça</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Comp. total (metros)</i>
<i>P1</i>	2,20	Laranja	72	158,40
<i>P2</i>	2,13	Azul	112	238,93
<i>P3</i>	1,80	Goiaba	16	28,80
<i>P4</i>	1,47	Verde	16	23,52
<i>P5</i>	1,27	Vermelho	8	10,16
<i>P6</i>	0,40	Ciano	220	88,00
<i>P7</i>	0,30	Amarelo	172	51,60
<i>P8</i>	0,20	Rosa	96	19,20
		<b>Total</b>	<b>712</b>	<b>618,61</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

A tabela foi complementada com desenhos apresentando as dimensões de cada componente e a indicação de localização dos furos alongados de quatro centímetros com seis milímetros de diâmetro ou furos pontuais de mesmo diâmetro (Figura 7.1).



foram transportadas para outro local e foi iniciado o processo de separação, marcação e furação dos elementos (Figura 7.2c).

Figura 7.2 – Corte das peças e separação delas por tamanho. Corte de todas as tábuas de 15,00 cm de largura em ripas de 5,00 cm (a); Organização, separação e pintura das pontas das peças (b); Ripas aguardando separação e análise de integridade (c); Separação e pintura das demais peças, com a contagem e inclusão de mais ripas para serem cortadas conforme necessidade (d); Peças menores separadas, algumas receberiam furos centrais e outras não seriam furadas (e).



Fonte: Acervo pessoal.

As peças foram separadas por lotes de acordo com seu comprimento, e suas pontas foram pintadas com as cores definidas em projeto (Figura 7.2b, d, e).

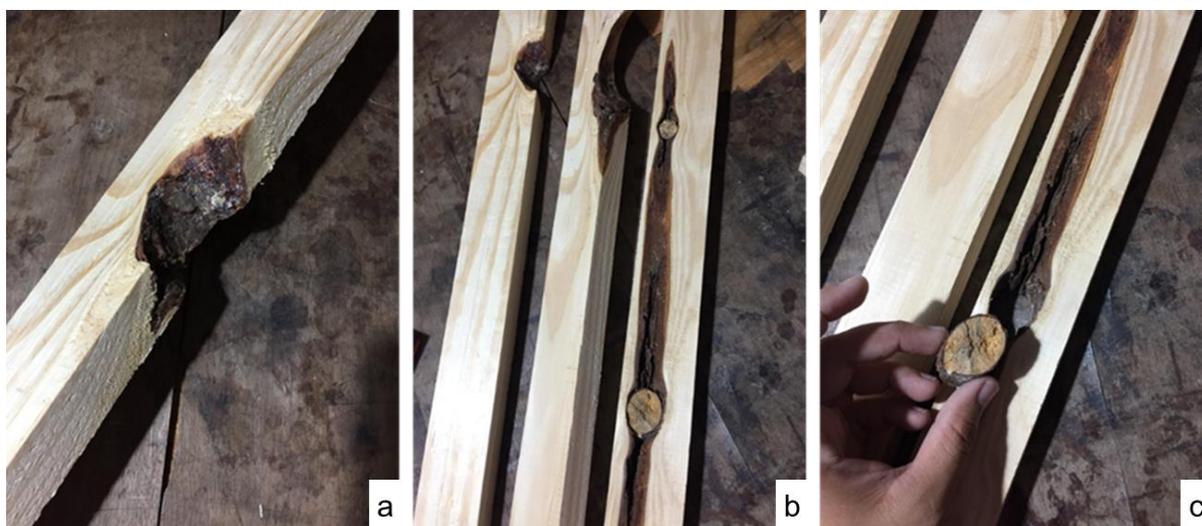
## 7.2 Descarte de peças com grandes defeitos

Para efeito de classificação visual das tábuas a serem usadas, foram considerados como grandes defeitos: (i) a presença acentuada de nós ativos ou

mortos nas peças de pinus; (ii) podridão; (iii) perfurações, vazios e rachaduras que afetassem a seção da peça e, conseqüentemente, seu desempenho.

Ainda durante a fase de fabricação das peças, foram identificados e descartados, por meio de uma análise visual, itens que apresentaram falhas, como rachaduras e vazios oriundos de nós soltos que foram serrados (Figura 7.3a) e ainda elementos com a presença de nós mortos na maior parte de sua seção (Figura 7.3c).

Figura 7.3 – Peças descartadas antes da furação em virtude da presença de nós mortos ou soltos. Peça com seção com capacidade de suporte comprometida por presença de vazio (a); Um dos conjuntos descartados (b); Pedaço solto de galho morto (nó solto) (c).



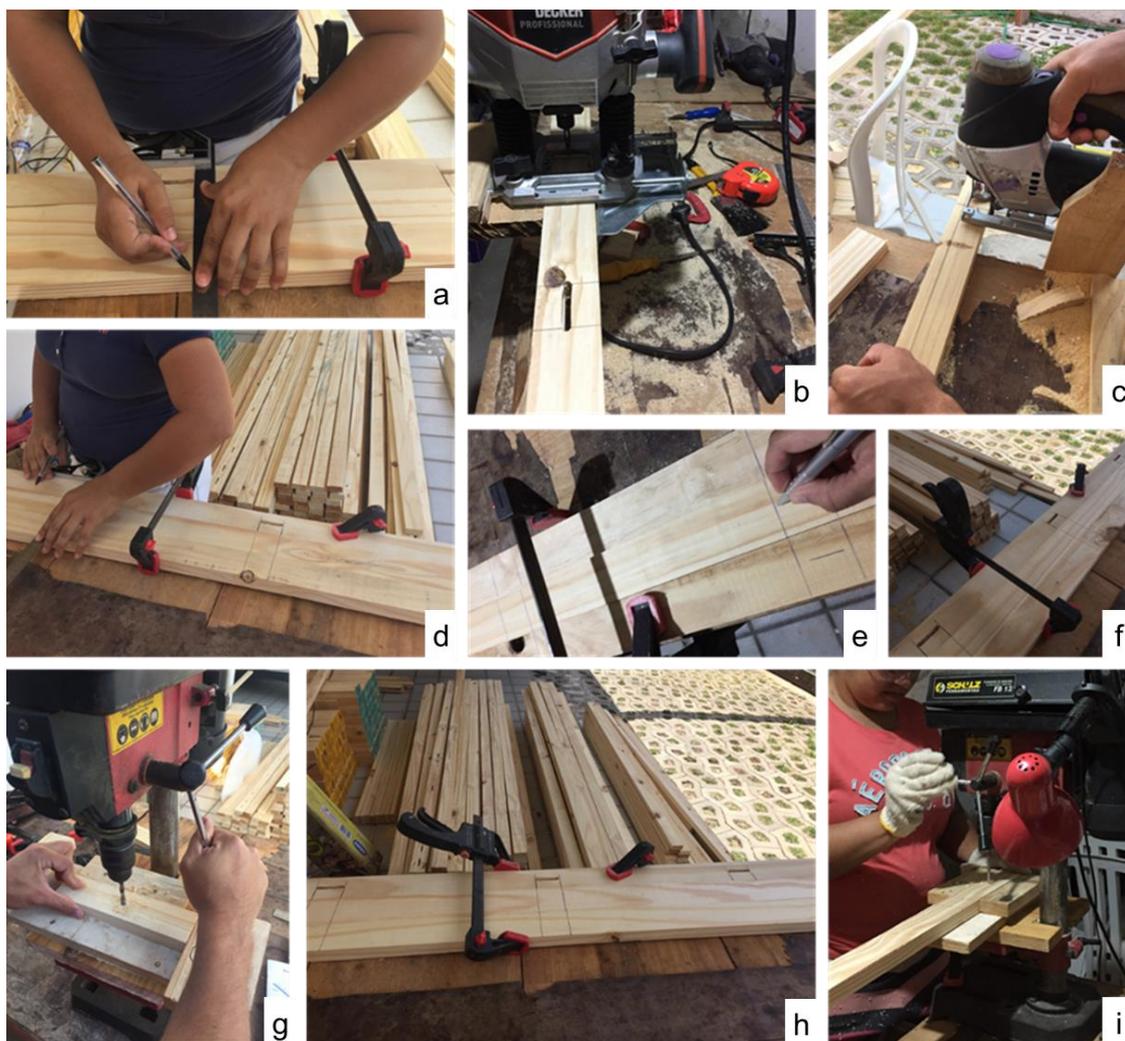
Fonte: Acervo pessoal.

As peças dispensadas foram substituídas por outras íntegras e isentas de grandes defeitos. Itens extras também foram produzidos com a intenção de trocas durante a montagem em caso da ocorrência de danos (roturas, por exemplo).

### 7.3 Marcação e furação das peças

Nesta etapa foram marcados e confeccionados os furos das peças matrizes de todos os oito tipos existentes (Figura 7.4a, d, e, f, h). Os modelos, então, foram utilizados para marcar as demais peças de cada tipologia com auxílio de sargentos e esquadros. Para agilizar e facilitar o trabalho, duas peças foram marcadas por vez (Figura 7.4a).

Figura 7.4 – Marcação, corte e furação das peças. Marcação de duas peças simultaneamente com uso de esquadro (a); Furação feita seguindo as marcações através de tupa de coluna (b); Serra tico-tico usada no corte de peças (c); Posicionamento de peças para marcação alinhadas com a peça matriz (d); Marcação da parte que seria fresada com a tupa para acelerar o processo (e); Sargentos usados para prender as peças à bancada e alinhá-las com a peça matriz (f); Furadeira de coluna usada para perfuração das peças que receberam apenas furo central (g); Peças no processo de marcação e ao fundo as ripas a serem marcadas (h); Furadeira de coluna sendo usada para facilitar o trabalho da tupa, fazendo furos nas duas extremidades das marcações (i).

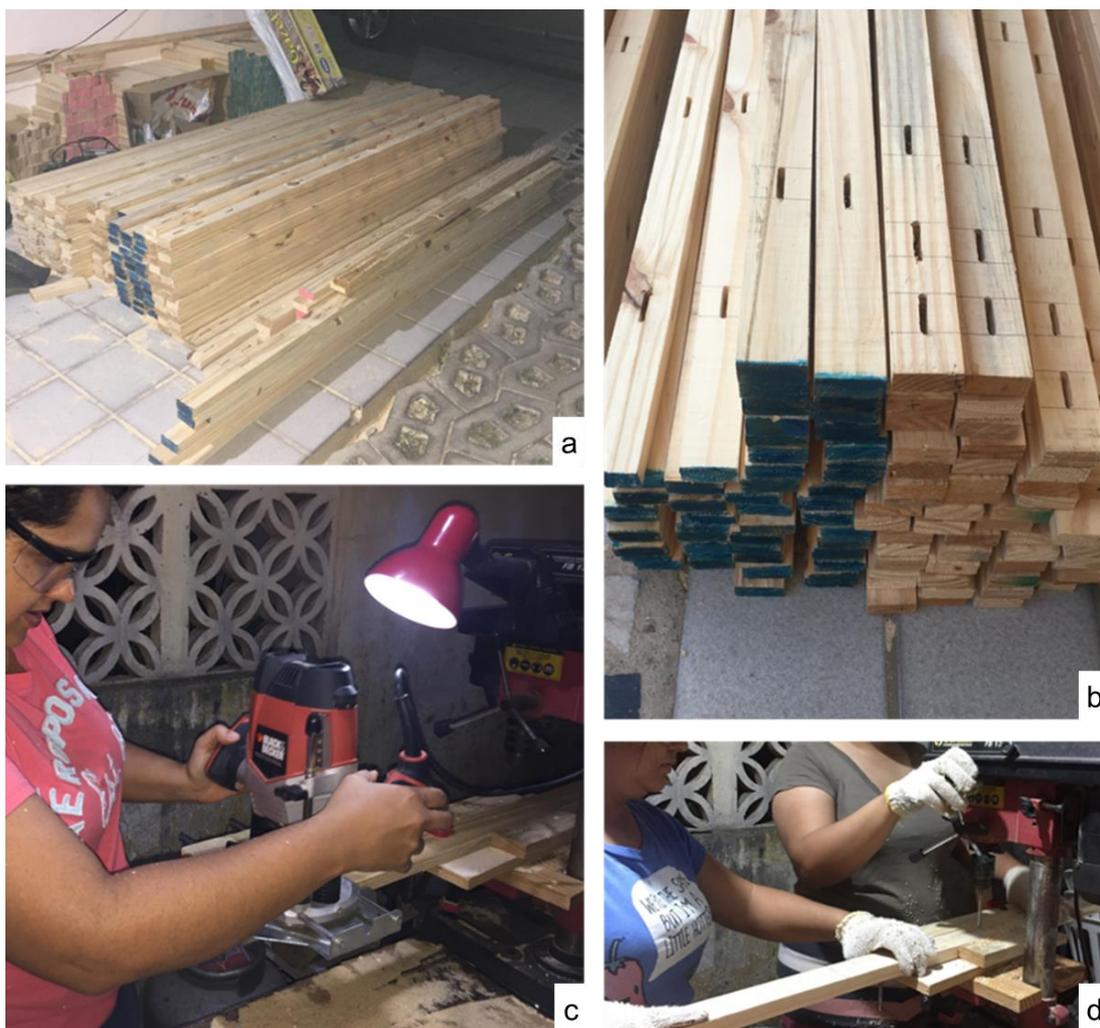


Fonte: Acervo pessoal.

