



Mirella Nass Ruggiero

Estruturas reticuladas de bambu laminado :
uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

Mirella Nass Ruggiero

**Estruturas reticuladas de bambu laminado:
uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea**

São Paulo

2021

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL,
SOB RESPONSABILIDADE DA AUTORA E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.

São Paulo, 05 de dezembro de 2021

MIRELLA NASS RUGGIERO

**Estruturas reticuladas de bambu laminado:
uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea**

Versão Corrigida

Tese apresentada à
Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Doutora em
Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Ruggiero, Mirella Nass

Estruturas reticuladas de bambu laminado: uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea / Mirella Nass Ruggiero; orientador Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti. - São Paulo, 2021.
297f.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Bambu Laminado. 2. Estruturas Reticuladas. 3. Desenho Paramétrico e Fabricação Digital. 4. Sistemas e Processos Construtivos. I. Pauletti, Ruy Marcelo de Oliveira, orient. II. Título.

Nome: **RUGGIERO, Mirella Nass**

Título: **Estruturas reticuladas de bambu laminado: uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea**

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em: 19/11/2021

Banca Examinadora

Prof. Dr.
Instituição:
Julgamento:

Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
Escola Politécnica – USP
Aprovada

Prof. Dr.
Instituição:
Julgamento:

Célia Regina Moretti Meirelles
FAU - Mackenzie
Aprovada

Prof. Dr.
Instituição:
Julgamento:

Maria Gabriela Caffarena Celani
UNICAMP
Aprovada

Prof. Dr.
Instituição:
Julgamento:

Paulo Eduardo Fonseca de Campos
FAU - USP
Aprovada

Prof. Dr.
Instituição:
Julgamento:

Mauro Costa Couceiro
Universidade de Coimbra
Aprovada

À Mirian,
Ao Marcio,
Ao Marcello,
Tack.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - PROEX. E, também, recebeu apoio do Programa de Mobilidade Internacional do Banco Santander Totta.

Ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, pelo apoio e confiança durante estes anos de estudo.

À Prof^a. Dra. Célia Regina Moretti Meirelles e ao Prof. Dr. Paulo Eduardo Fonseca de Campos, pela colaboração e contribuições. Agradeço ao Prof. Dr. Reginaldo Ronconi, pelo apoio e incentivo. Ao Prof. Dr. Arthur Hunold Lara, pelos conhecimentos compartilhados nas disciplinas. À Prof^a. Dra. Gabriela Celani, pelas contribuições. Ao Prof. Mauro Costa Couceiro, pela colaboração e apoio. Ao Prof. Dr. Artur Rozestraten. À Prof. Dra. Leila Cristina Meneghetti.

Agradeço às colaborações de: Marcia Sato, Juliana Croffi, Daniel Locatelli, Fernando Simões, Alexandre Augusto Martins, Felipe Tavares, Caio Castriotto, Marcus Damon, Andreas Falk e Omar Elnagar. Agradeço à Diná Vasconcellos Leone, da Secretaria da Pós-Graduação da FAUUSP. Ao Andres de Paula Dare, do LAME- FAUUSP. Ao Ryo Fukui.

Agradeço a oportunidade, acolhimento e colaboração do Prof. Dr. Jose Pedro Sousa, durante a estadia na Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto. E, aos colegas do DFL: Rafael Santos, João Carvalho e Pedro de Azambuja Varela.

Agradeço as contribuições do professor da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Coimbra, Prof. Dr. Pedro Martins.

Dr. André Tsai e ao Dr. Ricardo Simões, agradeço pelos cuidados.

Ao Henrique Lattes Borçato, pela contribuição fundamental, dedicação e comprometimento.

Ao Prof. Dr. Sylvio Barros Sawaya agradeço por todo apoio e confiança; e, pelo início desta jornada.

À minha mãe, meu pai e meu irmão, pelo amor incondicional, apoio fundamental, incentivo e participação.

Ao Marcello Nass Ruggiero, pela dedicação na elaboração das capas contidas neste trabalho.

Agradeço a Deus, à família, ao bambu.

“O bambu nos ensina muitas lições...

Uma delas é a perfeita harmonia entre colmos jovens e velhos, na mesma touceira.”

Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo

RESUMO

RUGGIERO, Mirella Nass. **Estruturas reticuladas de bambu laminado: uma reflexão sobre o emprego da fabricação digital na arquitetura contemporânea.** 2021. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo), São Paulo, 2021.

Visando minimizar os impactos ambientais gerados pela construção civil, há a necessidade de implementar-se – em larga escala – a utilização de materiais sustentáveis. O bambu mostra-se como eficiente alternativa para sanar esta demanda. O presente trabalho, investiga a possibilidade de utilização do bambu processado, na forma de bambu laminado. Para tanto, valeu-se de um tipo de estrutura – malha reticulada – para articular o diálogo entre as tecnologias e ferramentas digitais e o material proposto. A proposição da estrutura reticulada tem o papel de elemento aglutinador entre os dois temas centrais do trabalho: material e técnica. Por meio da exploração do processo e sistema construtivo da estrutura reticulada, procurou-se discutir e demonstrar as possibilidades de aplicação dos temas centrais. O enfoque se dá suscitando o diálogo entre tectônica e semântica, técnica e linguagem, interpolando o material – bambu – às tecnologias e ferramentas digitais e suas possíveis linguagens. Investiga as possibilidades de fabricação digital utilizando-se o bambu laminado. Apropria-se das características do *plug-in Karamba 3D*, realizando simulações e análises do comportamento estrutural, a partir do algoritmo desenvolvido no *plug-in Grasshopper*.

Palavras-chave: bambu laminado; estruturas reticuladas; ferramentas e tecnologias digitais; sistemas e processos construtivos; produtos de bambu processado.

ABSTRACT

RUGGIERO, Mirella Nass. **Laminated bamboo gridshell: a reflection on the use of digital fabrication in contemporary architecture.** 2021. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

To minimize the environmental impacts generated by civil construction, there is a need to implement – on a large scale – the use of sustainable materials. Bamboo is an efficient alternative to meet this demand. The present work investigates the possibility of using processed bamboo in the form of laminated bamboo. To do so, it used a type of structure – gridshell – to articulate the dialogue between digital technologies and tools and the proposed material. The proposition of the reticulated structure plays the role of a unifying element between the two central themes of the work: material and technique. Through the exploration of the process and constructive system of the gridshell, we tried to discuss and demonstrate the possibilities of application of the central themes. The focus is on promoting the dialogue between tectonics and semantics, technique, and language, interpolating the material – bamboo – to digital technologies and tools, and their possible languages. Investigate the possibilities of digital fabrication using laminated bamboo. It makes use of the characteristics of the Karamba 3D plug-in, performing simulations and analysis of the structural behaviour, based on the algorithm developed in the Grasshopper plug-in.

Keywords: laminated bamboo; gridshell; digital tools and technologies; constructive systems and processes; engineered bamboo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Proposição.....	7
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Procedimentos metodológicos.....	8
1.4 Estrutura do trabalho.....	11
2. BAMBU LAMINADO	15
2.1 Contextualização.....	15
2.2 Características do bambu.....	20
2.3 Nomenclatura dos produtos de bambu processado.....	28
2.4 Processo de produção do bambu laminado.....	36
2.5 Bambu laminado: características.....	42
2.6 Bambu laminado: propriedades mecânicas.....	44
2.7 Comprovação da viabilidade do bambu laminado como elemento estrutural.....	51
2.8 Características do produto escolhido.....	52
2.9 Normas técnicas.....	54

3. REFERÊNCIAS ARQUITETÔNICAS: EXEMPLOS DE ESTRUTURAS RETICULADAS	57
3.1 Serpentine Gallery 2005.....	58
3.2 Metropol Parasol.....	69
3.3 Swatch Omega.....	78
4. DESENHO PARAMÉTRICO E FABRICAÇÃO DIGITAL	93
4.1 Panorama atual.....	93
4.2 Rede FAB LAB.....	104
4.3 Grupos de pesquisa.....	110
4.4 Técnicas de fabricação digital.....	115
4.4.1 Técnicas de corte.....	116
4.4.2 Técnicas subtrativas.....	117
4.4.3 Técnicas aditivas.....	118
4.4.4 Técnicas formativas.....	120
4.5 Exemplos de fabricação digital aplicados à arquitetura.....	121
4.5.1 Técnica de corte e técnica formativa aplicadas à arquitetura.....	121
4.5.2 Técnica aditiva aplicada à arquitetura.....	126
4.5.3 Técnica subtrativa aplicada à arquitetura.....	131

5. EXPERIMENTOS COM TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL	133
5.1 Estudo de uma estrutura reticulada	134
5.2 Técnica de corte: CNC laser	139
5.3 Técnica subtrativa: CNC fresadora	157
5.4 Técnica aditiva: impressão 3D	159
5.5 Processos de utilização de máquinas CNC	164
5.5.1 CNC laser	164
5.5.2 CNC fresadora	166
6. CONSTRUÇÃO REPRESENTATIVA: ESTRUTURA RETICULADA DE BAMBU LAMINADO	168
6.1 Concepção da forma	170
6.2 Modelos digitais e modelos físicos	173
6.3 Análises do comportamento estrutural: simulações digitais	201
7. CONCLUSÃO	224
ANEXOS	241
Anexo I_ exercício projetual desenvolvido na disciplina de pós-graduação FAUUSP, em 2016	241
Anexo II_ experiências desenvolvidas com alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, em 2018	247

Anexo III_ Congresso IASS 2019.....255

REFERÊNCIAS.....260

1_ Introdução

1_INTRODUÇÃO

A utilização do bambu, como material construtivo, remonta há tempos ancestrais; a arquitetura vernacular está repleta de exemplos de suas aplicações. China, Japão, Indonésia, dentre outros, são locais cuja utilização do bambu, está arraigada às suas culturas. O bambu é utilizado de diferentes formas: como alimento, para confecção de mobiliário e utensílios, na construção de casas e pontes, como contenção de encostas, para regenerar áreas verdes degradadas, e muitas outras aplicações. E, na arquitetura, sua utilização já está consolidada, com significativos exemplos, sendo, na maioria das vezes, pela utilização dos colmos em sua forma natural, cilíndrica.

O bambu é um material sustentável, devido ao seu rápido crescimento e absorção de gás carbônico. Mas, para viabilizar

sua utilização, em larga escala, nos grandes centros urbanos, uma das opções seria sua utilização na forma de produtos processados, como painéis, placas e vigas. A característica retilínea, plana, das peças possibilita a aplicação de tecnologias digitais na execução dos componentes de projeto, reforçando sua contribuição para a semântica da arquitetura contemporânea.

Esta pesquisa traz alguns exemplos de aplicações e faz uma reflexão sobre possíveis desdobramentos da utilização do bambu laminado, na arquitetura contemporânea, como elemento construtivo estrutural.

O enfoque se dá suscitando o diálogo entre tectônica e semântica, técnica e linguagem, interpolando o material – bambu – às ferramentas digitais e suas possíveis linguagens.

O tema da sustentabilidade é recorrente nas diferentes esferas que permeiam a existência humana. E, embora recorrente, ainda se faz emergencial. Nos diferentes âmbitos, há muito o que ser feito.

No que concerne à arquitetura, alguns de seus aspectos estão relacionados aos materiais empregados. E a análise em relação à escolha dos materiais vai além do material em si; perpassa sua produção, geração de resíduos, distribuição, utilização, aplicação, descarte, desperdícios, custo, emissão de compostos orgânicos voláteis, dentre outros aspectos.

Uma agenda política emergente é representada pelo movimento da 'arquitetura verde', que defende a necessidade de uma ética ambiental da construção. Essa teoria pretende instituir uma relação menos antagônica com a natureza, dentre outros aspectos, pelo emprego de materiais renováveis, não poluentes e recicláveis. O movimento da 'sustentabilidade' apoia-se na noção fenomenológica de que uma relação com a natureza é essencial para a plena realização das potencialidades humanas no planeta. (NESBITT, 2006 – p. 74).

Houve avanços significativos na produção dos materiais tradicionais, decorrentes das inovações tecnológicas, bem como na produção de novos materiais, inclusive materiais compósitos a partir de elementos naturais.

Assim como, também, há novas maneiras de concepção, desenvolvimento e execução de projetos arquitetônicos amparados pelas tecnologias digitais.

Visando a união destes dois pontos centrais: material e técnica, faz-se a proposição de uma construção representativa de uma estrutura reticulada – utilizando-se bambu laminado, como elemento estrutural - amparada por *softwares* de desenho paramétrico e fabricação digital.

A escolha do bambu laminado tem como objetivo demonstrar as potencialidades deste material como componente construtivo, podendo ser aplicado como elemento estrutural.



Figura 1: Diagrama representativo: relações entre os temas abordados na tese.
Fonte: Autora (2021).

Neste momento histórico particular em que as condições ambientais e sociais se relacionam fortemente com as econômicas, o bambu oferece uma resposta inovadora aos problemas de projetos contemporâneos. De fato, o caminho atual do projeto consciente prevê o desenvolvimento de novas tecnologias e o redescobrimto de materiais tradicionais, pois se faz indispensável enfrentar a sustentabilidade não só através da economia energética, mas também através da utilização de materiais naturais. A utilização do bambu, como a de outros produtos da natureza, contém várias dificuldades, dentre as quais estão: a cultural e as referentes às normas construtivas vigentes. O bambu é uma planta com características tão especiais que o convertem em um elemento estratégico para a solução concreta dos principais problemas da atualidade, que abrangem campos fora da arquitetura: a perigosa diminuição das florestas tropicais, o apoio às economias das regiões menos desenvolvidas do planeta e a aplicação de técnicas de construção de baixo custo que dão prioridade ao meio ambiente. (VIDIELLA, 2011).

Esta pesquisa consiste em investigar seu emprego estrutural, por meio de sua forma processada [laminado colado]. Pode-se observar o desenvolvimento de uma nova linguagem arquitetônica que se dá, dentre outras formas, através do desenho paramétrico. São exemplos de arquiteturas, principalmente internacionais, que apontam novos paradigmas.

O ato de projetar elegendo o bambu – como elemento construtivo estrutural – depara-se com algumas limitações projetuais advindas da utilização dos colmos em sua forma natural. Se analisarmos colmos pertencentes à mesma espécie, observa-se que cada indivíduo possui sua particularidade; dificilmente há colmos estritamente retilíneos e os diâmetros são variáveis. As variações dos diâmetros dos colmos são um dos aspectos que dificultam a padronização de peças de ligação entre os colmos. Portanto, uma solução usualmente adotada para estas ligações, são os encaixes entalhados nos próprios colmos, unindo-os uns aos outros. Embora esta solução seja muito eficiente, do ponto de vista estrutural; em relação à execução, é um fator limitante à disseminação do uso do

bambu, na arquitetura. Os encaixes requerem habilidade dos executores, que normalmente são carpinteiros ou marceneiros. É um trabalho demorado, que requer cuidado e precisão na execução, para que o encaixe possibilite efetivamente o contato total entre os colmos. Não pode haver folgas ou frestas. E há que se tomar precauções para evitar o fendilhamento do bambu, nos locais de corte ou perfuração. Fendilhamento é a ruptura do colmo - no sentido longitudinal – uma vez que todas as fibras do bambu se encontram alinhadas nesta direção. Uma vez partido, o colmo perde sua forma cilíndrica original; e, uma vez perdida a forma, perde sua resistência mecânica. Outro aspecto que não contribui para a ampla disseminação da utilização do bambu – em sua forma natural – como elemento construtivo, é o fato de seu longo comprimento dificultar os processos de manuseio, armazenamento e transporte, dos colmos *in natura*, nos grandes centros urbanos. Neste aspecto, os materiais resultantes do processamento do bambu, têm a vantagem de serem transportados, manuseados e armazenados com maior facilidade, devido às suas dimensões

reduzidas e formas retilíneas. E, justamente, a forma plana, retilínea, possibilita o corte de peças com desenhos variados. Projetos paramétricos, com elementos distintos e geometrias complexas, podem ser viabilizados com este material, inclusive valendo-se da fabricação digital para produção das peças.

À medida em que há a possibilidade de se trabalhar com peças estruturais laminadas, as questões formais – da concepção do projeto – não mais estão atreladas às conformações dos colmos, o que possibilita uma liberdade projetual imensa, podendo resultar na elaboração de estruturas espaciais com inúmeras configurações.

O enfoque principal desta pesquisa se dá na investigação das possibilidades de execução de estruturas reticuladas, compostas por peças estruturais de painéis de bambu laminado colado.

Atualmente estas estruturas reticuladas são desenvolvidas, principalmente com madeira – mas outros materiais, como espuma de poliuretano, por exemplo, já veem sendo empregados. A proposta de utilizar bambu laminado

para este tipo de estrutura, baseia-se na necessidade de investigação da utilização de materiais mais sustentáveis na construção civil.

As estruturas reticuladas – constituídas de bambu laminado – configuram-se como elementos que agregam a utilização de um material natural, em um contexto urbano, contemporâneo; demonstrando a relevância da aplicação destas estruturas, que se apropriam das qualidades do bambu laminado: leveza, resistência, precisão dimensional, textura, dentre outras.

As placas de bambu laminado colado têm como uma de suas características, a espessura fina, o que acarreta a restrição de sua utilização – no uso estrutural - como elemento primário. Justamente é a pouca espessura que faz com que os painéis não tenham tanta rigidez para carregamentos transversais; portanto, uma das possibilidades é trabalhar a flexão no plano das chapas. Entretanto, atualmente no mercado, já estão disponíveis peças mais robustas – de bambu processado - que podem ser utilizadas como vigas e pilares.

A decisão de eleger uma estrutura tipo reticulada deu-se em função de suas características: são estruturas leves, resistentes, demandam de pouco material para sua construção, permitem trabalhar geometrias complexas, de dupla curvatura, podem ser constituídas utilizando-se elementos idênticos ou peças distintas entre si e são passíveis de montagem, desmontagem e remontagem. Além de apresentarem aspectos interessantes de serem analisados e investigados, como por exemplo, as ligações entre as peças. O presente trabalho traz um estudo de uma tipologia de estrutura reticulada, de dupla curvatura, constituída por peças distintas entre si, cujas ligações entre as peças dão-se através de encaixes.

A concepção e análise desta proposição projetual – de uma estrutura reticulada - tem o papel de ser um elemento aglutinador, que possibilita o diálogo e reflexões acerca dos temas propostos, como objeto de estudo: o material – bambu laminado – e as ferramentas, desenho paramétrico e fabricação digital.



Figura 2: Diagrama representativo: relações entre os temas centrais e seus correlatos, abordados na tese. Fonte: Autora (2021).

1.1 PROPOSIÇÃO

A proposição suscitada, nesta tese, refere-se à possibilidade de utilização do bambu laminado, como elemento construtivo de estruturas reticuladas, por meio de projetos paramétricos, utilizando mecanismos de prototipagem rápida - associados às máquinas CNC – possibilitando processos e sistemas construtivos que podem tirar partido das características estruturais das peças de bambu laminado.

1.2 OBJETIVOS

O foco principal da presente pesquisa é a utilização do bambu laminado – como elemento estrutural – na arquitetura contemporânea. Para tanto, será investigada sua aplicação em estruturas reticuladas.

Tendo como objetivo central a validação da proposição suscitada, a pesquisa desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

- Compreender o papel e os processos das tecnologias digitais na arquitetura contemporânea;
- Adquirir competências práticas acerca das ferramentas digitais e prototipagem rápida;
- Investigar o emprego do bambu laminado – como elemento construtivo – em estruturas reticuladas;
- Disseminar as possibilidades de emprego do bambu processado – como elemento construtivo - na arquitetura contemporânea.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A tese configura-se em uma estrutura partilhada entre elementos teóricos e práticos, que atuam de forma integrada na sua construção e desenvolvimento. Portanto, tem como metodologia etapas de embasamento teórico e construção empírica.

A fase de embasamento teórico deu-se por meio da revisão da literatura, pautando-se em livros, artigos científicos e teses; bem como, consultas aos acervos digitais, principalmente, sobre os produtos de bambu processado. Também, ocorreu a partir de participações em conferências, congressos, *workshops* e intercâmbios realizados [tabela 1].

A fase de construção empírica constituiu-se no processo de apropriação dos *softwares* de desenho paramétrico, bem como aos processos de fabricação digital. A experimentação dos diferentes equipamentos de fabricação digital, possibilitou o aprofundamento acerca dos métodos e ferramentas, contribuindo para a compreensão das

possibilidades e limitações do seu emprego na arquitetura contemporânea; mostrando que ainda há lacunas a serem respondidas e proposições futuras que se descortinam [tabela 2].

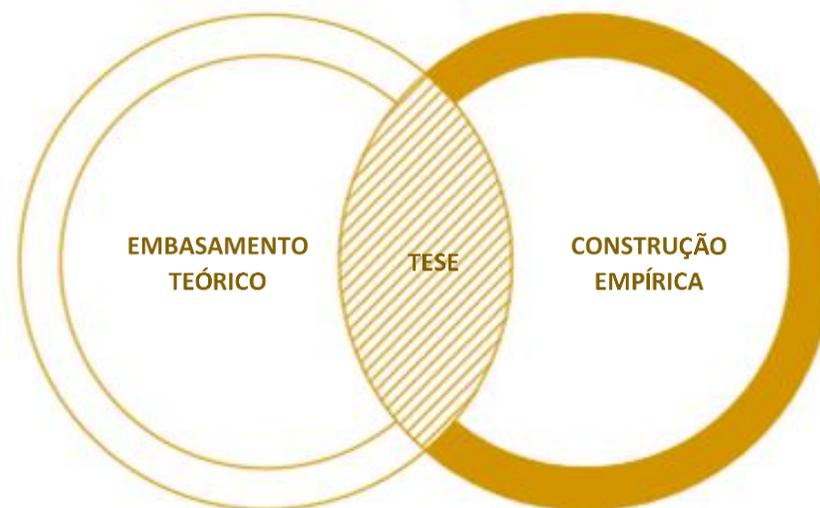


Figura 3: Diagrama representativo: procedimentos metodológicos da tese.
Fonte: Autora (2021).

2016	Estandarização Virtual: da linha de montagem à fábrica digital	Disciplina Pós-Graduação	FAUUSP Prof. Paulo Eduardo Fonseca de Campos Prof. André Leme Fleury
2016	Arquitetura Extrema: Concepção e Construção de Projetos com Alto Desempenho	Disciplina Pós-Graduação	FAUUSP Prof. Artur Lara
2016	Divisão de Tecnologias Tridimensionais	Visita técnica	Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer
2016	Structural Delights: Computation, Matter, and Imagination	Conferência	POLI-USP Prof. Sigrid Adriaenssens - University of Princeton
2016	AA Visiting School São Paulo	Conferência	Faculdade Belas Artes Shajay Bhooshan [escritório da Zaha Hadid]
2016	II Encontro Cascas Estruturadas	Palestra proferida: Cascas Reticuladas	FAU / POLI-USP
2017	O Bambu e a Arquitetura Contemporânea	Palestra proferida	Disciplina Construção do Edifício 2 – FAUUSP Prof. Reginaldo Ronconi
2018	Universidade de Coimbra	Intercâmbio	Faculdade de Ciências e Tecnologia Departamento de Arquitectura
2019	Universidade do Porto	Intercâmbio	Faculdade de Arquitectura Digital Fabrication Laboratory - DFL
2019	Making Architecture: dialogues between Oslo and Porto	Conferência	Architectural design processes from Academia to Practice Søren Sørensen [AHO] Snøhetta: People, Process, Projects_Sofia Cunha [AHO + Snøhetta] Research by Design, teaching and research experiments at FAUP/DFL_José Pedro Sousa, Pedro Martins, Pedro Varela
2019	Innovation in the Architectural Language of Wood	Conferência	Universidade do Porto Faculdade de Arquitectura
2019	IASS – The International Association for Shell & Spatial Structures	Congresso	Barcelona
2019	Performative Porosity – Volumetric Modeling for Building	Workshop	POLI-USP Prof. Benjamin Dillenberger – ETH Zürich
2020	Diseño digital bioinspirado	Workshop	Digital Futures Prof. David Andrés Torreblanca Díaz
2020	Diseño y Simulación Robótica de impresión 3D en Arcilla	Workshop	Digital Futures Prof. Verónica Arcos / Prof. Tomás Vivanco
2021	Introduction to Parametric Structural Modeling and Design with Karamba	Workshop	Digital Futures Prof. Felipe Tavares

Tabela 1: Embasamento teórico: participação em eventos relacionados aos temas de estudo. Fonte: Autora (2021).

CONSTRUÇÃO EMPÍRICA

Técnica: Corte	CNC laser	Papelão	FAUUSP
Técnica: Corte	CNC laser	MDF	FAUUSP
Técnica: Corte	CNC laser	Bambu laminado	FAUUSP
Técnica: Subtrativa	CNC fresadora	Polietileno	FAUUSP
Técnica: Subtrativa	CNC fresadora	Aglomerado de madeira	FAUUSP
Técnica: Subtrativa	CNC fresadora	Bambu laminado	FAUUSP
Técnica: Aditiva	Impressora 3D	Filamento	FAUUSP
Técnica: Aditiva	Impressora 3D	Filamento	Faculdade de Arquitectura – Universidade do Porto Digital Fabrication Laboratory - DFL
Técnica: Subtrativa	Braço Robótico	Bambu laminado	Faculdade de Arquitectura – Universidade do Porto Digital Fabrication Laboratory - DFL

Tabela 2: Construção empírica: testes realizados com máquinas CNC¹. Fonte: Autora (2021).¹CNC: *Computer Numerical Control* [Controle Numérico Computadorizado]

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

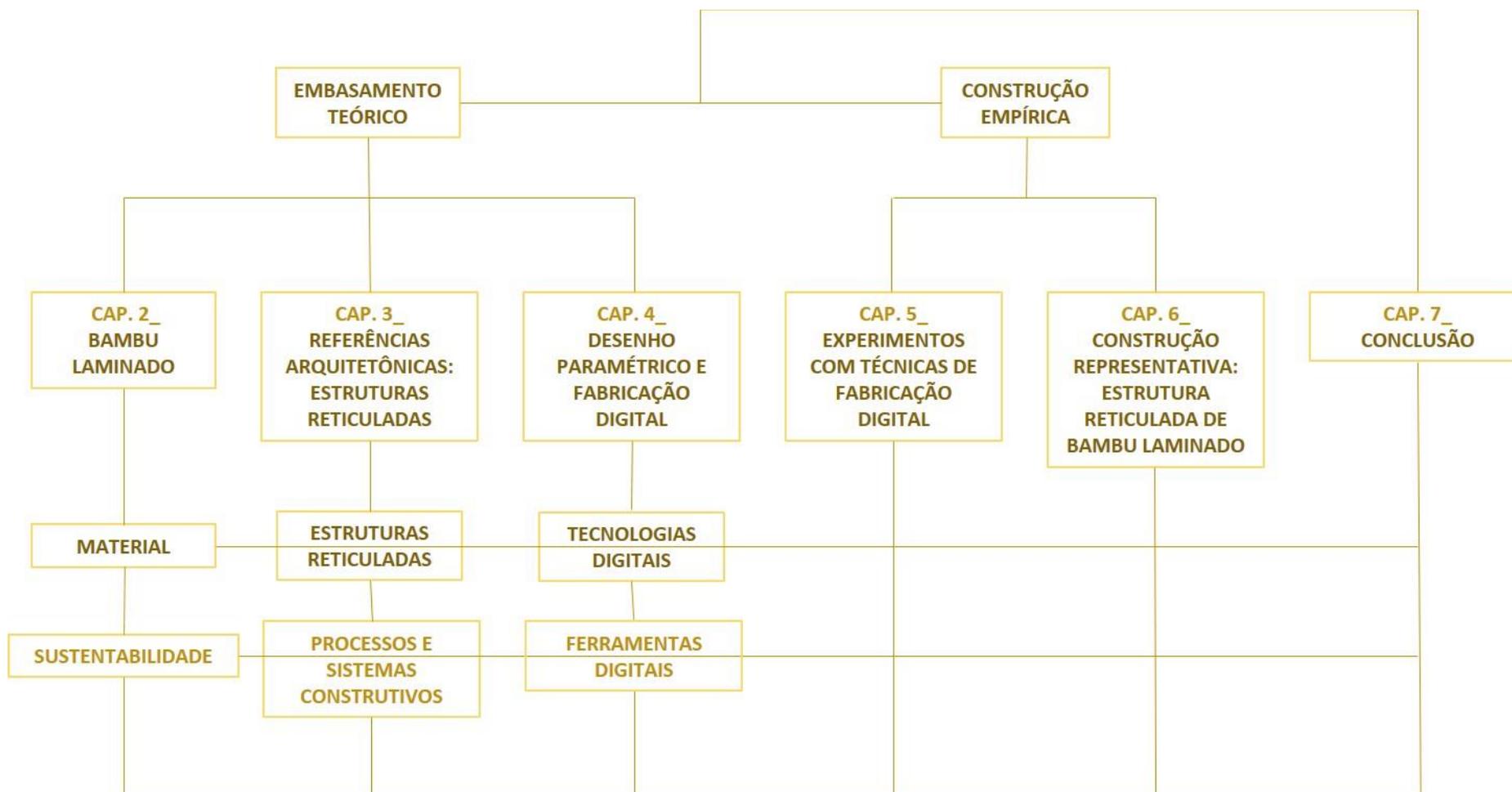


Figura 4: Diagrama representativo: estrutura do trabalho. Fonte: Autora (2021).