Após essa etapa de marcação, iniciou-se a furação usando serra de mão tico-tico (Figura 7.4c), tupa de coluna (Figura 7.4b) e furadeira de bancada (Figura 7.4g). Para as peças menores (dois tipos, cores rosa e amarela), foi usada a furadeira de bancada para feitura de furo central, com uso de broca para madeira de diâmetro de 6,00 mm (Figura 7.4g). A peça na cor ciano de 40,00 cm foi a única que não recebeu furos, uma vez que não foi possível prever onde seriam necessários, já que esta seria usada para travar a *grid* na curvatura final.

Algumas diferentes estratégias foram testadas para minimizar esforços empregados durante a furação. Uma delas foi a confecção de furos nas extremidades dos rasgos a serem feitos com uso da tupa, o que permitiu mais agilidade e precisão a cada furo alongado (Figura 7.5d).

Figura 7.5 – Peças prontas (a, b) e rasgos (furos alongados) feitos com uso de tupa de coluna (c) e furadeira de bancada sendo usada (d).



Fonte: Acervo pessoal.

Para manter o alinhamento e a centralização dos furos, as ferramentas foram calibradas de acordo com a largura das peças e guias foram feitas para manter o padrão de cada modelo. Além disso, as peças foram presas à bancada com o uso de sargentos e alicates de pressão (Figura 7.5c, d). Esse processo foi realizado em seis dias e por 1 carpinteiro e 3 ajudantes.

## 7.4 Preparativos que antecederam a construção

A etapa de montagem envolveu uma série de ações que abriram caminho para a execução propriamente dita da estrutura. Nessa fase, foi organizado um Workshop que ocorreu em diferentes momentos, evento no qual os participantes voluntários receberam instruções e auxiliaram na construção da *gridshell* projetada. A primeira atividade teve o objetivo de instruir os integrantes das equipes de montagem sobre os detalhes construtivos, e antes do evento principal, houve uma palestra, na qual foram mostrados e manuseados parte das ferramentas, dos equipamentos e dos materiais a serem usados durante o processo de elevação (Figura 7.6).

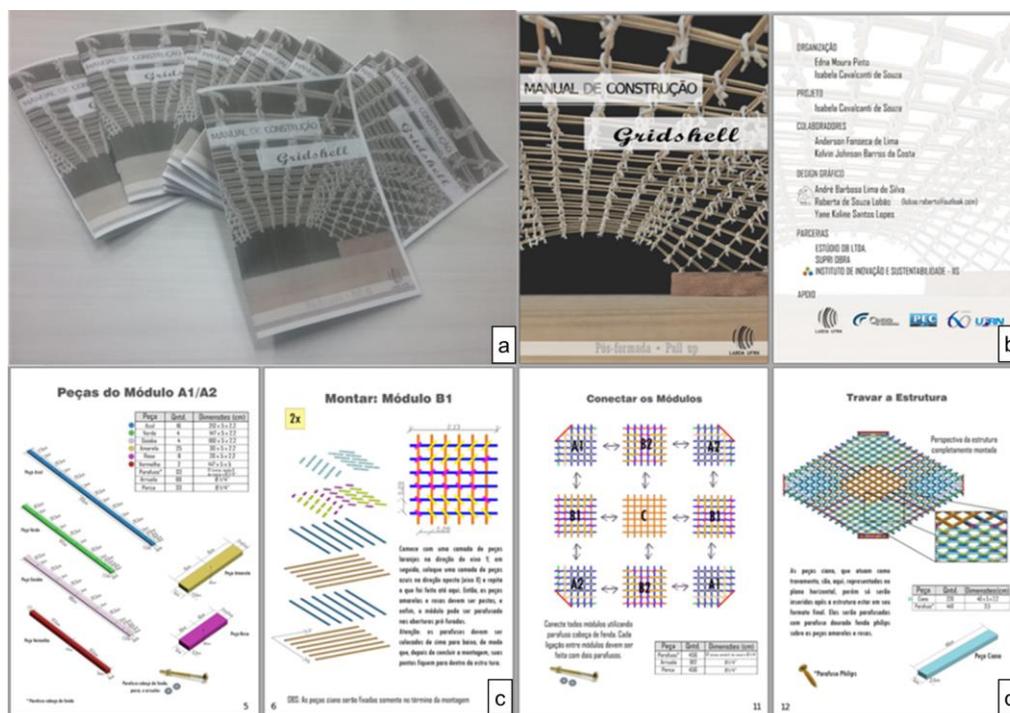
Figura 7.6 – Alguns dos equipamentos, ferramentas e materiais a serem usados durante a montagem da *grid*. Martelo, cinta esticadora, arruelas, chave de boca e cordas (a); Roldana e cordas (b); Catracas manuais (guincho tipo tifor) (c); Serra circular e discos de corte (d); Capacetes de proteção (e); Luvas (EPI) (f); Parafusos separados (g); Parafuso, porca e arruelas (h).



Fonte: Acervo pessoal.

Tendo como base o projeto, observações e análises do processo até esta etapa, em consonância com a literatura consultada, foi elaborado um manual descritivo da cobertura a ser montada. O manual foi apresentado à equipe de montagem, como preparativo para a execução do trabalho, considerando a não familiaridade com a atividade (Figura 7.7).

Figura 7.7 – Imagens de parte do conteúdo do *Manual de Construção da Gridshell*. Manuais prontos (a); Capa e ficha técnica (b); Descrição das peças dos módulos A e da montagem do módulo B1(c); Indicação de união dos módulos e posição dos travamentos (d).



Fonte: Acervo pessoal.

No manual as diferentes peças foram identificadas com as cores predefinidas na fase de projeto e os módulos receberam uma nomenclatura mais específica, ficando, portanto, 2 módulos do tipo A1, 2 x A2, 2 x B1, 2 x B2 e 1 x C (Figura 7.7d). Isso ocorreu porque os trechos do tipo A possuíam o mesmo número de peças, mas a ordem de montagem de suas camadas era distinta. O guia de bolso, como também foi chamado, recebeu ainda tabelas mostrando as quantidades e tipologias das peças que formavam cada módulo e o respectivo número de parafusos a serem usados (Figura 7.7c). Ele contou também com desenhos mostrando cada camada de ripas separadamente, o que ajudou bastante no momento da união dos elementos (Figura 7.7c).

## 7.5 Montagem da Dunas Gridshell

O local escolhido para a montagem dos módulos precisava oferecer um pavimento resistente e ao mesmo tempo capaz de escoar a água a ser usada no

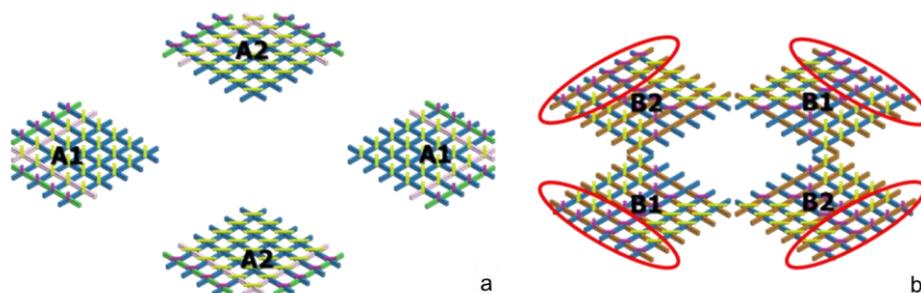
umedecimento da madeira. Por esse motivo, foi selecionado um estacionamento pavimentado com paralelepípedos no interior do Campus Central da UFRN, o que facilitou o manuseio de pequenos materiais, o trânsito dos carros de apoio e do caminhão *munck* e ofereceu suporte aos andaimes usados para erguer a *grid*.

### 7.5.1 Primeiro dia

Para dar início à montagem, os participantes do Workshop, alunos da UFRN (pós-graduação do PEC e de graduação do curso de arquitetura), foram separados em dois grupos de cinco pessoas, e o restante do pessoal ficou na função de volantes (mais cinco pessoas). Desse modo, os integrantes das equipes foram responsáveis pela montagem dos módulos, enquanto os volantes ficaram incumbidos da distribuição dos insumos, tais como: parafusos, porcas, arruelas, peças e ferramentas.

As peças de madeira mais íntegras, com as fibras/grã paralelas, foram direcionadas para pontos que exigiriam maior flexibilidade, enquanto os trechos com a estimativa de menor solicitação de esforços de flexão receberam peças com pequenos defeitos, como a presença de nós ativos. Como pode ser observado na Figura 7.8, todos os grupos chamados de A (A1 ou A2) receberam peças feitas com madeira de qualidade superior, visto que seriam as mais solicitadas por esforços de flexão (de acordo com estimativas), assim como as bordas externas dos trechos B (B1 e B2).

Figura 7.8 – Módulos que receberam as peças de madeira selecionadas como melhores. Módulos do tipo A (a) e módulos do tipo B (destaque das peças a serem mais solicitadas nos trechos de acordo com as análises) (b).



Fonte: Acervo pessoal.

Ainda se destaca que a seleção das ripas ocorreu com o objetivo de otimizar o custo com a matéria-prima. Ou seja, mesmo peças com presença de nós foram utilizadas, desde que esses não estivessem em grande número ou fossem soltos. Isso correu em virtude de a espécie de pinus usada resultar na produção de madeira com uma considerável concentração de nós.

Seguindo as diretrizes do manual, os voluntários receberam as peças destinadas à confecção de cada módulo separadamente (Figura 7.9c) e conseguiram unir rapidamente os elementos entregues (Figura 7.9d).

Figura 7.9 – Separação das peças por cor e tamanho (a, b); Separação das peças por módulo (c); Montagem do módulo C (d).



Fonte: Acervo pessoal.

Os nove trechos foram montados em duas horas (Figura 7.10e). Na montagem foram usados 312 parafusos de 12,00 ou 15,00 cm de comprimento (dependendo do número de peças conectadas) e 6,00 mm de diâmetro, 624 arruelas e 312 porcas para conectar as duas camadas em todos os módulos.

Em seguida, os trechos foram organizados em conjuntos de três (como mostrado na Figura 7.10b, e, f), e as conexões entre as tipologias foram feitas com um par de parafusos em cada linha que se encontrava, unindo as camadas intermódulos.

Figura 7.10 – Módulo C sendo inspecionado e seus parafusos, arruelas e porcas sendo instalados (a); Conjunto com três módulos (2,00 x 2,00 metros cada) sendo posicionado antes da conexão (b); Grade em evolução (c); Último módulo sendo construído e posicionado na grade (d); Todos os módulos prontos posicionados lado a lado (e); Os três conjuntos com três módulos prontos sendo posicionados para a união final.



Fonte: Acervo pessoal.

As três fileiras, quando terminadas, foram postas lado a lado e foi iniciado o encaixe das camadas entre os conjuntos, de forma que a grade final ficasse plana e completamente conectada (Figura 7.11a, b).

Figura 7.11 – Conjuntos de módulos sendo unidos (a, b); Peças com furos alongados em níveis diferentes mostrando encaixe como projetado (c); Conjunto de ligações de parafusos em par já concluídas (d); Ligações de continuidade sendo feitas entre os outros módulos (e); Vista lateral de ligação de continuidade concluída (f).

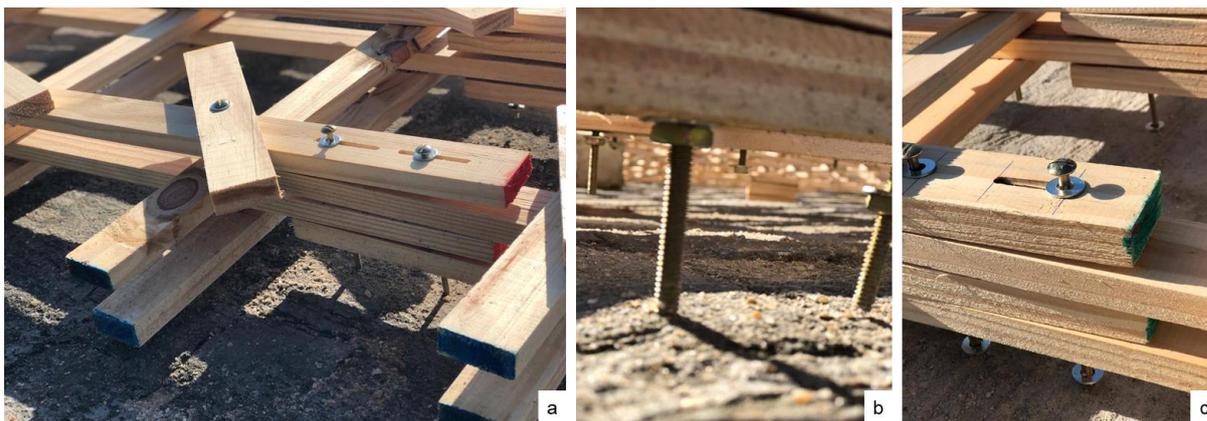


Fonte: Acervo pessoal.