Os conteúdos e sequências dos capítulos, foram delineados de forma a articular todos os temas, interligando-os.

Esta tese organiza-se em sete capítulos, incluindo o presente capítulo [Introdução]. A seguir, uma descrição acerca das temáticas abordadas:

1_Introdução

O primeiro capítulo traz uma abordagem geral sobre o tema escolhido para a pesquisa; apresentando a proposição suscitada, objetivos, procedimentos metodológicos e estrutura do trabalho.

2_Bambu laminado

O capítulo 2 contextualiza a utilização do bambu e demonstra suas características. Apresenta as nomenclaturas

dos produtos de bambu processado. Mostra o processo de produção do bambu laminado. Trata especificamente do bambu laminado, demonstrando as características e propriedades deste material. Apresenta as normas técnicas existentes. E, por fim, comprova a viabilidade do bambu laminado como elemento estrutural.

3_Referências arquitetônicas: estruturas reticuladas

Este capítulo traz referências arquitetônicas de projetos que se valeram de estruturas reticuladas. Apresenta três projetos emblemáticos, construídos com madeira: Pavilhão Serpentine Gallery [2005]; Metropol Parasol e Swatch Omega.

4_Desenho paramétrico e fabricação digital

O presente capítulo aborda questões acerca das tecnologias e ferramentas digitais: desenho paramétrico e

fabricação digital. Faz uma breve contextualização sobre o panorama atual, com enfoque em sua aplicação na arquitetura e traz algumas reflexões sobre suas possibilidades de emprego, apresentando alguns dos grupos de pesquisas e laboratórios dedicados ao tema. Demonstra as técnicas de fabricação digital e respectivos equipamentos, apresentando suas características e especificidades, por meio de exemplos produzidos pelas máquinas CNC; bem como exemplos de aplicação. Apresenta exemplos, das diferentes técnicas, aplicadas à arquitetura contemporânea.

5_Experimentos com técnicas de fabricação digital

Este capítulo contempla os experimentos realizados durante o período de desenvolvimento desta pesquisa, como aporte à construção empírica, adotada como parte integrante do processo metodológico; as investigações de viés prático, são aparadas e complementam o embasamento teórico da pesquisa. O primeiro experimento apresentado trata-se de uma

estrutura reticulada desenhada no *software Rhinoceros* e parametrizada pelo *plug-in Grasshopper*, além dos modelos digitais, foram executados modelos físicos em papel e MDF, utilizando a CNC *laser*. Os demais experimentos apresentados foram realizados utilizando as seguintes técnicas de fabricação digital: corte, subtração e adição.

6_ Construção representativa: estrutura reticulada de bambu laminado

O sexto capítulo, congrega os conteúdos dos capítulos anteriores, na medida em que faz uso de uma construção representativa, a fim de integrar os três temas apresentados: bambu laminado; estruturas reticuladas; desenho paramétrico e fabricação digital. Valendo-se da concepção de uma tipologia de estrutura reticulada, cujo desenvolvimento se dera a partir da utilização de um programa de desenho paramétrico. E, para execução de protótipos, utilizou-se a fabricação digital,

demonstrando a aplicabilidade do bambu laminado, como elemento construtivo estrutural e viável de ser trabalhado nas máquinas CNC. Este capítulo demonstra todas as etapas, com viés mais prático, envolvidas nesta pesquisa. Aponta as dificuldades encontradas e resultados obtidos. Realiza a análise do comportamento estrutural da tipologia estudada, por meio de um algoritmo desenvolvido nos *plug-in Grasshopper e Karamba 3D*. A fim de explorar as características de análises, proporcionadas pelo *Karamba 3D*, foram realizadas simulações adotando três opções de secções das peças constituintes da estrutura reticulada. No algoritmo foram inseridos valores referentes ao bambu laminado.

7_Conclusões

E, o último capítulo, faz uma reflexão embasada e perpassando todos os temas e aspectos abordados nos capítulos anteriores e suscita possíveis desdobramentos futuros.

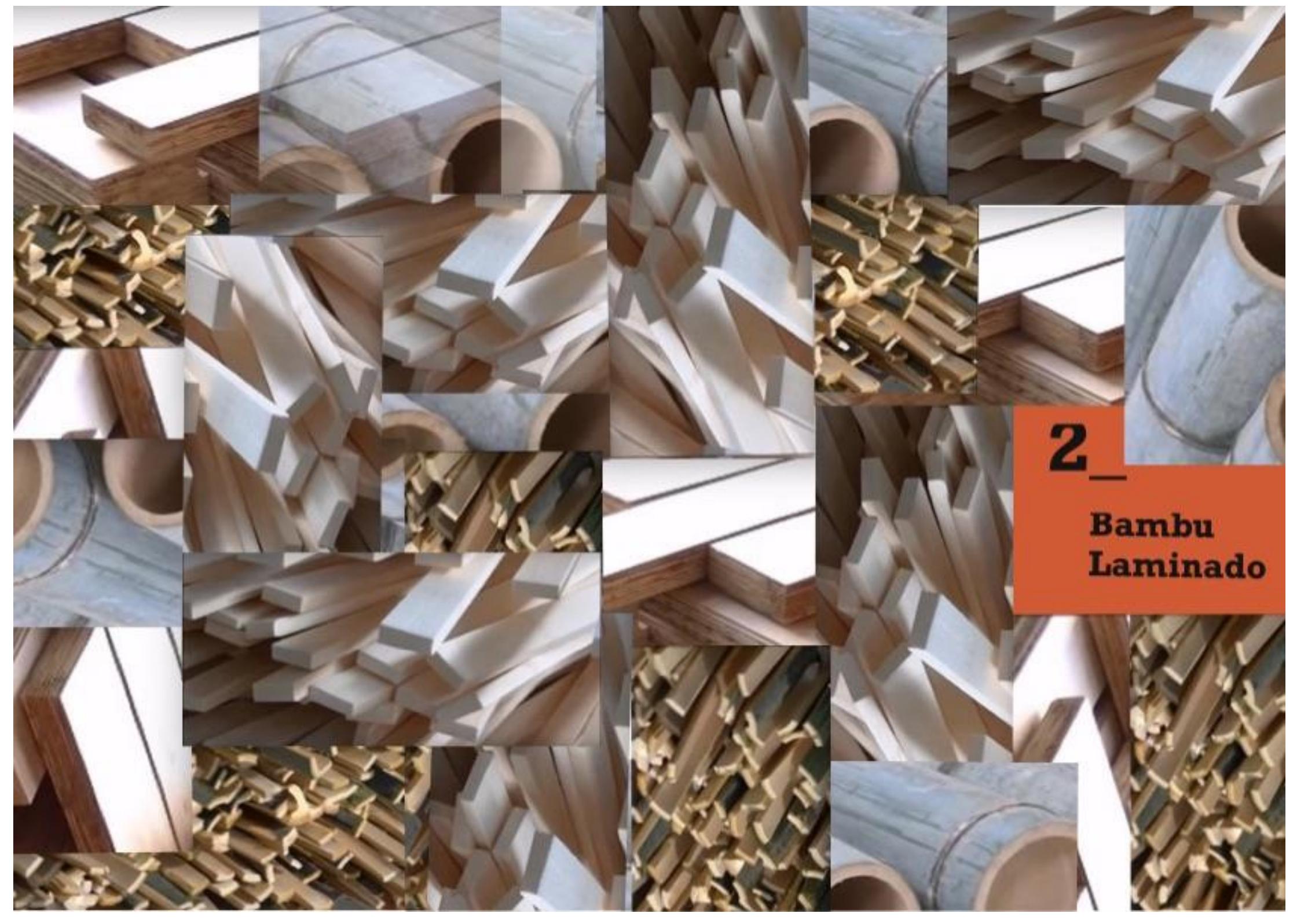
Trazendo à reflexão, pautada nos exemplos discorridos, como estas tecnologias podem ser empregadas auxiliando na disseminação da utilização do bambu laminado, como elemento construtivo, inclusive nos centros urbanos, na arquitetura contemporânea.

Há, ainda, três anexos tratando de assuntos pertinentes e correlacionados à pesquisa:

Anexo I_ exercício projetual desenvolvido na disciplina de pós-graduação FAUUSP, em 2016

Anexo II_ experiências desenvolvidas com alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, em 2018

Anexo III_ Congresso IASS 2019



2

**Bambu
Laminado**

2_ BAMBU LAMINADO

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O cultivo e utilização do bambu remontam há milhares de anos. Na China, entre os séculos XVI e XI a.C., há registros de seu uso extensivo em diversas aplicações, como: alimentação, construção de habitações e transportes, confecção de roupas e acessórios, produção de utensílios, instrumentos musicais e armas, dentre outros. E, no século II a. C., utilizou-se a polpa do bambu, para a produção do primeiro tipo de papel (LÓPEZ, 2003).

Atualmente, estima-se que 2,5 bilhões de pessoas utilizem, diariamente, o bambu em algumas destas formas mencionadas (GRANBERG, 2020).

Inclusive, na vida contemporânea, houve um aumento da gama de produtos oriundos do bambu, devido às novas técnicas de processamento e produção; sua aplicação pode ser encontrada nas áreas de energia, esportes, cosméticos, medicina, design, arquitetura, gastronomia, dentre outras. Citando alguns exemplos, o bambu pode ser utilizado na confecção de chás, vinhos, vinagres e cervejas; como carvão ativado; empregado como biocombustível; utilizado para produção de papel, tecido e bioplásticos; dentre outras inúmeras aplicações.

O bambu pertence à família das gramíneas, sendo a planta de crescimento mais rápido, no planeta; dependendo da espécie, a taxa de crescimento, em um período de 24 horas, pode chegar a 90 cm; quase 5 cm por hora. Algumas das espécies, lenhosas, podem atingir mais de trinta metros de altura.

São mais de mil e quatrocentas espécies de bambu, podendo ser encontradas em uma ampla variedade de biótopos, desde montanhas frias até regiões tropicais quentes. (WANG et al., 2020).

Desde meados do século XX, há registros do aumento constante na temperatura global. Há evidências contundentes que apontam para uma mudança climática, provocada pelo homem, causada principalmente pela liberação de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, na atmosfera. A partir da revolução industrial, houve significativo aumento na quantidade de dióxido de carbono liberado para a atmosfera, em decorrência da utilização de

combustíveis fósseis; ao utilizar-se combustível fóssil, como fonte de energia, retira-se o carbono do solo - em estado sólido - liberando-o na atmosfera em estado gasoso. Há pesquisas - a partir de dados extraídos dos núcleos de gelo - demonstrando que a concentração de dióxido de carbono, atualmente, é maior do que em qualquer momento nos últimos 800.000 anos (GRANBERG, 2020).

Uma estratégia para reduzir esses níveis de emissão de dióxido de carbono é, naturalmente, diminuir o uso de combustíveis fósseis; reduzindo o consumo de energia ou mudando para fontes de energia renovável, como energia solar e eólica. Outra estratégia, bem sucedida, para diminuir o nível de dióxido de carbono na atmosfera é o sequestro biológico de carbono.

O sequestro biológico de carbono é um processo pelo qual as plantas e os microrganismos armazenam o carbono, em estado sólido, na biomassa vegetativa e no solo. Durante a fase de crescimento, para se desenvolverem, as plantas necessitam

de uma quantidade muito grande de carbono. A partir da fotossíntese, há a fixação de gás carbônico, da atmosfera, na forma de carboidratos, que são incorporados às células. Esse carbono, portanto, é retirado da atmosfera. Então, apenas pelo crescimento, as plantas estão convertendo o carbono no estado gasoso, da atmosfera, em carbono, no estado sólido.

Com relação à sustentabilidade, há que se considerar o emprego de madeira, bambu e outros materiais orgânicos, como opções a serem usadas na construção civil, inclusive em estruturas; um dos motivos relevantes é o sequestro de biológico de carbono; pois, mesmo após serem retirados da natureza, processados e transformados em elementos construtivos, o carbono armazenado em suas células, não retornará à atmosfera.

Devido às características – de rápido crescimento e produção contínua de novas superfícies foliares – o bambu pode ser considerado um recurso muito útil para capturar e sequestrar carbono atmosférico rapidamente; tornando-se,

portanto, uma escolha muito atraente para as estratégias de mitigação da degradação ambiental.

Além deste aspecto relativo ao sequestro biológico de carbono, o bambu, também, desempenha outras funções ecológicas importantes. Sua estrutura complexa de rizomas, ou seja, suas raízes subterrâneas, são muito eficientes para: fixação de solos; contenção da erosão; interrupção da sedimentação dos rios; e regulação do fluxo de água.