A montagem dos módulos (trechos) seguiu a metodologia desenvolvida e usada para a confecção da maquete, ou seja, apesar de o tamanho das peças ser maior, foi possível organizar suas conexões uma a uma de maneira facilitada, graças ao teste executado com a estrutura diminuída. Essas ligações entre os módulos ocorreram de maneira lenta, e com duas horas e meia de trabalho foi possível visualizar a grade pronta (Figura 7.11d, e). O número total de ligações de continuidade feitas em par para unir os elementos foi de 144. Essas foram compostas por 144 parafusos de 120,00 mm de comprimento e 6,00 mm de diâmetro, 288 arruelas e 144 porcas (Figura 7.11f). Todas as conexões foram feitas com parafusos passando por furos alongados, permitindo o deslizamento de uma camada sobre a outra e promovendo encaixes entre as partes.

A união entre módulos foi realizada intercalando-se as camadas, de modo que a grade ficou completamente plana ao final (Figura 7.12a). Observou-se que cerca de cinco parafusos precisaram ser trocados, pois o atrito deles com o pavimento, durante o trabalho de encaixe, provocou danos às roscas, dificultando a entrada e o aperto das porcas (Figura 7.12b).

Figura 7.12 – Detalhe das ligações de continuidade com peças intercaladas em dupla camada (a); Parafusos afetados pelo atrito com o pavimento (b); Encaixe das arruelas e porcas nos parafusos (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Finalizada a montagem da malha plana, procedeu-se o processo de encurvamento (Figura 7.13).

Figura 7.13 – Grade pronta ao final do primeiro dia de Workshop. Vista de um dos apoios da grade (a); Grande completa com calços em sua parte central (b); Vista lateral da malha onde se percebe leve curvatura (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Após o umedecimento foram colocados calços sob a parte central da malha para a flexão (Figura 7.13).

### 7.5.2 Segundo dia

Após o umedecimento, foram posicionados barrotes no centro da estrutura por onde foram enlaçadas as cintas do guincho. O processo foi realizado de forma lenta, sendo a malha erguida e apoiada com pequenos calços. Quando as peças apresentavam rachaduras que indicavam iminência de quebra ou rompimentos, o processo era interrompido, para que estas fossem substituídas. Três peças de 2,20 m foram substituídas no módulo central, chamado de C (Figura 7.14c, d, e). Observou-se que os rompimentos ocorreram em virtude da acentuada presença de nós nessas peças, o que durante a fabricação não pôde ser evitado. Apesar das rupturas, a grade continuou unida, isso porque ela foi composta por duas camadas, não ocorrendo quebras duplas em nenhum ponto. Ou seja, embora a camada inferior tenha sofrido rupturas, a superior pôde suportar a trama e as ripas avariadas foram substituídas.

Figura 7.14 – Parafusos sendo folgados para retirada de peças avariadas (a); Substituição de peça no módulo B2 inferior (b); Parte de peça quebrada (c); Peça com nó morto e seção fragilizada (d); Peça que sofreu rotura em ponto de rasgo alongado onde se tinha presença de nó (e); Substituição de peça danificada no módulo C (central) (f).

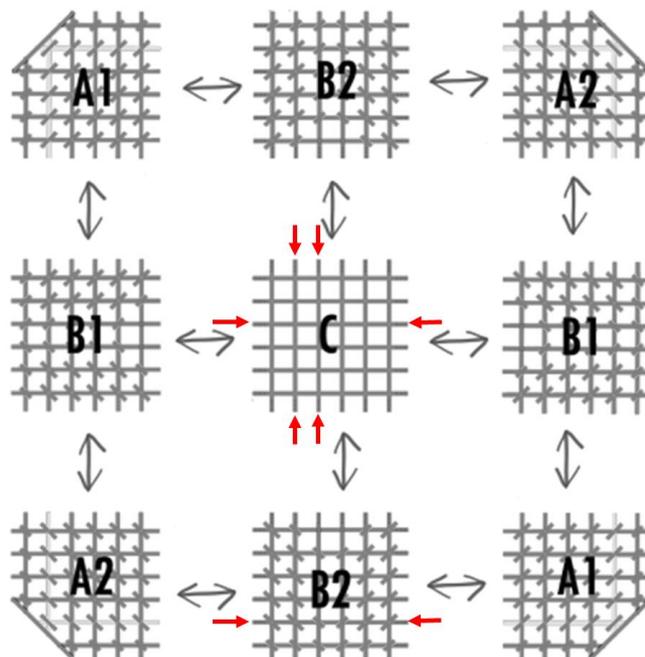


Fonte: Acervo pessoal.

Destaca-se ainda que as peças com mais falhas foram direcionadas para a confecção do módulo C. Isso ocorreu principalmente em virtude da facilidade de substituí-las, dado que esse era o trecho mais simples e com menor número de elementos; e também, em decorrência da menor ação dos esforços de flexão nesse ponto, como indicaram as análises prévias da maquete e dos desenhos computacionais.

Uma quarta peça com 2,20 m ainda precisou ser substituída na camada inferior em um dos módulos B2 (Figura 7.14a, b), o que também ocorreu com facilidade, pois a rotura foi detectada enquanto a grade ainda estava com pouca curvatura. As peças substituídas estão indicadas na vista superior da grade na Figura 7.15.

Figura 7.15 – Peças substituídas em virtude de avarias indicadas por setas vermelhas.



Fonte: Acervo pessoal.

Após a troca das peças, a estrutura continuou a ser içada com auxílio do guincho (Figura 7.16a). Atingida a altura de cerca de um metro, a *grid* foi apoiada sobre andaimes colocados por baixo de sua parte central (Figura 7.16b). A casca ainda em formação continuou sendo molhada para que a madeira pudesse ceder e se estabilizar lentamente. Em seguida, pontaletes de madeira foram posicionadas nas laterais da grade para conduzi-rem a curvatura nos pontos pré-programados (Figura 7.16c).

Figura 7.16 – Início do encurvamento com uso do guincho (a); Instalação dos andaimes (b) e pontaletes de madeira (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Após ser observado que o apoio dos pontaletes estava exercendo pressão pontual em alguns elementos da malha, estes foram substituídos por andaimes para evitar danos (Figura 7.17a).

Figura 7.17 – Substituição do sistema de apoio (a); Alças de içamento sendo retiradas e caminhão *munck* sendo liberado (b); Substituição concluída (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Os andaimes proporcionaram melhor apoio à estrutura, evitando novos rompimentos (Figura 7.17b). Os andaimes centrais também foram substituídos por outros, que forneceram mais uniformidade à curvatura (Figura 7.17b, c). Os dois primeiros dias determinaram a metodologia a ser usada nos dias subsequentes, a partir de grade plana, foi obtida uma geometria curva, flexionando-se as ripas de madeira, dando origem à *gridshell* “pós-formada”. Para minimizar os esforços verticais pontuais, sofridos pelas peças de madeira nos pontos de içamento, barrotes foram posicionados no centro da grade para distribuir as cargas aplicadas pelas fitas do guindaste.

### 7.5.3 Do terceiro dia até a curvatura prevista e seu travamento

No terceiro dia de montagem a *gridshell* começou a tomar a forma preestabelecida e suas extremidades começaram a envergar (Figura 7.18b). Cabe apontar que o uso de guindaste para içamento é próprio da metodologia denominada *Pull Up*. Nesse caso, também ocorreu apoio por meio de estacas ou andaimes, e uso de cordas, cabos de aço e catracas manuais que foram instalados nas duas diagonais da grelha (formando um “X”) (Figura 7.18a). À medida que os cabos e cordas foram

sendo tracionados, a grade foi curvando e assumindo a forma de casca (Figura 7.18c, d, e, f).

Figura 7.18 – Tracionamento das cordas por meio de catraca de cargas (a); Terceiro dia de montagem (b); Encurvamento da estrutura ao longo dos dias (c, d, e, f).



Fonte: Acervo pessoal.

Esse método de elevação conhecido como *Pull Up* tem o benefício da maior velocidade de movimentação da estrutura, no entanto, apresenta algumas desvantagens. Os cabos, mesmo quando ramificados em diferentes pontos de fixação, aplicam grandes cargas pontuais, concentrando tensões na estrutura. No caso descrito, as fitas aplicadas em quatro pontos diferentes distribuem melhor as cargas verticais aplicadas, porém elas introduzem forças compressivas que aumentam o risco de flambagem das ripas. Além disso, o método só aplica forças na direção vertical, no entanto, a falta de restrição horizontal das peças de madeira é benéfica, pois a distorção das camadas da grade é necessária durante a montagem. Normalmente, a elevação por guindaste requer um tempo maior, sendo aplicada mais para construção de pequenas conchas.

Pode-se dizer ainda que, durante a construção dessa *gridshell* pós-formada de pinus, um método de elevação foi desenvolvido a partir da combinação do *Pull Up* com o *Ease Down* descritos por Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016). Isso porque foram posicionados andaimes próximos às extremidades da *grid* e uma torre de andaimes de três metros em sua parte central (Figura 7.18b). Uma corda presa à torre

ainda foi colocada no centro da *grid* para mantê-lo sempre erguido, facilitando o processo de encurvamento que também foi ajudado pela ação da gravidade, em virtude do peso próprio da estrutura (Figura 7.18f).

Ao longo do processo de arqueamento da *grid*, foi necessário folgar todos os parafusos para que as ripas não sofressem flexão excessiva em seus pontos de ligação com outro módulo e rompessem (Figura 7.19b). Essa decisão foi tomada a partir da análise de outros projetos, do estudo dos rompimentos ocorridos na maquete e quebras ocorridas no início da montagem da *gridshell* (Figura 7.19c).

Várias trocas de catracas foram feitas durante o arqueamento. Quando a capacidade delas de acumular cabos era atingida, uma catraca auxiliar era instalada enquanto os cabos eram desenrolados, diminuídos e reposicionados para se dar continuidade ao tensionamento (Figura 7.19a).

Figura 7.19 – Troca da catraca após atingir limite de tracionamento (a); Folga de parafusos (b); Parte de elemento quebrado ao longo do tracionamento (c).



Fonte: Acervo pessoal.

O trabalho de encurvamento da grade foi executado lentamente e com umedecimento. Como discorrem Glass e Zelinka (2010), a madeira é um material higroscópico, ou seja, absorve a umidade do meio em que está inserida. Essa troca com o ambiente tem efeito direto sobre suas propriedades físico-mecânicas e, conseqüentemente, sobre seu desempenho, pois quanto maior o teor de umidade, menor será o módulo de elasticidade (LIMA et al., 1986). Portanto, o umedecimento contribuiu para que durante o processo de encurvamento houvesse menos rompimentos.

Inicialmente, a estrutura foi apoiada por andaimes de um metro de altura, porém rapidamente as extremidades da *grid* tocaram o chão, impossibilitando a continuação do processo de arqueamento. Por esse motivo, a *grid* foi novamente içada pelo guincho (caminhão *munck*) e a estrutura de andaimes foi remontada com a altura de dois metros em cada apoio (Figura 7.20a, b, c). Para esse procedimento foi realizada a liberação das cordas dos andaimes anteriormente, para que a grade pudesse continuar flexionada por suas diagonais no momento da elevação, mantendo sua forma.

Para manter o centro da *grid* um pouco mais elevado em relação aos apoios intermediários, foi necessária a adição de paralelepípedos de meio fio apoiando o conjunto central (Figura 7.20c).

Figura 7.20 – Grade içada e apoios sendo retirados (a); Malha sem apoios e suspensa pelo guincho (b); Aumento dos apoios com adição de um nível a mais de andaimes (c); Guincho liberado e estrutura apoiada apenas pelos andaimes (d).



Fonte: Acervo pessoal.

Após duas semanas de tracionamentos espaçados, com uso de constantes ciclos de molhagens, a curvatura final foi atingida (Figura 7.21). A estrutura ficou com aproximadamente 1,10 cm de altura nos arcos de entrada, porém cada lado apresentou uma pequena discrepância em relação aos outros. Um dos motivos para isso foi o desnivelamento do local onde foi montada a *grid*, sendo, portanto, recomendado que o local de montagem escolhido seja nivelado para garantir a simetria do encurvamento da casca.

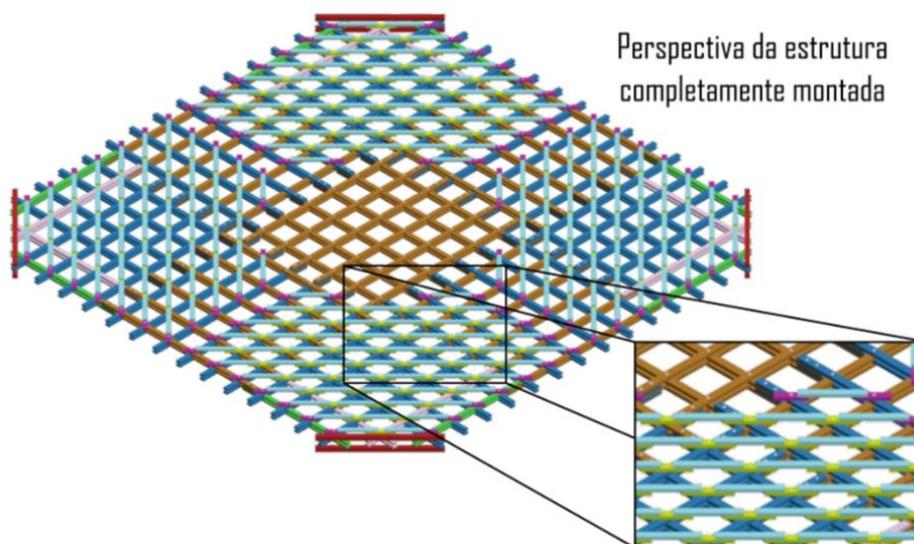
Figura 7.21 – Acentuação da curvatura ao longo dos últimos dias de tracionamento. Estrutura molhada e sendo curvada (a); Finalização de dia de trabalho já no período da noite (b); Posição final (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Dando continuidade ao processo, o travamento da *Gridshell* foi realizado com a colocação das peças chamadas de P6 (detalhe da Figura 7.22), representadas em projeto na cor ciano e possuindo 40,00 cm de comprimento. Foram utilizadas 220 peças distribuídas conforme mostrado na Figura 7.22.

Figura 7.22 – Modelo explicativo para alocação das peças de travamento.

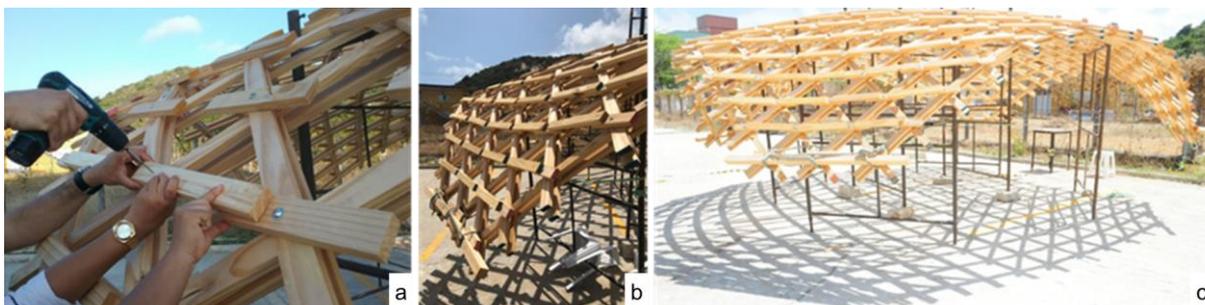


Fonte: Acervo pessoal.

Embora as extremidades da *grid* tenham sido apoiadas em pontos equivalentes, também ocorreu uma defasagem nos tracionamentos das cordas em diagonal, além do desnivelamento do solo já comentado. Esses fatores combinados ocasionaram essa diferença de alguns centímetros na curvatura dos arcos. Porém,

esses detalhes construtivos não prejudicaram sua aparência final (Figura 7.23c) e foram considerados mínimos.

Figura 7.23 – Peças de travamento da grade sendo instaladas (a); Travamento de um dos lados concluído (b); Configuração final da malha após travamento (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Após essa fase, as medidas finais das diagonais da *gridshell* em cada ponto de apoio foram mensuradas para dar início a sua fundação.

## 7.6 Execução da fundação

A fundação de apoio da *gridshell* foi executada com o uso de doze toras de eucalipto roliças de 2,50 m de comprimento e diâmetro médio de 0,12 m, tratadas com CCA em autoclave. Como descreve Silva (2006), o CCA é um preservativo hidrossolúvel feito à base de cobre, cromo e arsênio, que desempenham as funções de inseticida e fungicida com excelência. O elemento cromo é o responsável pela fixação do arsênio (inseticida) e do cobre (fungicida), que aderem à parede celular da madeira, agindo contra a ação dos cupins, dos fungos e das bactérias, além da umidade, da exposição ao sol, bem como de outros agentes naturais.

Foram empregadas três estacas em cada apoio, com base na disposição dos elementos da *grid* e à semelhança da malha já executada. Esse tipo de fundação foi escolhido em virtude da forma de apoio da malha e com base em estudos feitos sobre os pontos de apoio de outras *gridshells*, como, por exemplo, a executada em Itapeva/SP. Para dar início à execução da fundação, foi feito um croqui mostrando

seus detalhes construtivos e seu gabarito foi marcado conforme mostrado na Figura 7.24.

Figura 7.24 – Croqui da fundação (a); Marcação do gabarito e *gridshell* ao fundo (b).



Fonte: Acervo pessoal.

Posteriormente, foram escavados no solo quatro retângulos de 1,70 metros de comprimento, por 0,70 metros de largura e 1,20 metros de profundidade (Figura 7.25a). Cada base escavada recebeu três estacas de eucalipto que ganharam adicionalmente uma pintura com óleo queimado para assegurar maior durabilidade à fundação contra a ação de xilófagos (Figura 7.25b).

Nas valas escavadas foi lançado concreto com traço 1:2:3, formando assim blocos de fundação de 1,50 m x 0,40 m x 0,50 metros (comprimento x largura x profundidade), que fixaram as toras nos locais com 1,20 metros sob o solo e 1,30 metros acima do solo (Figura 7.25c).

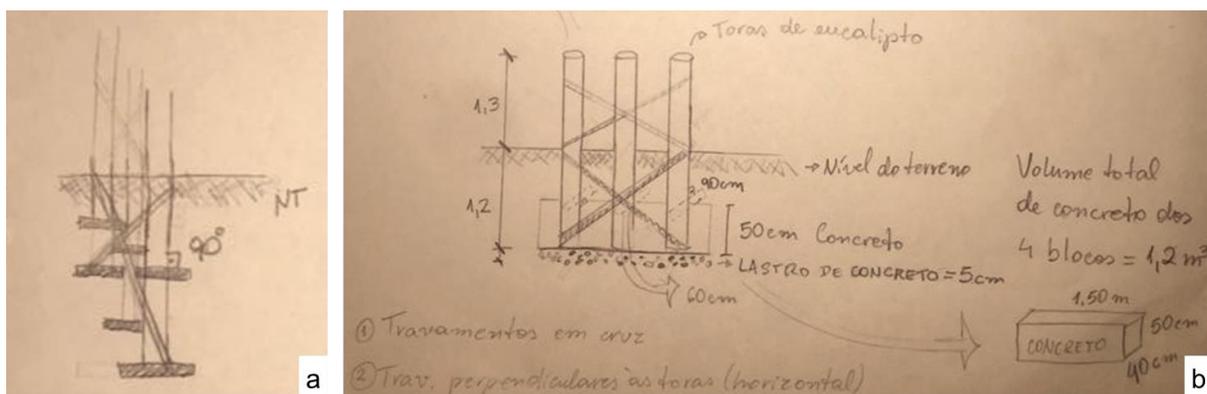
Figura 7.25 – Escavação das valas para execução dos blocos de concreto (a); Conjunto de estacas sendo unidas (contraventadas nas diagonais) (b); Centralização dos pilares no local escavado (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Os quatro conjuntos de toras de eucaliptos receberam dois contraventamentos que foram feitos por meio de ripas de pinus pré-fixadas em “X” (diagonal) (Figura 7.26b). De modo a assegurar rigidez lateral, também foram colocados elementos de travamento no plano perpendicular às toras, sendo usadas para tal ripas com 35 cm de comprimento (Figura 7.26a).

Figura 7.26 – (a) Croqui das peças de travamento perpendiculares às toras; (b) Croqui dos contraventamentos.



Fonte: Acervo pessoal.

Após a concretagem do bloco (Figura 7.27c, d), e do tempo de secagem, a fôrma foi retirada e ripas de 0,025 m X 0,09 m X 0,35 m (espessura x largura x comprimento) foram colocadas sobre o concreto, perpendicular às toras (Figura

7.27e). Essas peças foram parafusadas nas toras com o objetivo de promover mais atrito e dificultar uma possível ação de arrancamento das estacas de eucalipto. Isso poderia ocorrer em razão de a estrutura ser muito leve em relação a sua área. Dessa forma, quando o vento bate são gerados esforços de arrancamento nos pilares (toras de madeira), que devem ser transmitidos aos elementos da fundação (bloco de concreto e estacas) e ao solo. Por isso, é essencial que as toras possam suportar esforços de tração, que possam ocorrer, sem tender a sair do solo. Já em edifícios pesados, como prédios residenciais, as fundações devem ser dimensionadas para suportar esforços de compressão, pois uma carga normal muito grande é lançada sobre a base em virtude do peso da estrutura.

Figura 7.27 – Processo de execução da fundação. Colocação da fôrma nivelada no buraco escavado (a); Colocação das toras de eucalipto contraventadas dentro da fôrma (b); Concretagem das toras já niveladas (c); Umedecimento do concreto para melhorar o processo de cura (d); Retirada da fôrma (e); Colocação de elementos de travamento perpendicular às toras (f); Solo sendo compactado sobre o bloco de fundação (g); Uso de constante molhagem na compactação (h).

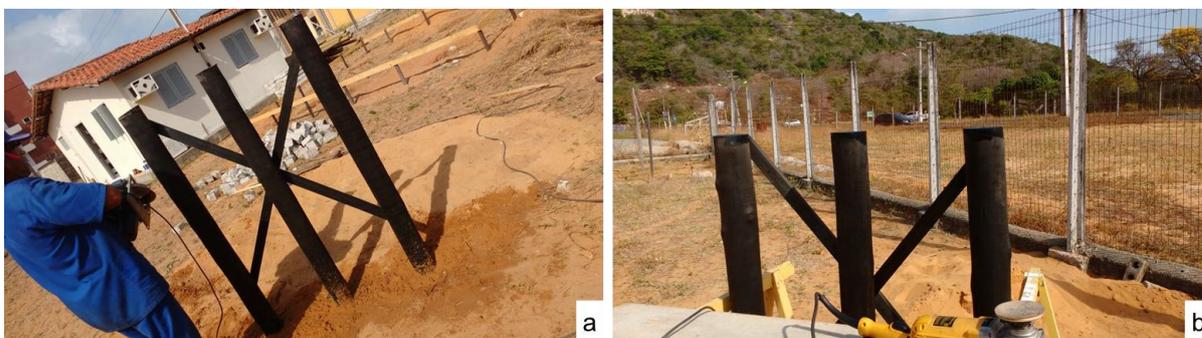


Fonte: Acervo pessoal.

Para finalizar, cada bloco de fundação, já seco, foi coberto por solo, e com auxílio de uma mangueira as camadas de areia foram sendo molhadas e compactadas (Figura 7.27f, g). Barrotes foram usados para auxiliar a apiloar a areia lançada. Ao final dessa etapa, os quatro conjuntos de pilares estavam fixados, sendo removidas as escoras.

Após essa fase, procedeu-se o nivelamento de cada pilar de eucalipto. As dimensões excedentes foram retiradas com uso de serra circular elétrica (Figura 7.28a).

Figura 7.28 – (a) Nivelamento dos pilares de madeira; (b) Lixamento dos topos e nova pintura.



Fonte: Acervo pessoal.

Em seguida, os topos foram lixados por meio de lixadeira angular elétrica, para regularização de sua superfície, recebendo novo pincelamento com óleo queimado (Figura 7.28b).