O bambu, também, tem uma excelente capacidade de limpar a água. Sua constituição física permite remover e acumular resíduos orgânicos. E, por isso, tem se mostrado eficaz na fito-remediação, um processo em que o solo contaminado com produtos químicos perigosos é limpo com a ajuda de plantas vivas. O bambu pode, muitas vezes, prosperar em solos problemáticos; solos em que muitas outras culturas não poderiam se desenvolver adequadamente.

Estas são algumas das características que justificam a disseminação da utilização do bambu, como uma das alternativas para equacionar-se problemas ambientais.

O bambu tem grande potencial para contribuir com a regeneração da natureza, enquanto espécie vegetal – viva – interagindo com o ecossistema. E, também, após sua colheita, podendo ser utilizado para inúmeros fins. Considerando-se suas características físicas e mecânicas, há muitas possibilidades de aplicação deste material, como elemento construtivo, podendo ser utilizado em sua forma natural – colmos – ou nas diversas formas processadas, como laminado colado, por exemplo. É comprovado seu bom desempenho em áreas que sofrem abalos sísmicos; muitas construções – com bambu – ficam incólumes após a ocorrência de terremotos. Se usado corretamente, o bambu iguala sua resistência à tração, do aço; e a resistência à compressão, do tijolo e do concreto (PEREIRA; BERALDO, 2007).

O impacto ambiental oriundo do setor da construção civil, perde apenas para o setor de energia; a extração de materiais e geração de resíduos e poluentes são extremamente significativas e danosas ao meio ambiente; sendo muitas vezes, irreversíveis. E, por isso, é tão importante existirem opções de materiais construtivos, que atendam aos requisitos técnicos e, simultaneamente, contribuam para a minimização dos danos ambientais. Neste aspecto, também, o bambu pode ser uma alternativa para o setor da construção civil, que necessita de materiais renováveis e sustentáveis. Há, ainda, alguns entraves para que sua utilização seja plenamente disseminada e incorporada às construções contemporâneas. Algumas barreiras encontram-se mais no âmbito da subjetividade; ainda há uma certa resistência cultural, à linguagem do bambu. E há fatores limitantes, quando se trata dos códigos de obras e normas das grandes cidades. Há alguns países, como

Colômbia¹, China, Equador, Estados Unidos e Brasil, dentre outros, que já desenvolveram normas técnicas para construção com bambu.

Especificamente, no caso da norma brasileira², recém validada, trata apenas da utilização dos colmos. A normalização é um passo importante para a disseminação da utilização do bambu como elemento construtivo. O fato de existirem normas, especificamente para bambu, pode contribuir para a propagação do interesse no material, tendo em vista que há respaldos técnicos para sua utilização na construção civil.

Atualmente, descortinam-se alguns caminhos para a implementação do bambu na arquitetura contemporânea. Em se tratando de seu emprego de forma tradicional – colmos – há a possibilidade de inovação na configuração de utilização, por

¹ A Colômbia tem vasta tradição na utilização do bambu como elemento construtivo. Oscar Hidalgo López, arquiteto e estudioso, ainda é uma das referências sobre o tema. O país, também, está repleto de referências arquitetônicas, muitas das quais assinadas por Simon Vélez e Jörg Stamm. Em 2015, houve a oportunidade de encontrá-los, em Bogotá, no Tercer Simposio Internacional de la Guadua y el Bambú, para apresentação de artigo derivado da

meio das novas tecnologias; que podem ser incorporadas desde a concepção do projeto e, concomitantemente, às análises de desempenho; bem como, na solução de aspectos técnicos, como as ligações entre os colmos, que podem, por exemplo, ser confeccionadas em impressoras 3D. Além das opções de materiais derivados do processamento do bambu, que podem ser incorporados de forma significativa às construções contemporâneas, também, por meio das tecnologias digitais.

Há diversas possibilidades de aplicações contemporâneas da utilização do bambu na arquitetura; importante que haja divulgação, para que seu uso seja disseminado.

dissertação de mestrado da autora; que também foi convidada, como palestrante, à Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia.

² ABNT-NBR 16828-1 e 16828-2

2.2 CARACTERÍSTICAS DO BAMBU

O bambu pertence à família das gramíneas *Gramineae* (*Poaceae*), subfamília *Bambusoideae*. A subfamília *Bambusoideae* ocorre naturalmente em quase todos os continentes, exceto Europa e Antártica. Distribui-se entre 46° N e 47° S de latitude e altitudes que variam do nível do mar até 4.300m. Apresenta a seguinte distribuição: 62% das espécies são nativas da Ásia, 34% são nativas das Américas e 4% são nativas da África e Oceania (LÓPEZ, 2003).

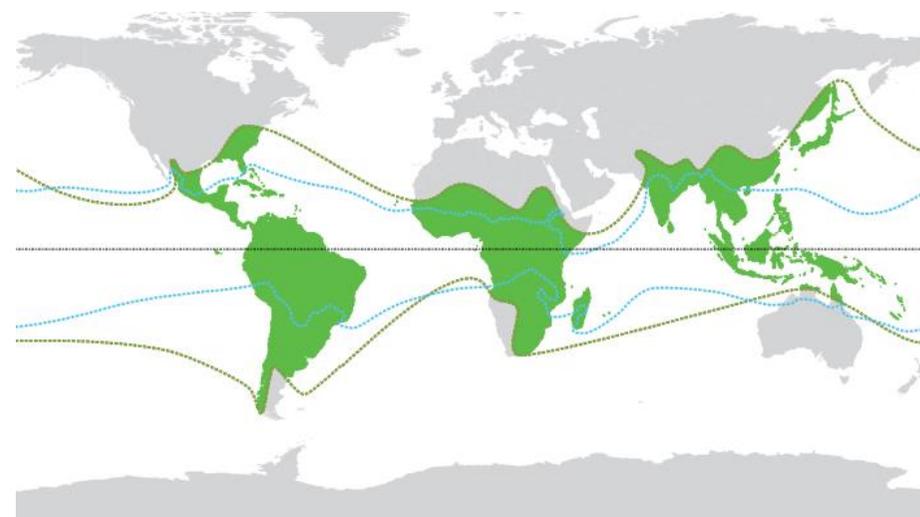


Figura 5: Mapa: distribuição mundial subfamília *Bambusoideae* [em verde].
Fonte: National Geographic (1980).

A subfamília *Bambusoideae* é composta por 1.482³ espécies, classificadas em três grupos:

- *Olyreae*: são os bambus herbáceos, perenes, principalmente distribuídos na região neotropical, com 124 espécies;
- *Arundinarieae*: bambus lenhosos, ocorrem nativamente na região temperada e regiões alpinas dos trópicos, com 546 espécies;
- *Bambuseae*: bambus lenhosos, de clima tropical, com 812 espécies;

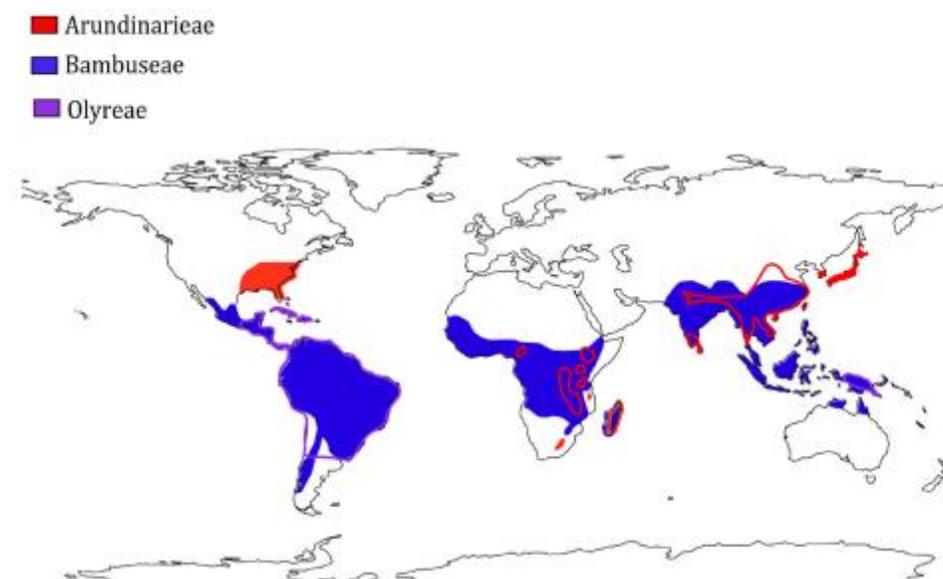


Figura 6: Distribuição geográfica nativa dos bambus. Bambus lenhosos temperados (*Arundinarieae*), bambus lenhosos tropicais (*Bambuseae*) e bambus herbáceos (*Olyreae*) são coloridos em vermelho, azul e roxo, respectivamente. As áreas com linhas vermelhas e roxas circuladas são a área de sobreposição da tribo *Arundinarieae* (vermelha) e da tribo *Bambuseae* (azul), e a área de sobreposição da tribo *Olyreae* (roxo) e da tribo *Bambuseae* (azul), respectivamente. Fonte: Wang et al., (2020).

³ De acordo com: Wencai Wang , Siyun Chen , Wei Guo , Yongquan Li & Xianzhi Zhang (2020). Tropical plants evolve faster than their temperate relatives: a case from the bamboos (Poaceae: Bambusoideae) based on chloroplast genome data,

De acordo com Londoño (2001), o Brasil concentra a maior diversidade: são 16 gêneros e 134 espécies de bambus lenhosos, compreendendo 32% das espécies e 85% dos gêneros encontrados na América Latina. A Mata Atlântica possui a maior diversidade de bambus no mundo: são 22 gêneros e 62 espécies de bambus lenhosos e herbáceos.

Dos gêneros de bambus lenhosos, nativos do Brasil, acredita-se que apenas *Actinocladum*, *Apoclada*, *Chusquea*, *Guadua* e *Merostachys* consistam de quaisquer espécies que tenham ou possam ter algum uso potencial, segundo Londoño (2001).

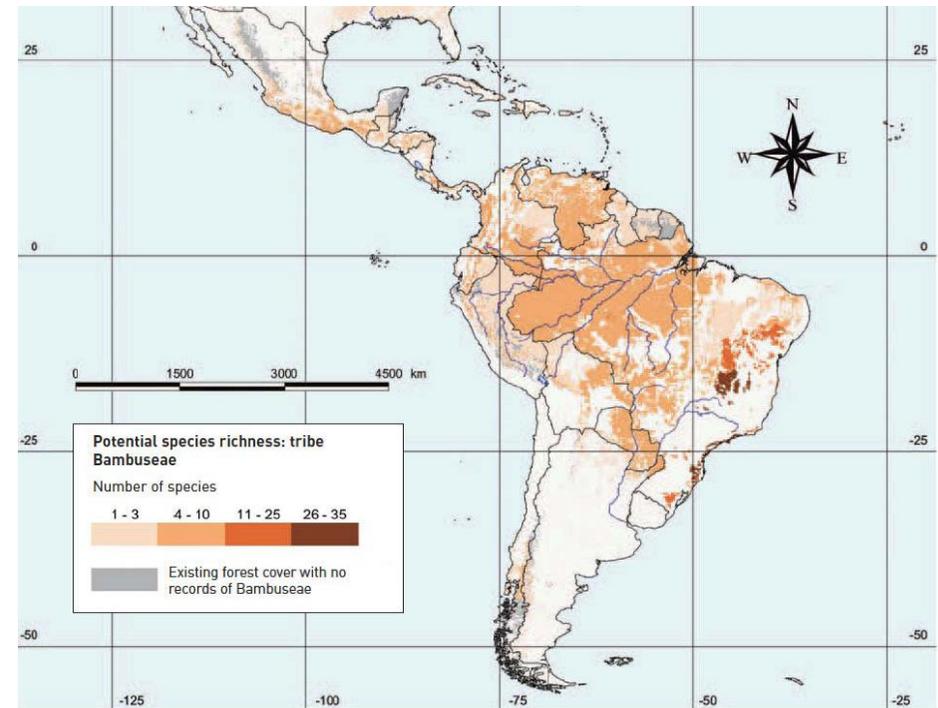


Figura 7: Mapa: distribuição de *Bambuseae* na América Latina. Fonte: guaduabamboo (2019).

No Brasil, as espécies de bambu mais conhecidas e propagadas são de origem asiática. Os colonizadores portugueses introduziram, algumas destas espécies, oriundas de suas possessões na Ásia, sendo os principais gêneros: *Bambusa* e *Dendrocalamus*. Estas espécies adaptaram-se ao clima local e, atualmente, tais gêneros de bambus encontram-se disseminados por todo o território nacional, fazendo parte do ecossistema, servindo de proteção da fauna e preservando os lençóis d'água.

Outros gêneros de bambus foram introduzidos, mais recentemente, ao Brasil, trazidos por imigrantes asiáticos [gêneros *Sasa* e *Phyllostachys*]. Cabe destacar que tais bambus, de crescimento alastrante, atualmente constituem-se em importante fonte de renda para agricultores, artesãos e construtores em bambu.

No Brasil, as espécies comumente utilizadas para a construção civil são: *Phyllostachys pubescens*, *Guadua angustifolia* e *Dendrocalamus giganteus*, conforme as figuras 8 a 10. Entretanto, há mais de dezoito espécies cujas características são adequadas à utilização na construção civil⁴.



Figura 8: *Phyllostachys pubescens*. Fonte: Pereira; Beraldo (2007).



Figura 9: *Guadua angustifolia*. Fonte: : Pereira; Beraldo (2007).



Figura 10: *Dendrocalamus giganteus*. : Pereira; Beraldo (2007).

⁴ De acordo com: FARELLY (1938), YOUNG; HAUN (1961), McCLURE (1966), MINKE (2012), PEREIRA; BERHALDO (2007).

Fazendo uma analogia com as árvores, os troncos, nos bambus são denominados colmos.

Os colmos de bambu geralmente são ocos [uma das exceções é o gênero *Chusquea*] e apresentam forma cilíndrica. Têm como característica a presença de uma sequência de entrenós [internós] ocos, separados transversalmente, uns dos outros, por diafragmas [septos], que aparecem externamente como nós, de onde saem ramos e folhas, dispostos alternadamente; como pode ser observado na figura 11 (PEREIRA; BERALDO, 2007).