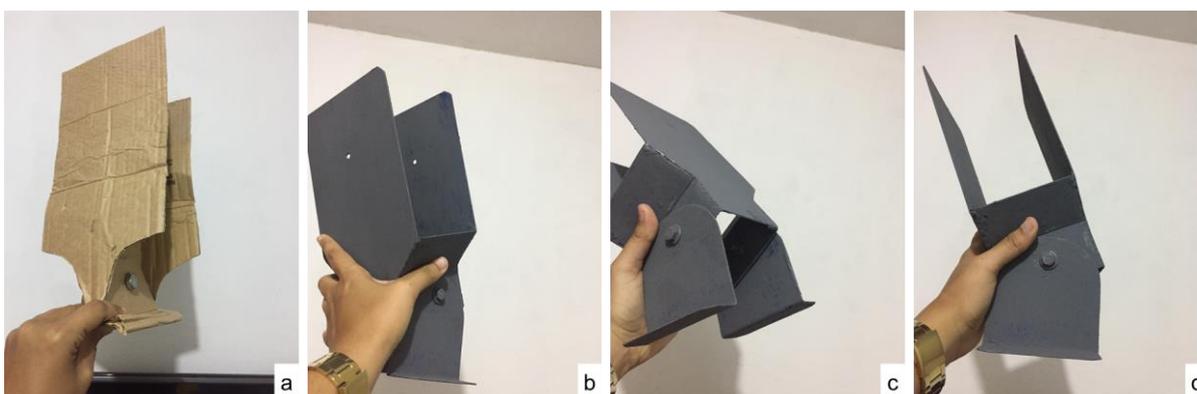
## 7.7 Confeção das conexões metálicas

A união entre a *gridshell* e a fundação de eucalipto foi realizada com um conector metálico capaz de suportar as cargas geradas pelo peso próprio da estrutura e as movimentações às quais a grade estará sujeita durante sua vida útil devido à ação do vento.

Para a confecção desse elemento de ligação, foram realizados dois protótipos para análise de viabilidade técnica. O primeiro foi feito em papelão, com uso de

parafuso de metal (Figura 7.29a), e depois de algumas modificações para facilitar a produção, um segundo modelo em escala real foi produzido em chapa metálica em serralheria (Figura 7.29b, c, d).

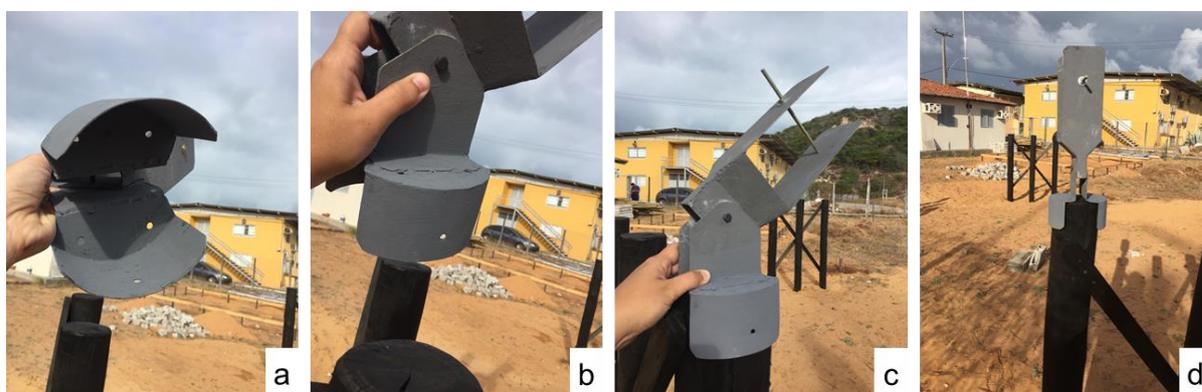
Figura 7.29 – Modelos iniciais das conexões em papelão (a) e metal (latão) (a, b, c).



Fonte: Acervo pessoal.

Após alterações, um terceiro modelo foi produzido e testado já nos pilares prontos (Figura 7.30). Depois de análises, optou-se por modificar mais alguns detalhes como largura da base, tamanho das hastes que seriam presas à *grid*, o diâmetro dos parafusos usados e a largura da chapa de aço.

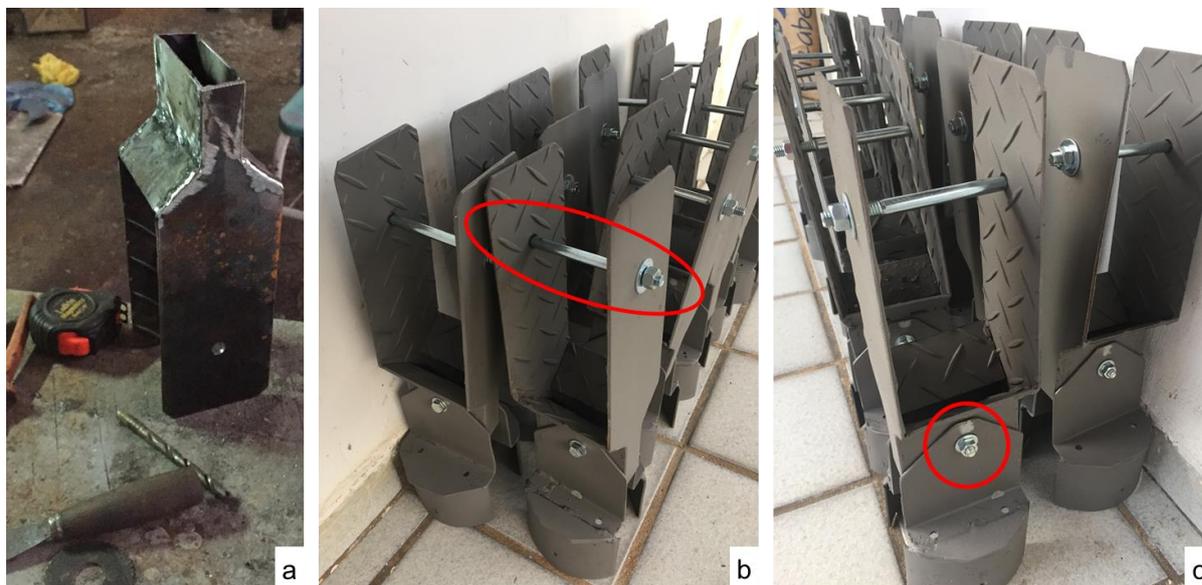
Figura 7.30 – Terceiro modelo de conexão sendo testado. Vista do encaixe projetado para fixação das toras (a); União das peças por meio de parafuso, permitindo rotação (b); Peça encaixada em pilar de eucalipto (c, d).



Fonte: Acervo pessoal.

Após essas alterações, doze peças foram produzidas conforme mostrado na Figura 7.31.

Figura 7.31 – Conexões metálicas em fabricação (a); Parafuso de 12,00 mm usado para conectar a malha às hastes de metal (b); Parafuso de 8,00 mm conectando as duas partes da peça fabricada (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Para fabricação das peças finais, foi usada chapa metálica tipo xadrez de 2,50 mm de espessura, parafusos de 12,00 mm de diâmetro na parte superior (Figura 7.31a) e parafusos de 8,00 mm para a inferior, conectando os dois elementos da peça e permitindo rotação (Figura 7.31b).

## 7.8 Acomodação da *gridshell* sobre os pilares

O processo de locomoção da *gridshell* foi iniciado com seu umedecimento completo, evitando assim danos à estrutura (Figura 7.32a). Após ser erguida com o auxílio do guincho, os andaimes foram removidos (Figura 7.32c). A grade, então curvada, foi deslocada cerca de 10,00 metros e ficou içada pelo guindaste durante todo o tempo de fixação com o travamento dos cabos em catraca (Figura 7.32h, i, j, k, l).

Figura 7.32 – Processo de fixação da *grid* nos pilares. Umedecimento e colocação das fitas de içamento na malha (a); Içamento iniciado e retirada dos andaimes de apoio (d); Estrutura no início da movimentação (c, d, e, f); Estrutura ainda elevada sendo aproximada dos pilares de fundação (g, h, i, j); Estrutura sobre os pilares de fundação começando a ser fixada (k,l).



Fonte: Acervo pessoal.

No decurso do deslocamento, a grelha se manteve na posição alcançada com o tracionamento, pois cordas instaladas nas diagonais e as peças de travamento ofereceram resistência, impedindo a malha de voltar à posição inicial. Para permitir o parafusamento das hastes de cada conexão de metal nas extremidades da *grid*, foi necessário transferir as cordas de lugar, pois alguns barrotes, usados para uniformizar a força de tração aplicada, precisaram ser removidos (Figura 7.32k). Com as pontas de apoio da *gridshell* liberadas, cada uma das doze recebeu uma conexão metálica que foi parafusada (Figura 7.33a, b), e em seguida o guincho auxiliou a equipe a aproximá-las dos pilares (Figura 7.33c).

Figura 7.33 – Encaixe e fixação das conexões com parafusos de 8,00 mm. Parafusamento da conexão no pilar de eucalipto (a); Furação de tora para facilitar parafusamento (b); Aproximação forçada da *grid* ao elemento de fundação (c); Conexão de um dos apoios concluída (d); Barrotes e cordas auxiliando no processo de aproximação das peças (e).



Fonte: Acervo pessoal.

O serviço requereu esforço da equipe e desenvolvimento de técnicas para sua execução (Figura 7.33c). Para conectar a *grid* aos pilares de eucalipto, foram usados parafusos galvanizados de 6,00 mm de diâmetro e 70,00 mm de comprimento, com rosca soberba e cabeça sextavada.

A operação durou cerca de oito horas e oito pessoas participaram da atividade. A estrutura foi molhada constantemente até a conclusão do processo (Figura 7.34b).

Figura 7.34 – Encaixe e fixação das últimas conexões (a); Umedecimento da grade (b); Remoção das cintas do guincho (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Após o término da ancoragem da *gridshell* sobre os doze pilares, as cordas e cintas puderam ser removidas e a forma final da Dunas Gridshell pôde fazer jus ao nome escolhido (Figura 7.35).

Figura 7.35 – *Gridshell* finalizada em diferentes ângulos.



Fonte: Acervo pessoal.

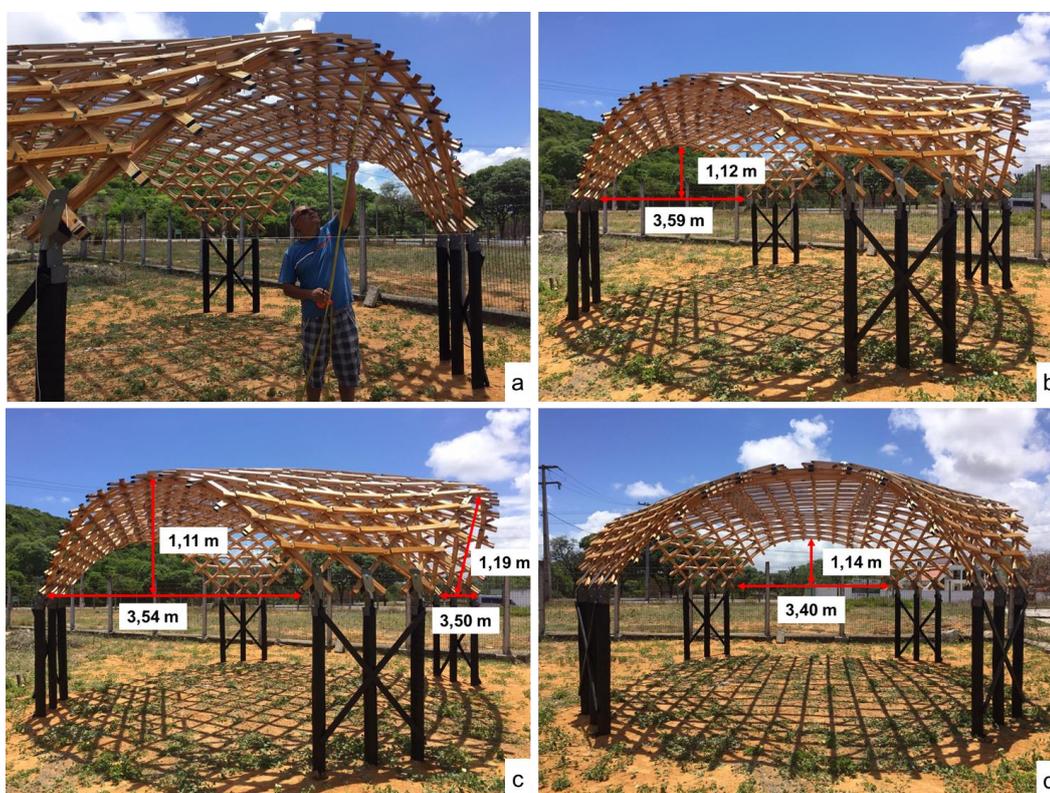
A cor amarelo-claro do pinus utilizado e os contornos curvos da grade remeteram ao formato de uma duna de areia criada pelo vento, fato que foi percebido durante sua construção, dando origem a seu nome. O nome Dunas Gridshell também

remete ao relevo da região costeira de Natal, onde predominam as formações denominadas de Dunas Costeiras e Tabuleiro Litorâneo.