Os diafragmas fornecem maior rigidez e resistência aos colmos, permitindo suportar a ação do vento e do peso próprio. O bambu é constituído de um tecido resistente, que é um tipo de compósito natural lignocelulósico, de baixa massa específica aparente, porém de elevada resistência mecânica (PEREIRA; BERALDO, 2007).

O conjunto fibras-vaso é responsável pela resistência mecânica, enquanto a matriz, constituída por células de

parênquima, fornece a flexibilidade ao conjunto (BERALDO et al., 2003).

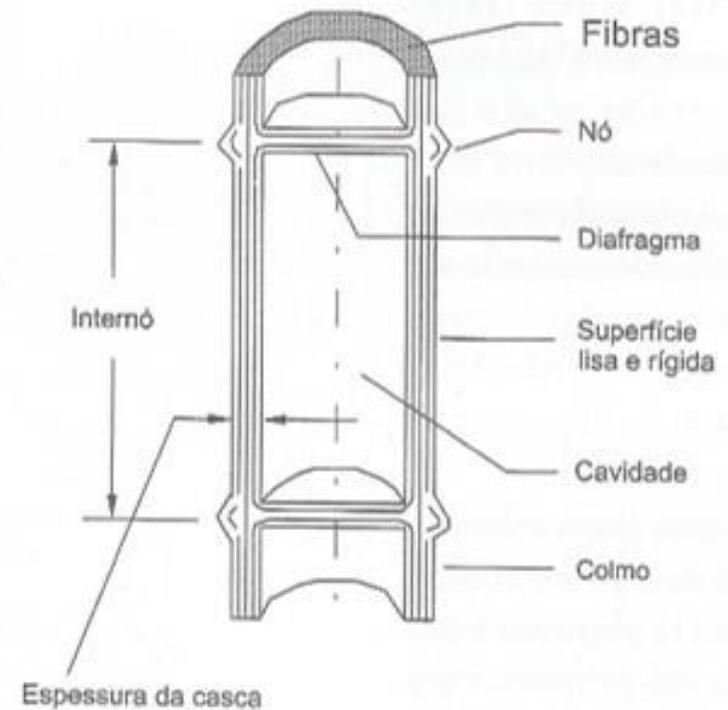


Figura 11: Secção longitudinal do colmo. Fonte: Freire; Beraldo (2003).

De acordo com a espécie, há variações nos colmos referentes à altura, diâmetro, espessura de parede e forma de crescimento. Os colmos nascem com o mesmo diâmetro que terão por toda a vida; este diâmetro é maior na base e vai diminuindo na parte superior. O intervalo entre os entrenós, é maior da base até o meio do colmo e vai diminuindo em direção à ponta superior. Em algumas espécies lenhosas, os diâmetros dos colmos são de apenas alguns milímetros, atingindo poucos centímetros de altura [por exemplo, algumas espécies dos gêneros *Sasa* e *Pseudosasa*]. Há algumas espécies gigantes de bambus, que podem atingir, aproximadamente, trinta metros de altura e diâmetros em torno de trinta centímetros [principalmente espécies do gênero *Dendrocalamus*]. Em uma mesma espécie, o diâmetro do colmo será influenciado pelo ambiente, clima, solo, idade da touceira e condições locais; a touceira apresentará a medida máxima, dos diâmetros dos colmos, por volta do quarto ou quinto ano após o plantio. A

altura máxima, do colmo, é atingida após alguns dias do surgimento do broto; para as espécies lenhosas, a partir de 30 dias e para espécies gigantes, no máximo 180 dias. Os colmos brotam anualmente, geralmente nas estações chuvosas. Os brotos são protegidos por brácteas [ou bainhas], um tecido delicado, cujas folhas têm formato triangular. Estas folhas recobrem cada um dos nós que vão se formando e caem após o colmo completar seu máximo crescimento, quando então inicia-se a formação de ramos e folhas. É este fato que permite o rápido crescimento dos colmos (PEREIRA; BERBALDO, 2007⁵).

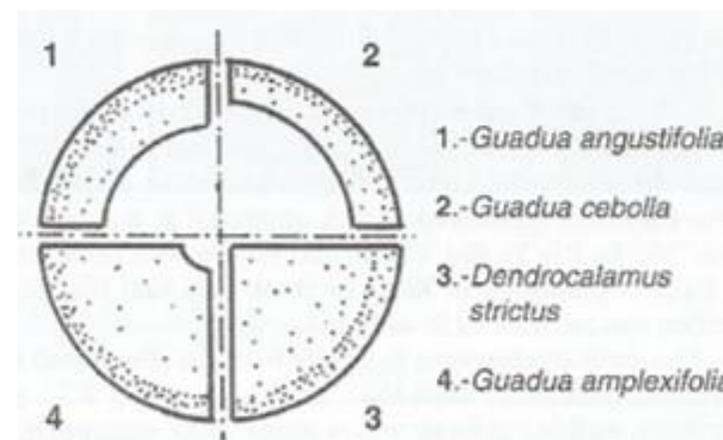


Figura 12: Seção transversal dos colmos de 4 espécies. Fonte: López (2003).

⁵ Para maiores informações sobre: cultivo, colheita, secagem, armazenamento, tratamento, dentre outros aspectos sobre bambu, consultar: (PEREIRA; BERBALDO, 2007)

Os rizomas são responsáveis por duas funções:

- Armazenamento de nutrientes para posterior distribuição aos colmos [os colmos mais velhos, aliados aos rizomas, também auxiliam na nutrição fornecida para o crescimento dos colmos novos];
- Propagação do bambu: anualmente efetua-se assexuadamente por ramificação destes rizomas;

Os dois principais grupos de bambu, derivam-se da forma como a ramificação ocorre:

- **Grupo paquimorfo [entouceirante]:** os colmos nascem e se desenvolvem agrupados uns aos outros; encontram-se nas regiões quentes e tropicais; principais gêneros: *Dendrocalamus*, *Bambusa*, *Gigantochloa* e *Guadua*.
- **Grupo leptomorfo [alastrante]:** os colmos nascem e se desenvolvem separados uns dos outros; são resistentes

às baixas temperaturas, e por isso, encontrados nas zonas temperadas; principais gêneros: *Phyllostachys*, *Sasa* e *Pleioblastus*.



Figura 13: Morfologia do bambu leptomorfo. Fonte: Rockwood (2015).



Figura 14: Produção Bambuparque: rizoma paquimorfo. Fonte: Autora (2013).



Figura 15: Produção Bambuparque: rizoma leptomorfo. Fonte: Autora (2013).

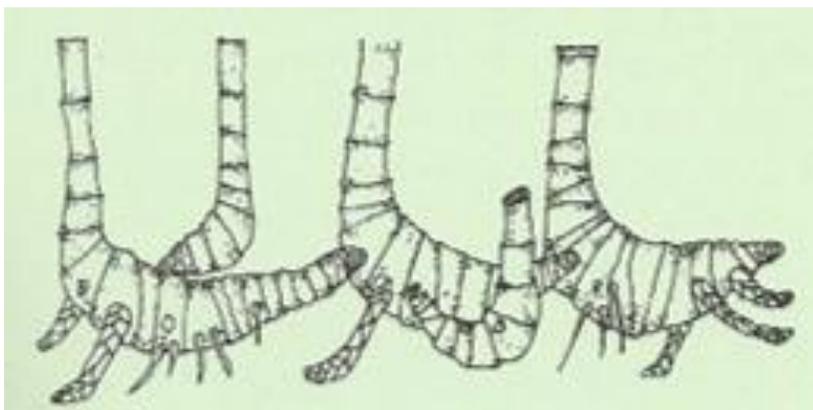


Figura 16: Rizoma paquimorfo. Fonte: Minke (2012).

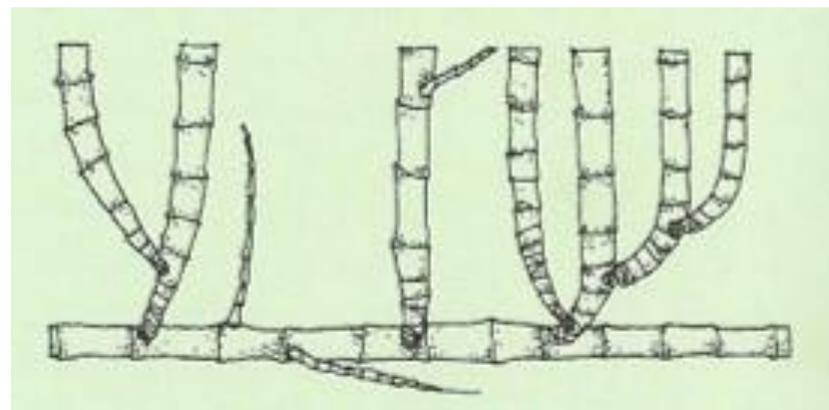


Figura 17: Rizoma leptomorfo. Fonte: Minke (2012).

2.3 NOMENCLATURA DOS PRODUTOS DE BAMBU PROCESSADO

Há uma enorme variedade de produtos feitos de bambu em diferentes países; só a China, registra cerca de 10.000 produtos de bambu distintos em mais de 100 categorias para usos tão diversos quanto construção, mobiliário, decoração, artesanato, papel, embalagem, transporte, medicamentos, alimentos, têxteis e extratos químicos (HOU et al., 2009).

Assim como, há várias maneiras de processamento do bambu. Portanto, há a necessidade de padronização das nomenclaturas, tanto dos insumos derivados de bambu, que serão base para a produção dos produtos processados; quanto para os produtos, propriamente.

Neste trabalho, serão adotadas as nomenclaturas de acordo com Liu et al. (2016). Entretanto, no referido artigo, não há tradução dos termos para a língua portuguesa; portanto, a seguir, serão propostas traduções para os produtos descritos.

Os autores propõem a subdivisão, dos produtos de bambu, em três categorias principais: placas de bambu, bambu laminado e bambu densificado.

NOMENCLATURA DOS PRODUTOS DE BAMBU PROCESSADO ⁶				
NOMENCLATURA EM PORTUGUÊS	NOMENCLATURA EM INGLÊS	NOMENCLATURA EM ESPANHOL	NOMENCLATURA EM CHINÊS PINYIN	IMAGEM DO PRODUTO
Placa de Fibra de Bambu	Bamboo Fiberboard	Tablero de Fibras de Bambú	Zhú Xiān Wéi Bǎn	
Placa de Esteiras de Bambu	Bamboo Mat Board	Tablero de Esteras Bambú	Zhú Xí Jiāo Hé Bǎn	
Placa de Aparas Orientadas de Bambu	Bamboo Oriented Strand Board	Tablero de Virutas Orientadas de Bambú	Zhú Dìng Xiàng Bào Huā Bǎn	

⁶ *Engineered Bamboo Products*: com relação ao termo '*Engineered Bamboo*', na literatura, há traduções considerando-o como 'bambu engenheirado'; entretanto, neste trabalho, este termo será traduzido como: 'bambu processado'.

Placa de Aglomerado de Bambu	Bamboo Particleboard	Tablero Aglomerado de Bambú	Zhú Bào Huā Bǎn	
Placa de Esteira de Bambu Laminado	Laminated Bamboo Esterilla Sheet	Tablero de Esterilla de Bambú Laminado	Zhú Shù Dān Bǎn Céng Jī Cǎi	
Placa de Bambu Laminado	Laminated Bamboo Sheet	Tablero de Bambú Laminado	Zhú Jí Chéng Bǎn Cǎi	

Bambu Laminado	Laminated Bamboo	Bambú Laminado	Zhú Jí Chéng Fāng Cǎi	
Bambu Densificado	Bamboo Scrimber	Scrimber de Bambú	Zhú Chóng Zǔ Cǎi	

Tabela 3: Nomenclatura dos produtos de bambu manufaturado. Fonte: Liu et al. (2016) – adaptado pela autora (2021).

DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS DE BAMBU PROCESSADO		
NOMENCLATURA EM PORTUGUÊS	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	IMAGEM DO PRODUTO
Placa de Fibra de Bambu	A Placa de Fibra de Bambu é um painel compósito formado por fibras individuais de bambu. O painel de fibra é prensado a quente e colado; é fabricado usando tecnologia e processamento semelhantes ao painel de fibra de densidade média à base de madeira [MDF]. Normalmente são utilizadas resinas de ureia formaldeído ou melamina formaldeído em sua composição. As placas de fibra de bambu podem ser utilizadas como revestimentos internos e para fabricação de mobiliários, principalmente armários.	
Placa de Esteiras de Bambu	Placa de Esteiras de Bambu é um painel tipo contraplacado laminado cruzado e prensado a quente, geralmente composto de esteiras de bambu trançadas nas camadas da face e cortinas de bambu costuradas como camadas internas. Ele pode conter camadas de folheado de madeira e geralmente é acabado com uma camada de papel fenólico. Embora seja altamente adequado para fins de revestimento de construção e revestimento de pisos, é atualmente usado principalmente para cofragens de concreto, pisos de contêineres de transporte e estruturas temporárias. Na Índia e no Vietnã, os produtos mais finos do tipo madeira compensada são feitos inteiramente de esteiras de bambu trançado. A maioria dos produtos contém de três a cinco camadas. Uma variação inovadora da	

	<p>versão de três camadas desenvolvida na Índia é impregnar as esteiras com resina de fenol formaldeído (PF) de grau externo e prensá-la a quente entre placas corrugadas para produzir um produto de cobertura ondulada para habitação de baixo custo. Também conhecido como: <i>Ply bamboo; Bamboo Curtain Plywood; Bamboo Plywood; Bamboo Curtain Plywood; Bamboo Mat Woven Plywood; Bamboo Mat Plywood; Bamboo Mat Corrugated Plywood.</i></p>	
<p>Placa de Aparas Orientadas de Bambu</p>	<p>Placa de Aparas Orientadas de Bambu é um painel prensado a quente composto por fios orientados nas camadas superficiais e um núcleo orientado aleatoriamente, fabricado com a mesma tecnologia do OSB de madeira. São usadas resinas de PF de grau externo e / ou diisocianato de difenil metano polimérico (PMDI). Com mais pesquisa e desenvolvimento, este produto tem um enorme potencial, especialmente na China.</p>	

Placa de Aglomerado de Bambu	<p>Placa de Aglomerado de Bambu é um painel composto por partículas moídas e prensado a quente; é produzido com a mesma tecnologia que o painel de partículas de madeira, com uréia formaldeído (UF), melamina-uréia-formaldeído (MUF) ou resinas de PF. A aplicação mais relevante para construção, é como revestimento de piso.</p>	
Placa de Bambu Laminado	<p>A placa de bambu laminado pode ser utilizada para fins estruturais ou arquitetônicos. É composta de uma ou mais camadas de ripas de bambu laminadas e coladas. As lâminas de bambu podem ser dispostas de forma unidirecional ou cruzadas. É comumente chamado de <i>'plywood'</i>, embora seja uma maneira imprecisa, já que as propriedades do material e modo de fabricação são diferentes entre si.</p>	

<p>Bambu Laminado</p>	<p>Bambu laminado é uma secção sólida de ripas fresadas - prensadas a frio ou a quente - dispostas horizontal ou verticalmente. Pode ser re-fresado em peças menores, como tábuas para piso, ou painéis. Ou, coladas em várias camadas, constituindo seções maiores e originando peças estruturais – como da imagem ao lado (Xiao et al. 2008). Também conhecido como: <i>Bamboo Glulam</i>.</p>	
<p>Bambu Densificado</p>	<p>Bambu Densificado [<i>Bamboo Scrimber</i>] refere-se às secções sólidas, de feixes de fibra comprimidos, revestidos de adesivos, que são curados a calor. Estes podem ser re-fresados em pedaços menores; no entanto, o material é muito duro e denso para construção, em geral. Também, conhecido como: <i>Strand Woven Bamboo; Reconstituted Bamboo; Bamboo Restructured Lumber; Parallel Strand Woven Bamboo; Laminated Bamboo Bundle Lumber; Bamboo Steel</i>.</p>	

Tabela 4: Descrição dos produtos de bambu manufaturado. Fonte: Liu et al. (2016) – adaptado pela autora (2021).

2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BAMBU LAMINADO

Tendo como finalidade demonstrar o processamento do bambu, cujo resultado são placas de bambu laminado, a seguir serão apresentadas suas etapas de produção.

As imagens, a seguir, apresentam o processo de produção de uma fábrica de mobiliários, na China⁷.

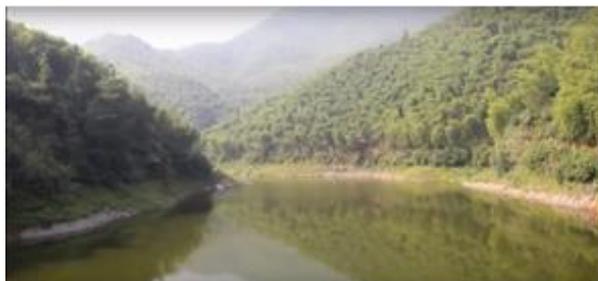


Figura 18: Floresta de bambus, na China. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 19: Floresta de bambu alastrante. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 20: Colmos armazenados para secagem. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora(2021).

Na China, há grandes áreas de florestas de bambu, como pode ser observado na figura 18; a figura 19, apresenta uma floresta de bambu alastrante. A terceira imagem, figura 20, mostra os colmos, recém-colhidos, armazenados para o processo inicial de secagem. Pode-se observar que, nesta etapa, os colmos são cortados com longos comprimentos. Posteriormente, serão cortados em elementos mais curtos.

⁷ *Greenington bamboo furniture (2020)*

As figuras 21 e 22, mostram o processo de corte dos colmos, que são segmentados longitudinalmente, obtendo-se ripas para o processamento. Estas ripas, têm dimensões aproximadas de: 15 a 30 mm de largura, 10 a 30 mm de espessura, 2 a 4 m de comprimento. A figura 23, mostra as ripas prontas para serem utilizadas nas etapas seguintes.



Figura 21: Corte longitudinal dos colmos. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 22: Vista lateral do corte longitudinal dos colmos. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 23: Ripas de bambu. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).

As figuras 24 e 25 mostram o estágio inicial, de aplainamento das ripas: retirada dos fragmentos dos nós e pré-dimensionamento das ripas. Posteriormente, as ripas passam pela fase final de processamento, na plaina de quatro fazes, a fim de que as ripas adquiram espessuras e larguras necessárias à etapa seguinte. A plaina faz o desgaste da casca, miolo e laterais, de modo que as ripas fiquem retilíneas, planas, conforme mostra a figura 26.



Figura 24: Fase inicial de aplainamento das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 25: Aplainamento das ripas de bambu. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 26: Ripas de bambu finalizadas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 27: Feixes de ripas sendo colocados no vaporizador, para tratamento térmico. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 28: Retirada das ripas, do vaporizador, após tratamento térmico. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 29: Ripas acondicionadas no forno - para secagem - após tratamento térmico. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).

As figuras 27 e 28 mostram os feixes de ripas, colocados em vaporizadores de alta pressão⁸, para realização do tratamento térmico, que cozinha os açúcares, produzindo o que a empresa denomina de 'bambu caramelizado'. Posteriormente, após a 'caramelização', os feixes de ripas são transferidos para grandes fornos, para secagem, como mostra a figura 29. O estágio final de aplainamento padroniza o tamanho das ripas antes da classificação [figuras 30 e 31]. As ripas são armazenadas, em feixes, horizontalmente [figura 32] até a etapa seguinte.



Figura 30: Estágio final de aplainamento das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 31: Aplainamento final para padronização dos tamanhos das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).



Figura 32: Armazenamento das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021).

⁸ Diferentemente do processo adotado por esta empresa, há registros de processamento de bambu, cuja etapa de tratamento é anterior à produção das ripas; os tratamentos são realizados nos colmos inteiros; um dos trabalhos que apresenta este processo: (YAMADA, 2016).



Figura 33: Classificação manual das ripas de bambu. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 34: Ripas selecionadas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)

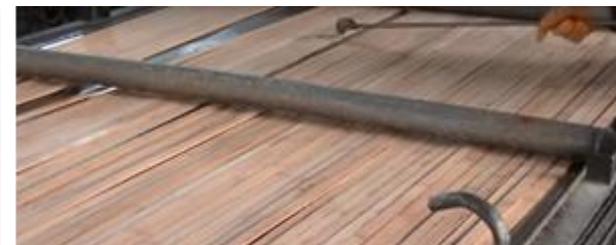


Figura 35: Processo de colagem das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)

As ripas são classificadas, manualmente, de acordo com tonalidade e qualidade [figuras 33 e 34]. Posteriormente, as ripas são dispostas horizontalmente, lado a lado, para a aplicação da cola [figura 35]. A espessura final do painel laminado será definida pela quantidade de camadas, horizontais, de ripas coladas⁹. Portanto, nesta etapa, as ripas são coladas primeiro lateralmente, para originar uma camada e, a seguir, estas camadas são sobrepostas e coladas entre si. Então, o painel – já com a quantidade final de camadas – vai para a prensa. Esta grande prensa hidráulica pode prender e prensar vários painéis de uma vez [figuras 36 e 37]. A figura 38 mostra o painel finalizado.



Figura 36: Processo de prensagem das ripas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 37: Prensa hidráulica. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 38: Placa de bambu laminado. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)

⁹ Alguns produtos laminados utilizam adesivos constituídos por formaldeído, que é um composto orgânico volátil derivado do metanol; e que apresenta grau de toxicidade. No Brasil, há pesquisas investigando adesivos à base de mamona. Para maiores informações, consultar: (CERCHIARI, 2019).



Figura 39: Prensa hidráulica. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 40: Placas de bambu laminado finalizadas. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 41: Detalhe das placas de bambu laminado. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)

A figura 39, mostra o processo de prensagem, para finalização da colagem, na prensa hidráulica, de várias placas simultaneamente. A figura 40 mostra as placas, já prontas, após a prensagem. As dimensões dos painéis são ajustadas de acordo com os projetos dos mobiliários, que requerem modelagem e forma customizadas, como exhibe a figura 41. As placas - de vários tamanhos - são cortadas e armazenadas na fábrica, para serem utilizadas na produção dos mobiliários de bambu laminado, figuras 42 e 43. Para a finalização dos móveis, há várias opções de tonalidades e acabamentos, de acordo com o *stain* aplicado [figura 44].



Figura 42: Corte das placas de bambu laminado. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 43: Armazenagem das placas de bambu laminado. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 44: Aplicação de *stain* nos móveis de bambu laminado. Fonte: *Greenington bamboo furniture (2020)* adaptado pela autora (2021)



Figura 45: Mobiliários de bambu laminado – empresa chinesa. Fonte: : *Greenington bamboo furniture* (2020) adaptado pela autora (2021)



Figura 46: Mobiliários de bambu laminado - empresa japonesa. Fonte: *Take Create Hagi* (2020) adaptado pela autora (2021)

Os mobiliários apresentados, nas imagens ao lado, são produzidos por empresas chinesa e japonesa, respectivamente. Demonstram o quão avançado está o processo de manufatura do bambu, tanto em relação à produção em larga escala, quanto às técnicas de processamento do bambu. São exemplos, também, das possibilidades de aplicação do bambu laminado, possibilitando projetos e formas distintas. A exploração da forma, do *design*, aqui apresentados em mobiliários, podem ser transpostos para a aplicação na arquitetura, por exemplo, na utilização de elementos com dimensões reduzidas, mas que compõem uma estrutura maior, como as estruturas reticuladas objetos de estudo desta pesquisa.

2.5 BAMBU LAMINADO: CARACTERÍSTICAS

O bambu processado resulta em produtos com propriedades mecânicas, físicas e estéticas aprimoradas e / ou padronizadas. Como no caso de outros materiais lignocelulósicos, como madeira, os colmos de bambu - com diâmetros, comprimentos e formas variáveis - podem ser transformados em produtos processados, de bordas retas, e com propriedades previsíveis para aplicações à construção civil (ARCHILA, 2021).

De acordo com Archila (2021), os produtos de bambu processado e os produtos de madeira processados possuem uma capacidade de armazenamento de carbono intrínseca, bem como energia incorporada e emissões de dióxido de carbono potencialmente mais baixas, na manufatura, do que os produtos de construção convencionais, como concreto ou aço.

Por exemplo, a pegada de carbono do concreto e do aço inoxidável (304) é cerca de duas a dez vezes maior do que a de um compensado de bambu laminado ou de um compensado de uso interno. Aparentemente, a energia incorporada para produzir um quilograma (kg) de aço inoxidável é quase quatro vezes maior do que para produzir um quilograma de compensado de madeira ou compensado de bambu; isto é 56,70 MJ / kg para o primeiro e 15 MJ / kg e 15,5 para o bambu laminado.

A tabela 5 ilustra a capacidade da placa de bambu laminado de armazenar mais dióxido de carbono (CO²) do que os colmos de bambu *in natura*. Há mais armazenamento equivalente de CO², nos produtos processados de bambu, se comparado às florestas de bambu, devido ao maior uso de material - por peso seco - para a fabricação destes produtos (AMPHIBIA, 2021)¹⁰.

¹⁰ Para maiores informações, consultar: www.amphibiagroup.com

MATERIAL / PRODUTO		PESO SECO [Kg]	BIOMASSA EQUIVALENTE peso seco [Kg]	CARBONO EQUIVALENTE [Kg]	CO ² EQUIVALENTE ARMAZENADO NA FLORESTA [Kg]
European Softwood ¹¹		1.0	1.25	0.62	2.30
Colmo de bambu		1.0	3.10	1.65	5.69
Placa de bambu laminado		1.0	7.05	3.52	12.85
Placa de bambu densificado ¹²		1.0	5.70	2.85	10.50

Tabela 5: Equivalente de seqüestro de CO² nas florestas de madeira e bambu; e para produtos à base de bambu. Fonte: (ARCHILA, 2021) adaptado pela autora (2021)

¹¹ *European Softwood*, são madeiras macias provenientes de florestas de coníferas perenes

¹² *Scrimber*

2.6 BAMBU LAMINADO: PROPRIEDADES MECÂNICAS

O bambu é um material anisotrópico, cujas propriedades mecânicas variam de acordo com as direções: longitudinal, radial e transversal. A resistência do bambu é encontrada na direção longitudinal através das fibras, compostas por uma matriz de lignina, o que o torna forte em tensão e compressão; mas, mais fraco transversalmente à direção da fibra (SHARMA *et al.*, 2015).

A densidade da fibra aumenta da parede interna do colmo do bambu para a parede externa, portanto, o bambu é um material com maior resistência e rigidez na direção axial do que nas direções transversais (Xiao *et al.*, 2017). O fendilhamento¹³ do colmo do bambu é muito fácil de ocorrer, por suas características anisotrópicas e propriedades fracas perpendiculares às fibras.

¹³ Ruptura no sentido longitudinal do colmo. Termo adotado pelo Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo.

O bambu laminado¹⁴ começou a ser produzido na China, na década de 1970 (CHEN *et al.*, 2020). Durante as etapas de fabricação do bambu processado, há a homogeneização das características físicas do bambu, potencializando suas propriedades mecânicas, tornando-o um promissor substituto à madeira nas construções. Na China há exemplos de construções que utilizam bambu processado como elemento construtivo principal, inclusive estrutural, como é o caso desta edificação de três pavimentos, construída em 2017, Nanjing Forestry University, conforme figura 47.



Figura 47:
Construção de
bamboo laminado:
Nanjing Forestry
University
Fonte: Chen *et al.*
(2020)

¹⁴ LBL = *laminated bamboo lumber*

Após seu processamento, o bambu laminado mantém tanto as fibras longitudinais quanto uma parte da matriz original do colmo. Neste processo, o colmo de bambu é dividido, aplainado, processado (branqueado ou caramelizado), laminado e prensado para formar a placa de bambu laminado, como produto. Os produtos finais usam apenas cerca de 30% da entrada de matéria-prima devido a grandes perdas de material quando as ripas são aplainadas para formar a secção retangular. Mantendo a resistência inerente do bambu, devido à orientação longitudinal das fibras, o produto processado cria uma secção uniforme que favorece conexões e juntas em aplicações estruturais (SHARMA et al., 2015).