### 7.9 Medição dos arcos finais e pintura da *grid*

Ainda que plano, o local de montagem não era nivelado, afetando a simetria da *grid*. A altura de cada arco foi um pouco diferente em relação aos demais (como mostra a Figura 7.36), porém essa diferença foi considerada pequena, não sendo perceptível a olho nu. O menor arco obteve 1,11 m de flecha e o maior 1,19 m, estando ambos dentro da margem estabelecida para a envergadura final requerida. Para medição dos arcos um barbante de nylon foi usado na parte inferior da estrutura, fazendo uma linha reta entre as extremidades. As medidas estão indicadas a seguir na Figura 7.36.

Figura 7.36 – Medição dos arcos de entrada da Dunas Gridshell. Processo de medição (a); Flecha e distância entre apoios do arco da entrada 1 (b); Medidas dos arcos das entradas 2 e 3 (c); Medidas do arco 4 (d).



Fonte: Elaborado pela autora.

A pintura da estrutura foi executada com Osmocolor Stain preservativo transparente, pois esse produto tem a função de preservar as madeiras e suas cores naturais (Figura 7.37). Foram usados pincéis e pistola pulverizadora para a aplicação.

Figura 7.37 – Pintura da Dunas Gridshell. Processo de pintura com pistola pulverizadora e compressor (a); Pintura manual com pincel (b); Processo em andamento (c).



Fonte: Acervo pessoal.

Esse trabalho de pintura foi feito com o objetivo de proteger as madeiras contra as intempéries naturais como sol e chuva, pois o Stain preservativo é hidro-repelente e contém proteção ultravioleta.

### 7.10 Estimativa de peso da *gridshell*

A metodologia usada para mensuração do peso total da estrutura consistiu em: (i) calcular o peso aproximado de 1,00 metro linear da madeira em ripa (1,00 m de comprimento x 2,20 cm de espessura x 5,00 cm de largura); (ii) subtrair as perdas em virtude dos furos de cada tipologia (peças P1 a P8); (iii) excluir as peças usadas somente durante a construção (peça P5); e (iv) contabilizar também o peso dos parafusos usados para a montagem. Os valores obtidos ao final desses levantamentos estão descritos no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Estimativa de peso da malha.

Insumos da grade	Peso estipulado
Madeira	337,11 kg
Parafusos grandes, arruelas e porcas	27,36 kg
Parafusos pequenos	1,07 kg
<b>Peso total</b>	<b>365,54 kg</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

O peso total obtido foi de 365,54 kg, dos quais: (i) 337,11 kg são apenas da madeira usada; (ii) 27,36 kg correspondem aos 456 parafusos grandes (12,00 e 15,00 cm), às 912 arruelas e às 456 porcas, utilizados nas ligações entre as camadas; e (iii) 1,07 kg dos parafusos pequenos (40,00 mm) usados para travamento da grade na posição curva. Cabe destacar que o peso das conexões metálicas entre a grade e a base não foi contabilizado, assim como o peso das toras de eucaliptos e outros componentes da fundação.

### 7.11 Tempo de execução da *grid*

O período compreendido desde a fase de concepção do projeto até a sua finalização completa foi de um ano. Porém, todas as etapas ocorreram de forma espaçada. O tempo necessário apenas para a construção da Dunas Gridshell foi mensurado por etapas e está descrito no Quadro 7.2. A contabilização do tempo trabalhado foi feita em dias e as fases vão desde a preparação das peças até a conclusão da obra.

Quadro 7.2 – Tempos mensurados durante todas as fases de construção.

<b>Fase da construção / Descrição do serviço</b>	<b>Tempo em dias</b>	<b>Profissionais envolvidos</b>	<b>Quantidade de profissionais</b>
Corte das tábulas de 15,00 cm em ripas 5,00 cm	4 dias	Carpinteiro	1
		Ajudante	1
Corte das ripas nos comprimentos das peças	1 dias	Carpinteiro	1
		Ajudante	1
Separação, pintura das pontas e análise de integridade das ripas	1 dia	Carpinteiro	1
		Ajudante	1
Marcação das peças para furação	3 dias	Carpinteiro	1
		Ajudante	3
Furação dos elementos	6 dias	Carpinteiro	1
		Ajudante	3
<b>Montagem e união dos módulos<sup>1</sup></b>	<b>1 dia</b>	<b>Carpinteiro</b>	<b>1</b>
		<b>Ajudante</b>	<b>14</b>
<b>Elevação e encurvamento gradual da malha<sup>1</sup></b>	<b>10 dias</b>	<b>Carpinteiro</b>	<b>1</b>
		<b>Operador de guincho*</b>	<b>1</b>
		<b>Ajudante</b>	<b>1</b>
<b>Travamento da <i>grid</i><sup>1</sup></b>	<b>1 dia</b>	<b>Carpinteiro</b>	<b>1</b>
		<b>Ajudante</b>	<b>3</b>
Execução da fundação	10 dias	Carpinteiro	1
		Pedreiro	1
		Ajudante	3
Confecção das peças metálicas de união da grade com fundação	6 dias	Serralheiro	1
		Ajudante	1
Acomodação da <i>grid</i> sobre os pilares	1 dia	Carpinteiro	1
		Operador de guincho	1
		Ajudante	6
Pintura	6 dias	Ajudante	3
<b>Tempo total</b>	<b>50 dias</b>	-	
Nota: *O operador de guincho só participou da elevação da malha durante dois dias. 1 – Fases que compreenderam a construção da malha.			

Fonte: Elaborado pela autora.

Vale frisar que a contabilização do tempo em dias trabalhados não levou em consideração dias perdidos por motivos excepcionais, entre as etapas ou durante as fases da construção. Isso porque os profissionais envolvidos na execução da malha elástica aqui projetada foram em sua maioria voluntários. Também não foram contabilizados os dias gastos com transporte e compra de materiais durante as etapas da obra. A fase que mais envolveu pessoal foi a “Montagem e união dos módulos”, que contou com a participação de 15 pessoas. No Quadro 7.3 estão apresentadas as Horas Homem Trabalhadas (HHT) durante os 50 dias de execução necessários para a conclusão da *gridshell*.

Quadro 7.3 – Resumo das Horas Homem Trabalhadas (HHT) por profissional.

<b>Profissionais envolvidos</b>	<b>Tempo em horas (8h/dia) Horas Homem Trabalhadas (HHT)</b>
Carpinteiro	304 horas
Serralheiro	48 horas
Pedreiro	80 horas
Operador de guincho	24 horas
Ajudante	960 horas

Fonte: Elaborado pela autora.

Os colaboradores mais requisitados durante a construção foram os ajudantes, também denominados serventes na construção civil, sendo requeridas 960 horas ao todo dessa mão de obra. Portanto, foram necessários três vezes mais ajudantes do que carpinteiros, mostrando que o serviço não exige altas porcentagens de mão de obra especializada nas tarefas. É importante destacar que os estudantes de graduação e pós-graduação, que participaram como voluntários durante muitas etapas, foram contabilizados como ajudantes.

### 7.12 Estimativa de custos da montagem da *gridshell*

A Dunas Gridshell foi executada no âmbito desta dissertação de mestrado e não obteve verba pública para sua construção. Assim, o projeto experimental foi desenvolvido com recursos doados. A mão de obra necessária durante a construção foi composta por alunos de pós-graduação e graduação, professores e servidores da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), além de profissionais voluntários da área, como arquitetos, carpinteiros, pedreiros, ajudantes de carpintaria, entre outros já citados.

Entretanto, para demonstrar os possíveis gastos com mão de obra, caso essa não fosse voluntária, foi feita uma estimativa de custos dos colaboradores envolvidos apenas na montagem da malha, sua elevação e travamento. O Quadro 7.4 traz esses custos com base nos valores a serem pagos por Horas Homem Trabalhadas (HHT) de acordo com as tabelas de referência de insumos e composições do SINAPI (Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil), para o mês de abril de 2019 (valores não desonerados para o estado do Rio Grande do Norte).

Quadro 7.4 – Custos estimados da mão de obra para montagem, elevação e travamento da malha baseados nas HHT.

<b>Profissionais envolvidos</b>	<b>Tempo em horas (8h/dia) HHT * Custo da hora</b>	<b>Custo total</b>
CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	96 horas * R\$ 17,11	R\$ 1.642,56
MOTORISTA OPERADOR DE MUNCK COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	16 horas * R\$ 17,57	R\$ 281,12
AJUDANTE DE CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	216 horas * R\$ 14,24	R\$ 3.075,84
<b>Total</b>		<b>R\$ 4.999,52</b>
<b>Nota: Custos SINAPI, mês de abril de 2019 (valores não desonerados para o RN).</b>		

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nas mensurações e cálculos, chegou-se a um custo total de mão de obra em torno de R\$ 4.999,52 (quatro mil, novecentos e noventa e nove reais e

cinquenta e dois centavos). Esse valor engloba apenas os profissionais que trabalharam na fase de construção da *gridshell*, que compreendeu 12 dias.

A Tabela 7.2 traz os valores obtidos para a construção que, somados, representam o custo total, estimado em aproximadamente R\$ 7.605,94 (sete mil, seiscentos e cinco reais e noventa e quatro centavos). Vale destacar que essa estimativa de custos se baseou nos preços dos insumos do SINAPI, referentes a abril de 2019, para preços praticados no estado do Rio Grande do Norte, e nas planilhas de insumos adquiridos durante a construção.

Tabela 7.2 – Planilha orçamentária da construção.

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE * PREÇO UNITÁRIO	PREÇO
<b>1</b>	<b>MÃO DE OBRA</b>	-	<b>R\$ 4.999,52</b>
<b>2</b>	<b>INSUMOS</b>	-	<b>R\$ 2.606,42</b>
2.1	MADEIRA	618,61 m * R\$ 3,58	R\$ 2.214,62
2.2	PARAFUSOS 12 e 15 cm COM PORCAS	456 un * R\$ 0,70	R\$ 319,20
2.3	PARAFUSOS 40 mm	1 cx (450 un)	R\$ 27,00
2.4	ARRUELAS	912 un * R\$ 0,05	R\$ 45,60
<b>VALOR TOTAL</b>			<b>R\$ 7.605,94</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

Embora os serviços envolvidos tenham sido executados majoritariamente por voluntários, os custos com mão de obra foram avaliados em torno de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais), o que corresponde aproximadamente a 66% do montante estimado (Tabela 7.2).

### 7.13 Fechamento do capítulo

É importante perceber que os equipamentos, ferramentas e materiais usados demonstram que a construção de uma malha estrutural de madeira não requer o uso de alta tecnologia, sendo a Dunas Gridshell executada com emprego de recursos encontrados com facilidade na região. Além disso, destaca-se a necessidade da escolha de um terreno nivelado para a elevação e conformação da grade na forma

curvada, do contrário ocorrerão pequenas diferenças entre as alturas dos arcos da malha.

Apesar da presença acentuada de nós nas madeiras oriundas de espécies do gênero *Pinus*, aqui usadas, o sistema estrutural das *gridshells* com uso de dupla camada de ripas foi capaz de distribuir o carregamento de maneira eficaz, não sobrecarregando os elementos lamelares que compuseram a casca e oferecendo estabilidade à estrutura. Salienta-se também que a facilidade de substituição de peças avariadas enquanto a estrutura estava em processo de curvatura foi um fator primordial para a conclusão da malha.

O umedecimento constante das peças de madeira (material higroscópico) ao longo do processo de flexão é essencial, pois isso confere a elas uma maior capacidade de fletir, uma vez que o aumento do teor de umidade gera a diminuição do módulo de elasticidade da madeira. A construção foi realizada entre os meses de setembro e novembro de 2018, período de baixa precipitação pluviométrica e tempo aberto com alta incidência de luz solar (sem nuvens). Porém, o consumo de água poderia ter sido menor se a obra tivesse sido executada entre os meses de março e abril, que são caracterizados por tempo mais encoberto por nuvens e maior incidência de chuvas. Por isso, destaca-se que a escolha do período, para a execução de um projeto semelhante, pode influenciar positivamente da diminuição do consumo de água durante a flexão da malha.

Com um custo de construção estimado em R\$ 7.605,94 (sete mil, seiscentos e cinco reais e noventa e quatro centavos), o que corresponde aproximadamente em valores atuais a U\$ 1.900,00 (mil e novecentos dólares americanos), o projeto desenvolvido utilizou apenas cerca de 0,69 m<sup>3</sup> de madeira, o que correspondeu a 29% desse custo. Inicialmente a grade plana possuía uma área de aproximadamente 36 m<sup>2</sup> e após ser encurvada passou a cobrir cerca de 16 m<sup>2</sup>. Assim sendo, menos de um metro cúbico de madeira foi capaz de gerar uma sombra parcial para 16 m<sup>2</sup>, dando origem a um ambiente de convivência agradável mesmo sob sol forte.

Outro dado que merece destaque é a razão entre o peso total da *grid* (estimado em 365,54 Kg) e a sua área plana (36,00 m<sup>2</sup>), o que demonstra que cada metro quadrado da *gridshell* em grade possui apenas 10,15 Kg, sendo essa, portanto, considerada uma estrutura leve. Salienta-se ainda que a estrutura apresentou uma

montagem rápida e facilitada, uma vez que foi necessário apenas um dia de trabalho para a união de todos os elementos em grade. Sendo, dessa forma um pouco mais demorado apenas o processo de encurvamento da estrutura, para o qual se estima um tempo de execução real de uma semana.

Destaca-se ainda que a pouca experiência da equipe relacionada ao sistema *gridshell* e as incertezas relativas à execução do projeto foram fatores que dificultaram a economia de tempo e recursos. Portanto, existe uma margem para redução dos custos relativa ao treinamento da mão de obra e gerenciamento mais eficaz das tarefas diante da bagagem adquirida com a primeira montagem.

## CAPÍTULO 8

### Considerações finais

A dissertação aqui apresentada descreveu detalhadamente o processo de elaboração do projeto e a execução de uma malha elástica de madeira na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil. A estrutura final foi denominada Dunas Gridshell e foi instalada nas dependências do Laboratório de Estudos da Madeira da UFRN (LABEM). O nome escolhido veio para homenagear as paisagens da região costeira do estado onde predominam as dunas, além de representar bem o que se entende ser a primeira *gridshell* da região nordeste e uma das poucas existentes no Brasil.

Neste trabalho, vários aspectos teóricos e práticos a respeito do sistema construtivo *Gridshell* foram levantados e elucidados conforme as etapas foram sendo concluídas. Com base no exposto, foi possível evidenciar que a *gridshell* construída com madeira da espécie pinus demonstrou ser uma estrutura leve, de baixo custo e segura do ponto de vista estrutural, pois não veio a colapsar após ser curvada. O modelo aqui estudado ainda pode ser executado em pouco tempo e com a utilização de mão de obra pouco qualificada em boa parte de suas etapas construtivas. Além disso, os insumos, as ferramentas e os equipamentos empregados são de fácil acesso, o que torna a replicação da estrutura possível e simplória. Ainda pode-se inferir que o consumo de madeiras ( $0,69 \text{ m}^3$ ) e de outros insumos foi considerado baixo em relação à área da grade.

Enfatiza-se que o sistema estrutural das *gridshells* é relativamente complexo, pois abrange conhecimentos de muitas áreas da engenharia e da arquitetura, exigindo, assim, a atuação de múltiplos profissionais ao mesmo tempo. Acredita-se que o desenvolvimento da obra aqui descrita tenha gerado curiosidade na comunidade dentro e fora da academia, provocando questionamentos a respeito da concepção do projeto e das técnicas usadas na construção exposta no LABEM. Dessa maneira, entende-se que o uso desse sistema estrutural e das madeiras esteja sendo incentivado pela Dunas Gridshell. Além disso, observa-se outros pesquisadores da

instituição interessados em investigações a respeito da análise estrutural das malhas elásticas de madeira. Isso demonstra que as metas pretendidas com a execução dessa estrutura foram alcançadas.

Salienta-se que a confecção do manual de montagem e a diferenciação das peças por cores foram estratégias cruciais para a conclusão rápida da união dos nove módulos que compuseram a estrutura. Cabe dizer, ainda, que o método construtivo definido para essa grade foi estudado e adaptado para a realidade local, diante dos equipamentos e materiais disponíveis. Desse modo, a *gridshell* pós-formada de pinus aqui descrita fez uso do método de elevação *Pull Up* em consórcio (combinado) com o intitulado *Ease Down* por Fernandes, Kirkegaard e Branco (2016). Por isso, pode-se dizer que a construção dessa estrutura foi uma tentativa experimental que logrou êxito e a metodologia empregada para sua execução foi desenvolvida no âmbito deste trabalho.

É importante frisar também que esta investigação possui limitações do ponto de vista da análise estrutural da malha, uma vez que esse não foi o foco do trabalho. Assim, existe a possibilidade de dar prosseguimento às análises de forma teórica e/ou com uso de programas computacionais.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se para estudo da malha e seu aprimoramento a utilização do programa Rhinoceros e seus plug-ins Grasshopper e Kangaroo. Propõe-se ainda a realização da análise estrutural por meio do software ANSYS, seguindo a metodologia semelhante à de Naicu, Harris e Williams (2014) e de Caffarello (2016). Também se sugere o aprofundamento do mapeamento sistemático da literatura, apresentado na metodologia, com a classificação dos artigos de acordo com os conteúdos abordados em cada um deles, e a análise de outros indicadores, como, por exemplo, o destaque dos autores que mais publicaram sobre o tema em todo o mundo nos anos cobertos pela pesquisa.

Por último, salienta-se que a escolha da madeira do pinus para a malha e do eucalipto para a fundação (pilares) foi uma estratégia bastante acertada, uma vez que, atualmente, no Brasil, o setor de base florestal é fomentado em grande escala por florestas plantadas do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* (ABRAF, 2012). Por esse motivo, a construção de *gridshells* com uso dessas madeiras pode ser considerada ainda mais

sustentável, uma vez que ao longo de seu crescimento, as árvores aprisionarão CO<sub>2</sub> e suas madeiras são bem aproveitadas com o uso desse sistema.

## REFERÊNCIAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**: ano base 2011. ABRAF. Brasília: 2012. 150p. ISSN: 1980-8550. Disponível em: <<https://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF12-BR.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

ARSENYEV, Sergei. **1897: World's First Diagrid Shell by Vladimir Shukhov in Vyksa**. 2011. Son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=iJ0hScrDqXQ>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

ARSENYEV, Sergei. **1897: World's First Gridshell by Vladimir Shukhov**. 2011. Son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5bsjFbkllnA>>. Acesso em: 02 de nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 07190: Projetos de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

AUTODESK. **3ds Max®**. Versão 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/3ds-max>>. Acesso em: 08 fev. 2018.

AUTODESK. **3ds Max®**: software de modelagem, animação e renderização 3D. 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/3ds-max/overview>>. Acesso em: 08 dez. 2018.

AUTODESK. **AutoCAD®**. Versão 2016. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/education/free-software/autocad>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

BARROSO, João Miguel Pinto. **Conceção, análise e construção de malhas estruturais em madeira**. 2016. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, Portugal, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/49079>>. Acesso em: 03 mar. 2018.

BECKH, Matthias; BARTHEL, Rainer. The First Doubly Curved Gridshell Structure – Shukhovs Building for the Plate Rolling Workshop in Vyksa. INTERNATIONAL CONGRESS ON CONSTRUCTION HISTORY, 3., 2009, Vyksa. **Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, May 2009**. Munich: 2009. p. 1-8. Disponível em: <[http://www.bma.arch.unige.it/pdf/construction\\_history\\_2009/vol1/beckh-matthias\\_layouted.pdf](http://www.bma.arch.unige.it/pdf/construction_history_2009/vol1/beckh-matthias_layouted.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2017.

BOUHAYA, Lina. **Optimisation structurelle des gridshells**. 2010. 181f. Tese (Doutorado em Estruturas e Materiais) – University of Paris-Est, 2010, França. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00583409/>>. Acesso em: 04 nov. 2017.

CAFFARELLO, Flavio Meireles. **Análise estrutural de cobertura em gridshell de madeira**. 2016. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/320717/1/Caffarello\\_FlavioMeireles\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/320717/1/Caffarello_FlavioMeireles_M.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2017.

CAFFARELLO, Flavio; OSTORERO, Carlo; MASCIA, Nilson T. **Projeto estrutural em grid shells de madeira**. EBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014, Natal. p. 1-15. Disponível em: <[https://www.academia.edu/10682874/EBRA14-EST-059\\_-\\_PROJETO\\_ESTRUTURAL\\_EM\\_GRID\\_SHELLS\\_DE\\_MADEIRA\\_STRUCTURAL\\_DE\\_SIGN\\_IN\\_WOOD\\_GRIDSHELL](https://www.academia.edu/10682874/EBRA14-EST-059_-_PROJETO_ESTRUTURAL_EM_GRID_SHELLS_DE_MADEIRA_STRUCTURAL_DE_SIGN_IN_WOOD_GRIDSHELL)>. Acesso em: 04 nov. 2017.

CARPENTER Oak & Woodland Limited. **A timber frame gridshell for a historic orangery**. Disponível em: <<http://carpenteroakandwoodland.com/project/orangery-gridshell/>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

CARVALHO, Diogo Filipe Pombo Alves. **Gridshells em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto**. 2015. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015. Disponível em: <[https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/38598/1/Gridshells em madeira.pdf](https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/38598/1/Gridshells%20em%20madeira.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2017.

COLLINS, Matt; COSGROVE, Tom. **A Review of the State of the Art of Timber Gridshell Design and Construction**. CIVIL ENGINEERING RESEARCH IN IRELAND CONFERENCE, 1., 2016, Limerick. p. 1-6. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Matt\\_Collins2/publication/307546000\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_of\\_Timber\\_Gridshell\\_Design\\_and\\_Construction/links/57c7f5e108aec24de04313f1/A-Review-of-the-State-of-the-Art-of-Timber-Gridshell-Design-and-Construction.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Matt_Collins2/publication/307546000_A_Review_of_the_State_of_the_Art_of_Timber_Gridshell_Design_and_Construction/links/57c7f5e108aec24de04313f1/A-Review-of-the-State-of-the-Art-of-Timber-Gridshell-Design-and-Construction.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2017.

COLLINS, Matt; COSGROVE, Tom; MELLAD, Abdussalam. Characterisation of OSB properties for application in gridshells. **Materials And Structures**, Berlim, p.1-11, 6 fev. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-017-1005-y>>. Acesso em: 10 set. 2017.

D'AMICO; KERMANI; ZHANG. **A finite-difference formulation of elastic rod for the design of actively bent structures**. Centre for Timber Engineering, School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh Napier University, Edinburgh, UK. *Engineering Structures* 117 (2016) 518–527. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.034>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

DAVIS, Ray. 2014. Unreal Engine 4 Goes Free For Academic Use. Unreal Engine Blog. 2014. Disponível em: <<https://www.unrealengine.com/en-US/blog/unreal-engine-4-goes-free-for-academic-use>>. Acesso em: 08 dez. 2018.

DINIZ, Carolina; APSAN, Debora. **6 boas ideias estruturais da Casa Cor São Paulo**. Fotos. Casa.com.br. 2015. Disponível em: <<https://casa.abril.com.br/ambientes/6-boas-ideias-estruturais-da-casa-cor-sao-paulo/>>. Acesso em: 15 out. 2018.

EDEMSKAYA, Elizaveta; AGKATHIDIS, Asterios. Rethinking complexity: Vladimir Shukhov's steel lattice structures. **Journal Of The International Association For Shell And Spatial Structures: J. Iass.** [s.l.], p. 1-13. nov. 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Asterios\\_Agkathidis/publication/301794628\\_Rethinking\\_Complexity\\_Vladimir\\_Shukhov's\\_Steel\\_Lattice\\_Structures/links/57c99a0a08ae3ac722af8678/Rethinking-Complexity-Vladimir-Shukhovs-Steel-Lattice-Structures.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Asterios_Agkathidis/publication/301794628_Rethinking_Complexity_Vladimir_Shukhov's_Steel_Lattice_Structures/links/57c99a0a08ae3ac722af8678/Rethinking-Complexity-Vladimir-Shukhovs-Steel-Lattice-Structures.pdf)>. Acesso em: 5 nov. 2017.

EPIC Games. **Unreal Engine 4.20.** Versão de 16 de jul. de 2018. Disponível em: <<https://www.unrealengine.com/en-US/blog/unreal-engine-4-20-preview-1-now-available>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

EUCATRATUS Eucalipto Tratado. **Tratamento de eucalipto em autoclave.** [200-?] Disponível em: <<http://www.eucatratus.com.br/autoclave>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

FERNANDES, Jorge G.; KIRKEGAARD, Poul H.; BRANCO, Jorge M. Tectonic design of elastic timber gridshells. WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE), 2016., 2016, Viena, Áustria. **WCTE 2016 e-book.** Viena, Áustria: Wcte, 2016. p. 3155-3164. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/44550/1/3187-3196.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2018.

GLASS, Samuel V.; ZELINKA, Samuel L. Moisture relations and physical properties of wood. **General Technical Report FPL – GTR – 190**, 2010. Disponível em: <[https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter\\_04.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_04.pdf)>. Acesso em: 13 jan. 2019.

GRIDSHELL EM BAMBU. Bambu Carbono Zero. Disponível em: <<https://www.bambucarbonozero.com.br/gridshell-em-bambu/>>. Acesso em: 20 maio 2019.