A seguir serão apresentados – na tabela 6 – os resultados de ensaios de laboratório comparando as características do bambu laminado – objeto de estudo do artigo em referência – com o bambu *in natura*, madeira *in natura*, bambu densificado e madeira laminada colada. De acordo com

¹⁵ As terminologias equivalentes da indústria para as orientações radial horizontal e radial vertical são: *edgewise* e *flatwise* respectivamente.

Sharma *et al.* (2015), foram confeccionados dois tipos de peças de bambu laminado, com as seguintes dimensões: 2440 x 1220 x 19 mm. Os dois modelos distinguem-se pela variação da orientação das fibras: radial horizontal e radial vertical¹⁵, conforme demonstram a figura 48.



Figura 48: Peças de bambu laminado: orientação das fibras radial horizontal e radial vertical. Fonte: SHARMA *et al.* (2015) - adaptado pela autora (2021).

Neste estudo, as peças de bambu laminado foram constituídas a partir de ripas da espécie *Phyllostachys pubescens*, utilizando-se adesivo de poliuretano (Purbond HB

S309). O adesivo foi aplicado manualmente com uma proporção de aproximadamente 180 g / m² (produto final) e as lâminas foram prensadas - com pinças manuais - aplicando-se a pressão necessária de 0,6 MPa por 4 horas. O bambu laminado tem uma densidade média de 686 kg / m³ com um teor de umidade de 6%. Todas as amostras foram condicionadas a uma temperatura constante de 23°C e uma umidade relativa de 55% por duas semanas antes dos testes. Os métodos para os ensaios foram pautados nas diretrizes estabelecidas pelas normas de madeira da ASTM e BS EN.

Comparando-se o bambu laminado [LBL] e o bambu densificado [*scrimber*] – que são basicamente resultados distintos de métodos de processamento do bambu *in natura* – percebe-se que o laminado de bambu é 30% menos denso do que o bambu densificado, conforme demonstrado na tabela 6. Os ensaios de compressão paralela às fibras, do bambu laminado, demonstraram suportar tensões de 77Mpa. Nos

ensaios de flexão, possui módulo de ruptura de 78-83MPa e módulo de elasticidade de 11-13GPa. A resistência do material, paralela às fibras, é utilizada pela sua superioridade sobre a orientação perpendicular.

A excelência das propriedades do bambu laminado se reflete em sua resistência à flexão. O bambu tem alto módulo de elasticidade em comparação com a madeira de conífera; esta é a medida da rigidez do membro sob carga. O bambu laminado, também, possui alto valor atribuído à tensão de ruptura ao cisalhamento. Isso mostra a elasticidade máxima que os membros podem ter em cisalhamento. Em outras palavras, as propriedades do bambu podem fazer com que ele se curve mais ao receber altas cargas (ELNAGAR, 2017).

Conforme mostrado na tabela 6, os valores atribuídos ao bambu laminado demonstram que suas propriedades mecânicas referentes à compressão, tração e cisalhamento apresentam melhor desempenho se comparado aos valores conferidos à madeira estrutural e à madeira laminada colada.

MATERIAL	DENSIDADE	COMPRESSÃO		TRAÇÃO		CISALHAMENTO	FLEXÃO	
	Kg/m ³	Tensão paralela às fibras MPa	Tensão perpendicular às fibras MPa	Tensão paralela às fibras MPa	Tensão perpendicular às fibras MPa	Tensão paralela às fibras MPa	Módulo de ruptura_MOR MPa	Módulo de elasticidade_MOE GPa
COLMO DE BAMBU [a]	666	53	-	153	-	16	135	9
BAMBU LAMINADO [b]	686	77	22	90	2	16	77-83	11-13
BAMBU DENSIFICADO [c]	1163	86	37	120	3	15	119	13
MADEIRA DE CONÍFERA [d]	383	36	-	59	-	9	67	8
MADEIRA LAMINADA COLADA [e]	520	57	-	49	-	11	68	13

Tabela 6: Propriedades materiais do bambu *in natura*, bambu laminado, bambu densificado e madeira de conífera. Fonte: (SHARMA *et al.*, 2015) – adaptado pela autora (2021).

[a] *Phyllostachys pubescens* – Ghavami; Marinho (2001) / de Vos (2010)

[b] *Laminated bamboo* - LBL [*Phyllostachys pubescens*] – Sharma *et al.* (2015)

[c] *Bamboo scrimber* [*Phyllostachys pubescens*] - Sharma *et al.* (2015)

[d] *Sitka spruce* - Lavers (2002) / Kretschmann (2010)

[e] LVL -Laminated Veneer Lumber [*Douglas-fir*] - Kretschmann *et al.* (1993) / Clouston *et al.* (1998)

De acordo com Sharma *et al.* (2015), a pesquisa indica que o bambu densificado [*scrimber*] e o bambu laminado são comparáveis à madeira estrutural e à madeiral laminada colada, em flexão e rigidez, mas significativamente mais fortes em tração e compressão. Embora a comparação com a madeira pareça ser direta, o uso de produtos de bambu processado - para aplicações estruturais - requer investigação adicional para compreender as propriedades mecânicas básicas do material e a melhor maneira de utilizar essas propriedades.

As pesquisas demonstram que as propriedades mecânicas dos materiais de bambu processado variam de acordo com a espécie de bambu utilizada, com o tipo de adesivo adotado e o método de processamento empregado para a confecção do produto. Estes valores podem ser observados na tabela 7 que apresenta, de forma comparativa, os resultados obtidos em estudos oriundos de diferentes pesquisadores.

BAMBU LAMINADO

PESQUISA	ESPÉCIE	NORMAS / TESTES	TIPO DE ADESIVO	MÉTODO / LAMINADO	TAXA DE COLA g/m ²	UMIDADE INICIAL %	DENSIDADE Kg/m ³	COMPRESSÃO paralela às fibras MPa	TRAÇÃO paralela às fibras MPa	CISALHAMENTO paralelo às fibras MPa	FLEXÃO Módulo de ruptura_MOR MPa	FLEXÃO Módulo de elasticidade_MOE GPa
Lee <i>et al.</i> (1998)	<i>Phyllostachis pubescens</i>	ASTM D5456-94, D198-94	Resorcinol [R]	Pressão hidráulica	220 – 420	10–15	620–660	-	-	-	71–86	8
Bansal; Prasad (2004)	<i>Bambusa bambos</i>	BIS 1708-1986	Uréia-formaldeído [UF] / Melamina - uréia-formaldeído [MUF] / Fenol-formaldeído [PF]	Pressão hidráulica quente	-	8-10	728–796	-	-	-	123–145	12-17
López; Correal (2009)	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	ICONTEC 775, 784, 785, 663	Acetato de polivinila [PVA]	Pressão hidráulica fria	-	12	715	48	132	9	82	17
Sulastiningsi; Nurwati (2009)	<i>Gigantochloa apus</i>	ASTM D1037-93, JS-2003	Tanino - resorcinol - formaldeído [TRF]	Prensado a frio / Preso com gancho	170	12	710-750	49-56	-	-	39-95	7-10
Pereira; Faria (2009)	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	NBR 7190-97	Acetato de polivinila [PVA]	-	-	-	-	66	144	-	99	14
Correal <i>et al.</i> (2010)	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	ASTM D143-94	Fenol-resorcinol - formaldeído [PRF] / Melamina-uréia-formaldeído [MUF]	Prensado a quente	260-450	-	730	60	95	9	111	-

Mahdavi <i>et al.</i> (2012)	<i>Phyllostachis pubescens</i>	ASTM D143	Fenol-resorcinol - formaldeído [PRF]	Pressão mecânica	-	16	510	-	-	-	77	9
Xiao <i>et al.</i> (2013)	<i>Phyllostachis pubescens</i>	ASTM D143-94	Fenol-formaldeído [PF]	Pressão hidráulica quente	-	15	800-980	51	82	7	99	9
Sinha <i>et al.</i> (2014)	-	ASTM D198, D905, D143	Fenol-resorcinol - formaldeído [PRF]	Pressão com gancho	-	-	-	9-10	-	16	42-70	22-23
Sharma <i>et al.</i> (2015)	<i>Phyllostachis pubescens</i>	ASTM D143 BS 373 BS EN 408	Adesivo de poliuretano (Purbond HB S309)	Pressão com gancho	180	6	686	77	90	16	77-83	11-13
Chen <i>et al.</i> (2020)	<i>Phyllostachis pubescens</i>	ASTM D143-14, D 4442-16	Fenol-formaldeído [PF]	Pressão hidráulica quente	-	8	-	56	107	17	111	9
PESQUISA	ESPÉCIE	NORMAS / TESTES	TIPO DE ADESIVO	MÉTODO / LAMINADO	TAXA DE COLA g/m²	UMIDADE INICIAL %	DENSIDADE Kg/m³	COMPRESSÃO paralela às fibras MPa	TRAÇÃO paralela às fibras MPa	CISLHAMENTO paralelo às fibras MPa	FLEXÃO Módulo de ruptura_ MOR MPa	FLEXÃO Módulo de elasticidade _MOE GPa

Tabela 7: Propriedades do bambu laminado. Fonte: (SHARMA *et al.*, 2015) (CHEN *et al.*, 2020) (MINKE, 2012) (SHARMA *et al.*, 2014) – adaptado pela autora (2021).

2.7 COMPROVAÇÃO DA VIABILIDADE DO BAMBU LAMINADO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

Segundo Elnagar (2017), pode-se constatar que a utilização do bambu laminado para construção de estruturas reticuladas, além de sustentável, é altamente eficiente. O bambu laminado pode substituir a madeira em termos de geometria e estética. Inclusive, com relação às propriedades mecânicas, o bambu laminado supera a madeira devido à sua excelente resistência à flexão. O processamento do bambu – em placas de laminado - possibilita que os produtos tenham padronização, atendendo à prática da indústria por seções standardizadas. Isso também mitiga os problemas de variação dos nós, dimensionamento e espaçamento dos colmos de bambu. Também aumenta a resistência à flambagem, em relação à forma tubular, do colmo de bambu, pois a espessura das paredes é substituída por uma seção sólida. Mais importante, entretanto, é o fato de o bambu laminado

aumentar a resistência do material, em relação ao colmo, devido à mudança na geometria, além da sobreposição de camadas de bambu e presença do adesivo. Sendo assim, reduzirá ou mitigará o cisalhamento dos elementos quando vinculados às conexões. As propriedades materiais do bambu laminado são exatamente o que é necessário para a aplicação de estruturas reticuladas [*gridshells*]. Quando usa-se a técnica de construção – tensionada - de uma estrutura reticulada, os membros devem ter flexibilidade adequada para permitir a dobra na forma final. No entanto, a forma final também deve ter força adequada para resistir às cargas. Este compromisso pode ser melhor alcançado usando bambu laminado devido à alta flexão do material, bem como capacidade de compressão e carregamento de tensão.

O uso de bambu laminado resultará em uma estrutura mais forte e menos rígida. Além disso, as propriedades mecânicas do bambu resultarão em estruturas mais leves, que são construídas utilizando-se menor quantidade materiais; portanto, menos emissão de CO² e menor custo.

2.8 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO ESCOLHIDO

Pensando-se na viabilidade de execução de uma estrutura reticulada de bambu laminado, pesquisou-se empresas que comercializam produtos de bambu processado.

A empresa Mosô¹⁶ dispõe de vários tipos de produtos de bambu processado. Dentre eles, escolheu-se o 'painel sólido de bambu laminado 38mm' [destacado em verde na figura 49], para o exercício projetual da construção representativa de uma estrutura reticulada - abordada no capítulo 6 – adotando-se suas características físicas como parâmetros para o desenvolvimento das peças constituintes da estrutura.

Desta forma, o exercício demonstra a real possibilidade de utilização de um produto de bambu processado - disponível no mercado - para a utilização na construção civil, inclusive valendo-se da fabricação digital para execução das peças constituintes do projeto. Validando a proposição de

disseminação do emprego do bambu na arquitetura contemporânea, até mesmo, nos centros urbanos.



Figura 49: Produtos de bambu processado. Fonte: (Moso, 2021) adaptado pela autora (2021).

¹⁶ Para maiores informações, consultar: www.moso.eu

Entretanto, devido à ausência de algumas informações – referentes às propriedades mecânicas do material – necessárias para os cálculos e análises elaborados no *software Karamba 3D*, adotou-se valores designados em ensaios de laboratório, realizados pela prof. Bhavna Sharma e demonstrados em suas publicações. No referido capítulo 6, estas informações estão detalhadas.

A seguir, informações, fornecidas pela empresa, referentes às características técnicas e certificações:

Painel sólido de bambu laminado [BP-DT5050]

- Dimensões: 2440 x 1220 mm_ 5 camadas: 3 mm-6mm-20mm-6mm-3mm_direção das fibras cruzadas em cada camada
- Espécie: *Phyllostachys edulis*
- Densidade (camada superior): +/- 1050 kg / m³
- Camada superior / camada de uso: 3-4 mm
- Dureza - Brinell: $\geq 9,5$ kg / mm² (EN 1534)
- Reação ao fogo: Classe D-s1-d0 (EN 13501-1)
- Emissão de formaldeído: Classe E1 (<0,124 mg / m³, EN 717-1) / Classe E0 (<0,025 mg / m³)
- Módulo de elasticidade: 4318 N / mm² (38 mm) (valor médio - EN 789)
- Adesivo: D3 resistente à água
- CO² neutro: relatório LCA TU Delft (ISO 14040/44)
- Declaração Ambiental do Produto - EPD (EN 15804)
- FSC®: produto certificado
- Contribuição LEED BD + C - v4: MR 1, MR 2, MR 3 (FSC®), EQ 2 v2009: MR 6, MR 7 (FSC®), IEQ 4.4 (se solicitado como E0)
- Contribuição BREEAM: HEA 2, MAT 1, MAT 3 (FSC®), MAT 5 (DT)

2.9 NORMAS TÉCNICAS

Alguns países possuem normas técnicas específicas para construção civil, utilizando o bambu como elemento estrutural, na forma *in natura* – colmos. Paulatinamente, as normas estão sendo atualizadas e incorporando produtos de bambu processado, como o bambu laminado [cuja sigla é LVB] e o bambu densificado [scrimber].