GRIDSHELL.IT. **Gridshell-copertura della terrazza della Masseria Ospitale Lecce – 2010.** 18/04/2012. Lecce: Cmmkm Architettura e Design With B. D'amico e F. Nigro, 2010. Son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Loc83LkKIPc>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

GRIDSHELL.IT: Form resistant lightweight timber structures. **TRIO GRIDSHELL.** 18/04/2012. “Masseria Ospitale” restaurant coverage, Lecce – Italy (2010-2011). Disponível em: <[http://www.gridshell.it/gridshell\\_lecce/](http://www.gridshell.it/gridshell_lecce/)>. Acesso em: 02 nov. 2017.

GRIDSHELL.IT: Form resistant lightweight timber structures. **Weald & Downland Open Air Museum by Buro Happold and Edward Cullinan architects, 2002.** Disponível em: <[http://www.gridshell.it/gridshell\\_postformata\\_in\\_legno/52170-1250442338-0-l/](http://www.gridshell.it/gridshell_postformata_in_legno/52170-1250442338-0-l/)>. Acesso em: 02 nov. 2017.

GRIDSHELL.IT: Form resistant lightweight timber structures. **WOODOME 1.0.** 18/04/2012. Pavillion in the courtyard of “Masseria Ospitale”. Lecce, Itália, 2009. Disponível em: <[http://www.gridshell.it/gridshell\\_woodome\\_lecce/](http://www.gridshell.it/gridshell_woodome_lecce/)>. Acesso em: 03 nov. 2017.

GRIDSHELL\_WOODOME: **Gazebo nella corte della Masseria Ospitale Lecce – 2009**. Produção de Cmmkm Architettura e Design, Pia D'angelo, Felice Grasso. Lecce, Itália: Cmmkm Architettura e Design, Pia D'angelo, Felice Grasso, 2009. Son., color. WOODOME – “MASSERIA OSPITALE”. Construção: Pia D'Angelo, Felice Grasso, Bianca Parenti, Sergio Pone, Valeria Margheriti, Oronzo Trio, Ars Mea. Consultor estrutural: Oreste Mammana. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RZ2WSGEIP-w&t=289s>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

HELBIG, Thorsten; GIAMPELLEGRINI, Laurent; OPPE, Matthias. “Carioca Wave” – A free-form steel-and-glass canopy in Rio de Janeiro, Brazil. **Steel Construction** 7, n. 4, 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/268452900\\_Carioca\\_Wave\\_-\\_A\\_free-form\\_steel-and-glass\\_canopy\\_in\\_Rio\\_de\\_Janeiro\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/268452900_Carioca_Wave_-_A_free-form_steel-and-glass_canopy_in_Rio_de_Janeiro_Brazil)>. Acesso em: 5 jun. 2018.

HERNÁNDEZ, Elisa Lafuente et al. Topology optimisation of regular and irregular elastic gridshells by means of a non-linear variational method. **Advances in Architectural Geometry** 2012, [s.l.], p. 147-160, 2013. Springer Vienna. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-1251-9\\_11](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-1251-9_11)>. Acesso em: 13 jan. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: SVMA, 2009. Disponível em: <<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/madeira.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

INTERNATIONAL DATABASE AND GALLERY OF STRUCTURES. **Structures. Vyksa Steel Production Hall**. 2010. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/vyksa-steel-production-hall>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

JOHNSON, Steve. **Gridshells and the construction process**. 2000. Disponível em: <<http://www.wealddown.co.uk/explore/buildings/further-reading/gridshells-construction-process/?building=301>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

KELLY, Ollie et al. **Construction of the Downland Gridshell**. 2011. Disponível em: <[https://5982011a.files.wordpress.com/2011/01/weald\\_and\\_downland\\_structures\\_per\\_with\\_pics.pdf](https://5982011a.files.wordpress.com/2011/01/weald_and_downland_structures_per_with_pics.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2017.

KOLLER, Sílvia, H.; DE PAULA COUTO, Maria Clara P.; HOHENDORFF, Jean Von Hehendorff (Org.). **Manual de produção científica**. Porto Alegre: Penso, 2014.

KUIJVENHOVEN, Maarten. **A design method for timber grid shells**. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Tu Delft, Seção de Mecânica Estrutural, Delft University Of Technology, Delft, Holanda, 2009. Disponível em: <[http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc\\_projects/reportKuijvenhoven.pdf](http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc_projects/reportKuijvenhoven.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2017.

LANCIA, Daniele. **“Masseria Ospitale” Restaurant Coverage**. Timber Gridshell. Lecce, Itália, 2010. Archilovers. Foto publicada em 2013. Disponível em: <<http://www.archilovers.com/projects/87716/masseria-ospitale-restaurant-coverage.html#images>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

LEFEVRE, Baptiste; DOUTHE, Cyril; BAVEREL, Olivier. Buckling of elastic gridshells. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**: J. IASS, Madrid, Espanha, p. 153-171, set. 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/282151602\\_Buckling\\_of\\_Elastic\\_gridshell\\_s](https://www.researchgate.net/publication/282151602_Buckling_of_Elastic_gridshell_s)>. Acesso em: 10 out. 2017.

LIMA, J. T.; DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas de Eucalyptus saligna. **Revista Árvore**, v. 10, n. 1, p. 27-43, 1986.

LIUTI, Alessandro; COLABELLA, Sofia; PUGNALE, Alberto. The Airshell prototype: a timber gridshell erected through a pneumatic formwork. In: IASS 2017: INTERFACES – ARCHITECTURE. ENGINEERING. SCIENCE, 2017. Hamburgo. **Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science”**. Hamburgo, Alemanha: IASS, 2017. p. 1-10. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/320195830\\_The\\_Airshell\\_prototype\\_a\\_timber\\_gridshell\\_erected\\_through\\_a\\_pneumatic\\_formwork](https://www.researchgate.net/publication/320195830_The_Airshell_prototype_a_timber_gridshell_erected_through_a_pneumatic_formwork)>. Acesso em: 08 fev. 2018.

LIUTI, Alessandro; PUGNALE, Alberto. Erection of post-formed gridshells by means of inflatable membrane technology. In: CRAWFORD, R. H.; STEPHAN, A. (Ed.). **Living and learning: research for a better built environment: 49<sup>th</sup> International Conference of the Architectural Science Association**. Melbourne, Austrália: The Architectural Science Association, 2015. p. 678-687. Disponível em: <[http://anzasca.net/wp-content/uploads/2015/12/065\\_Liuti\\_Pugnale\\_ASA2015.pdf](http://anzasca.net/wp-content/uploads/2015/12/065_Liuti_Pugnale_ASA2015.pdf)>. Acesso em: 04 fev. 2018.

LOWENSTEIN, Oliver. **Lothian gridshell**. Building for a Future Winter 2002/03.

**MALHAS espaciais em madeira/Timber Grid Shells**. Produção de Historical and Masonry Structures – UMinho Research Group. Minho, Portugal, 2016. Son., color. A construção decorreu durante o Workshop: Malhas Espaciais em Madeira realizada em 13-14 de junho de 2016, na Universidade do Minho – [www.facebook.com/MalhasMadeira](http://www.facebook.com/MalhasMadeira). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=A1scunGwV0g>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MELBOURNE SCHOOL OF DESIGN. Publicado em: 19 fev. 2017. **Airshell: Bending timber with air**. Realização de Escola de Design de Melbourne. Melbourne, Austrália, 2017. Son., color. O projeto foi supervisionado pelo Dr. Alberto Pugnale (<http://www.albertopugnale.com/>) e Dr. Toong-Khuan Chan. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=6flPMmNxUVA&feature=youtu.be>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

MESNIL, Romain et al. Linear buckling of quadrangular and kagome gridshells: a comparative assessment. **Engineering Structures, Elsevier**, 132, p. 337-348, 2017. HAL Id: hal-01510047. Submitted on 18 Apr 2017. Disponível em: <[https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01510047/file/Kagome\\_buckling.pdf](https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01510047/file/Kagome_buckling.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2017.

MOVING GRIDSHELL. Música: “the Journey / Ghana 74 (dusty Remix)” Por The Boogoos (itunes). Graz, Áustria: Projeto Arquitetônico na Universidade de

Tecnologia de Graz, Verão, 2014. Son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=HmvpUb71JVQ&t=293s>>. Acesso em: 13 jan. 2018.

MyZeil Shopping Center. **Fotos**. Disponível em: <<https://www.myzeil.de>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

NAICU, Dragoş; HARRIS, Richard; WILLIAMS, Chris. Timber gridshells: design methods and their application to a temporary pavilion. WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE) 2014, Quebec, Canadá, ago. 2014. Disponível em: <[http://opus.bath.ac.uk/41279/1/WCTE\\_2014\\_Timber\\_Gridshells\\_Design\\_methods\\_and\\_their\\_application\\_to\\_a\\_temporary\\_pavilion\\_Naicu\\_Harris\\_Williams.pdf](http://opus.bath.ac.uk/41279/1/WCTE_2014_Timber_Gridshells_Design_methods_and_their_application_to_a_temporary_pavilion_Naicu_Harris_Williams.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2017.

PAOLI, Céline. **Past and future of grid shell structures**. 2007. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), Massachusetts, EUA, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1721.1/39277>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PERFORMATIVE Wood GridShell Siracusa. Produção de Giuliano Torrissi. Coordenação de Prof. Arch. Luigi Alini. Música: The Strokes – The Modern Age. Siracusa, Itália: Material Design, 2013. Son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Pr3Alldaj70&t=11s>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

PINTO, Edna Moura; ALBUQUERQUE, Evelyne da Nóbrega; SILVA, Rodrigo. Retrospectiva do uso da madeira ao longo dos períodos históricos. EBRAMEM – ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014, Natal. **Anais...** João Pessoa: Moura Ramos, 2014.

PONE, S. et al. Construction and form-finding of a post-formed timber grid-shell. In: Cruz (Ed.). Structures and architecture: concepts, applications and challenges. 2013, Guimarães. **Anais...** Londres: Taylor & Francis Group, 2013. p. 245-253. ISBN 978-0-415-66195-9. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Bernardino\\_DAmico/publication/235921308\\_Construction\\_and\\_form-finding\\_of\\_a\\_post-formed\\_timber\\_grid-shell/links/0f317533c113ebf21c000000/Construction-and-form-finding-of-a-post-formed-timber-grid-shell.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bernardino_DAmico/publication/235921308_Construction_and_form-finding_of_a_post-formed_timber_grid-shell/links/0f317533c113ebf21c000000/Construction-and-form-finding-of-a-post-formed-timber-grid-shell.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2017.

QUINN, Gregory Charles; GENGNAGEL, Christoph. A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork. DOI: 10.2495/MAR140111. 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE, ADAPTABLE AND RAPIDLY ASSEMBLED STRUCTURES – MARAS2014, 4., 2014, Ostend. **Mobile and Rapidly Assembled Structures, IV**. v. 136. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/264779291\\_A\\_review\\_of\\_elastic\\_grid\\_shells\\_their\\_erection\\_methods\\_and\\_the\\_potential\\_use\\_of\\_pneumatic\\_formwork](https://www.researchgate.net/publication/264779291_A_review_of_elastic_grid_shells_their_erection_methods_and_the_potential_use_of_pneumatic_formwork)>. Acesso em: 02 nov. 2018.

RÁDIO FUNDAÇÃO (Portugal). **UMinho tem a primeira malha estrutural de madeira do país**. 2016. Disponível em:

<[http://www.radiofundacao.net/noticias\\_sociedade.php?a=24&id=828#sthash.3bTIRFch.ftZLYTCp.dpbs](http://www.radiofundacao.net/noticias_sociedade.php?a=24&id=828#sthash.3bTIRFch.ftZLYTCp.dpbs)>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SILVA, José de Castro. 2002. Nós: nós na madeira. **Revista da Madeira**, n. 59, set. 2001. Disponível em:

<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=17](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=17)>. Acesso em: 10 dez. 2018.

SILVA, José de Castro. 2006. Preservação: madeira preservada: os impactos ambientais. **Revista da Madeira**, n. 100, nov. 2006. Disponível em:

<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=985&subject](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=985&subject)>. Acesso em: 10 dez. 2018.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF). **As florestas plantadas**. 2015. Serviço Florestal Brasileiro. Recursos Florestais. Disponível em:

<<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

WEALD & Downland Living Museum. **Downland Gridshell**. Disponível em:

<<http://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

WOOD ON THE PLAZA. Disponível em: <<http://woodontheplaza.info/>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

ZAMMÙMULTIMEDIA (Itália). Universidade de Catania (Comp.). **NeT, la "gridshell" degli studenti di Architettura**. 5 jul. 2013 (Consorzio Plemmirio, Siracusa), seminário final do site educacional em que participaram os alunos do Laboratório do Projeto II. 2013. Siracusanews.it. Disponível em: <<http://www.agenda.unict.it/8328-net-la-gridshell-degli-studenti-di-architettura.htm>>. Acesso em: 25 fev. 2018.