PÁIS	NORMAS TÉCNICAS_CONSTRUÇÃO_BAMBU [COLMOS]	ANO
COLÔMBIA	REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10	2010
PERU	REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES: NORMA NTE E.100	2012
EQUADOR	NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN: NEC - ESTRUCTURAS DE GUADÚA (GAK)	2017
BRASIL	ABNT NBR 16828-1_ESTRUTURAS DE BAMBU PARTE 1: PROJETO	2020

Tabela 8: Normas técnicas para construção com colmos de bambu. Fonte: (MARÇAL, 2018), (ABNT, 2021), adaptado pela autora (2021).

PÁIS	NORMAS TÉCNICAS_ENSAIOS LABORATORIAIS_BAMBU [COLMOS]	ANO
ÍNDIA	BUREAU OF INDIAN STANDARDS: IS 6874	2008
BRASIL	ABNT NBR 16828-2_ESTRUTURAS DE BAMBU PARTE 2: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO BAMBU	2020

Tabela 9: Normas técnicas para ensaios de laboratório com colmos de bambu. Fonte: (MARÇAL, 2018), (ABNT, 2021), adaptado pela autora (2021).

PAÍS	NORMAS TÉCNICAS _BAMBU PROCESSADO	ANO
ESTADOS UNIDOS	ASTM D5764_DOWEL CONNECTION TESTS FOR LAMINATED VENEER BAMBOO (LVB)	2019
ESTADOS UNIDOS	ASTM D9-2_STANDARD TERMINOLOGY RELATING TO WOOD AND WOOD-BASED PRODUCTS	2020
ESTADOS UNIDOS	ASTM D5456-21_STANDARD SPECIFICATION FOR EVALUATION OF STRUCTURAL COMPOSITE LUMBER PRODUCTS	2021

Tabela 10: Normas técnicas que contemplam bambu processado. Fonte: (ASTM, 2021) adaptado pela autora (2021).

Há, também, algumas normas estabelecidas pela Organização Internacional de Normalização – ISO¹⁷:

ISO	NORMAS TÉCNICAS _BAMBU [COLMOS]	ANO
ISO/TR 22157-2	BAMBOO - DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES - PART 2: LABORATORY MANUAL	2017
ISO 19624	BAMBOO STRUCTURES - GRADING OF BAMBOO CULMS - BASIC PRINCIPLES AND PROCEDURES	2018
ISO 22157	BAMBOO STRUCTURES - DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO CULMS - TEST METHODS	2019
ISO 22156	BAMBOO STRUCTURES - BAMBOO CULMS - STRUCTURAL DESIGN	2021

Tabela 11: Normas técnicas – ISO - colmos de bambu. Fonte: (ISO, 2021) adaptado pela autora (2021).

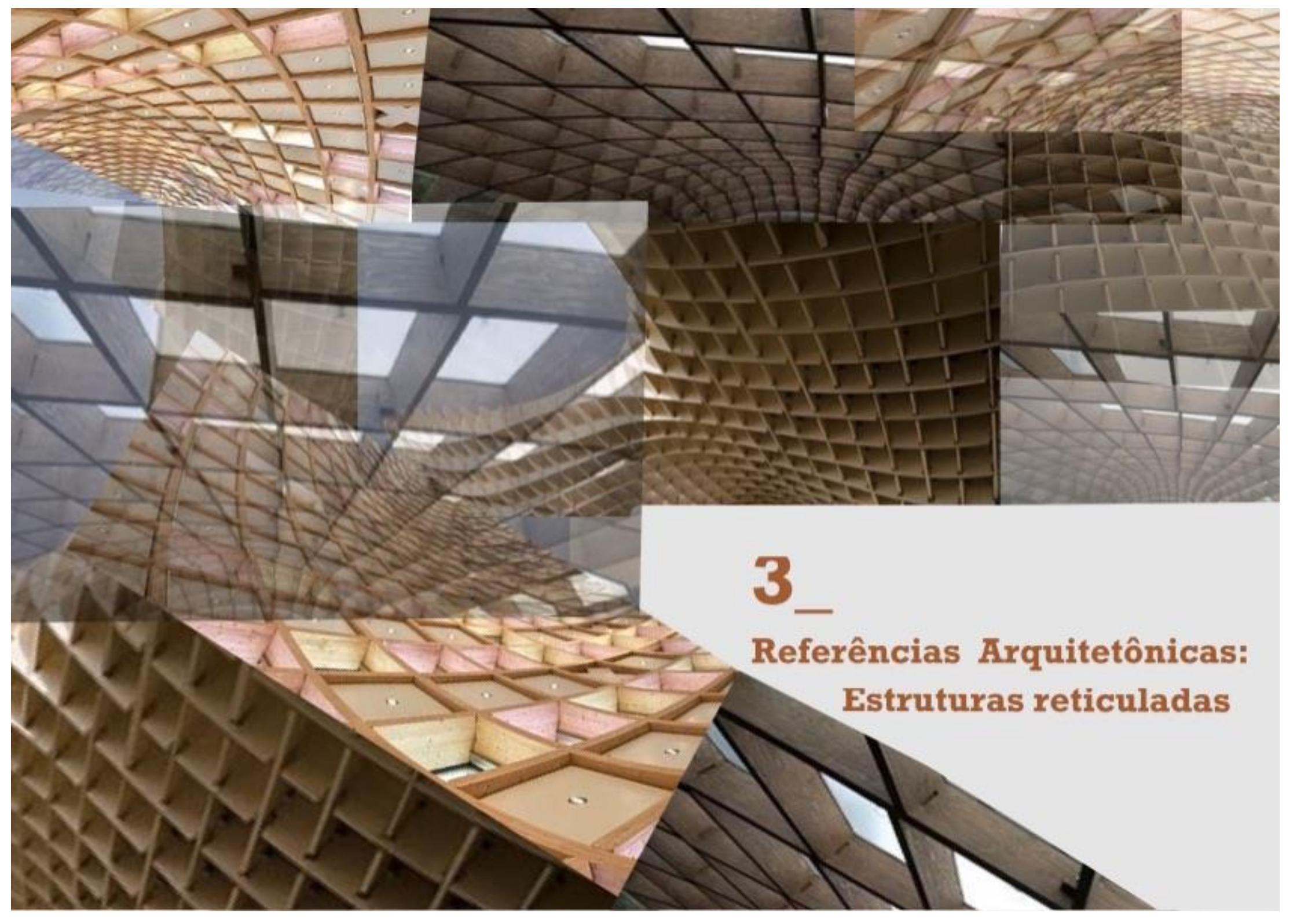
ISO	NORMAS TÉCNICAS _BAMBU PROCESSADO	ANO
ISO 38200	CHAIN OF CUSTODY OF WOOD AND WOOD-BASED PRODUCTS	2018
ISO 21625	VOCABULARY RELATED TO BAMBOO AND BAMBOO PRODUCTS	2020

Tabela 12: Normas técnicas – ISO - bambu processado. Fonte: (ISO, 2021) adaptado pela autora (2021).

¹⁷ ISO = *International Organization for Standardization*

A atualização da norma americana ASTM D5456, em junho de 2021, bem como, as atualizações de algumas ISO - incluindo bambu laminado (LVB)¹⁸ - são um indicativo da importância e relevância do tema. A implementação da utilização do bambu laminado, na construção civil, será diretamente influenciada pela existência de normatizações que validem seu emprego como elemento construtivo estrutural. É fundamental que haja padronização dos tipos de ensaios a serem realizados em laboratório, metodologia adotada para os testes e, também, padronização da forma de apresentação dos resultados obtidos, considerando simbologias e unidades de medidas. Assim como as normas são importantes para validar os ensaios de laboratório, são indispensáveis para estabelecer padrões de utilização das peças – de bambu processado - e suas possibilidades de encaixes, ligações e conexões. As características mecânicas destes materiais variam de acordo com a espécie, tipo de adesivo, método de processamento, dentre outros fatores. Portanto, é necessário que haja uma padronização, também, acerca das fórmulas a serem empregadas – para as análises e simulações paramétricas.

¹⁸ LVB = *laminated veneer bamboo*



3—

**Referências Arquitetônicas:
Estruturas reticuladas**

3_REFERÊNCIAS ARQUITETÔNICAS: ESTRUTURAS RETICULADAS

O presente capítulo apresenta três projetos arquitetônicos – referências - tratando-se de estruturas reticuladas. São exemplos significativos, de arquiteturas contemporâneas, que elegeram a madeira como elemento construtivo estrutural.

- Serpentine Gallery Pavilion [2005]_Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura e Cecil Balmond
- Metropol Parasol [2011]_Jürgen Mayer H. Architects
- Swatch Omega [2019]_Shigeru Ban Architects



Figura 50: Serpentine Gallery Pavilion. Fonte: Serpentine Galleries (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 51: Metropol Parasol. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 52: Swatch Omega. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).

3.1 Serpentine Gallery Pavilion_[2005]_Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura e Cecil Balmond



Figura 53: Vista externa do Serpentine Pavilion. Fonte: Standart (2019) adaptado pela autora (2021).

As 'Serpentine Galleries' são galerias de arte contemporânea situadas em Londres. Há vinte anos, instituíram um interessante programa voltado à valorização e divulgação da arquitetura contemporânea.

A cada ano, um arquiteto ou escritório de arquitetura, que ainda não tenha nenhuma obra construída no Reino Unido, é convidado para projetar um pavilhão temporário nos jardins das galerias. O convite consiste num instigante desafio, já que todas as etapas de projeto e execução devem ocorrer em apenas seis meses. O pavilhão fica em exposição, durante o verão¹⁹.

O caráter transitório do pavilhão e a flexibilidade do programa, propiciam investigações arquitetônicas, tanto em relação à tectônica, quanto à semântica.

As obras apresentadas suscitam às reflexões acerca de temas tão essenciais à arquitetura, como a relação entre espaço construído e vazios; integração interior e exterior;

permeabilidade entre espaços públicos e privados; interpretações distintas de programas semelhantes; sensações despertadas nos usuários; materiais e técnicas construtivas; ferramentas e tecnologias digitais; dentre tantos outros intrínsecos a estes ou desdobramentos destes.

O caráter experimental destes pavilhões tem trazido contribuições significativas para discussões não apenas referentes à arquitetura contemporânea, e suas aplicações atuais, mas – principalmente – sobre as proposições futuras para a arquitetura.

A busca por respostas às novas necessidades e anseios da sociedade contemporânea; a emergência em relação à sustentabilidade; as novas possibilidades que as ferramentas digitais e a robótica propiciam para o pensar e fazer arquitetônico; dentre tantos outros temas significativos.

Nesta toada, de suscitar reflexões e apontar possíveis caminhos, Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura, com a

¹⁹ Para maiores informações, sobre os demais pavilhões, consultar: <https://www.serpentinegalleries.org/support/private-hire/serpentine-pavilion/>

colaboração de Cecil Balmond, projetam um pavilhão em laminado de madeira, cuja concepção fora amparada por *softwares* de desenho paramétrico.

Sutileza no desenho, leveza da forma, precisão técnica dos encaixes, são alguns dos atributos deste pavilhão, que o qualificam como uma significativa obra arquitetônica.

(...) The Serpentine Gallery Pavilion was a remarkable work where tradition was ingeniously combined with the use of advanced technologies. Besides the success of learning the process for robotic production of variable wooden components, this experiment also demonstrated the possibility of colapsing in a single geographic location

²⁰ O Pavilhão da Serpentine Gallery foi uma obra notável onde a tradição foi engenhosamente combinada com o uso de tecnologias avançadas. Além do sucesso no aprendizado do processo de produção robótica de componentes variáveis de madeira, este experimento também demonstrou a possibilidade de reunir em uma única localização geográfica as fases de projeto, engenharia e fabricação que ocorreram separadamente há mais de 10 anos (tradução nossa).

the design, engineering and fabrication phases that occurred separately more than 10 years ago²⁰ (SOUSA, 2015 p. 94)²¹.

Trata-se de uma estrutura, composta por peças de laminado de madeira²², cujas uniões dão-se por meio de encaixes não ortogonais.

E, embora o sistema de encaixe escolhido seja adotado em todas peças, o desenho de cada peça é único; pois há variações nos ângulos de encaixes entre elas.

A implementação desta solução foi facilitada pelo uso de *softwares* de desenho paramétrico, que possibilitam ajustar os desenhos das peças considerando-se a forma da estrutura como um todo.

²¹ SOUSA, José Pedro. **FCT Research Project: Robotic Technologies for Non-Standard Design and Construction in Architecture**. Porto: DFL - FAUP, 2015.

²² 'Kerto' é um produto, desenvolvido pela empresa Metsä Wood (2020), constituído de madeira folheada laminada (LVL, do inglês *laminated veneer lumber*). Neste projeto, utilizou-se o 'Kerto LVL-S beam', com propriedades adequadas às composições estruturais, tendo bom desempenho técnico e facilidade de uso.

Assim como valeram-se das ferramentas e tecnologias digitais para concepção e desenvolvimento do projeto arquitetônico e estrutural, foram utilizadas máquinas CNC para a realização dos cortes das peças de madeira.

Um outro aspecto fundamental, é a possibilidade deste pavilhão ser desmontado e, novamente, montado facilmente. Esta característica suscita à novas investigações arquitetônicas, que poderão valer-se deste recurso como resposta às demandas de caráter emergencial, temporário, por exemplo.

E, fazendo uma transposição, além da função, seria possível propor a substituição da madeira laminada, pelo bambu laminado.

A estrutura é composta por 427 peças – com dimensões distintas – conectadas umas às outras, pela união denominada '*Mortise and Tenon*²³'. A curvatura do pavilhão é definida pela inclinação e corte de cada peça; por isso, foi necessária a utilização de um braço robótico [KUKA], com seis eixos, já que

somente a fresa poderia cortar os diferentes ângulos e inclinações dos encaixes, conforme demonstra a figura 54. A estrutura vence um vão de 17 metros (ALMEIDA, 2005).

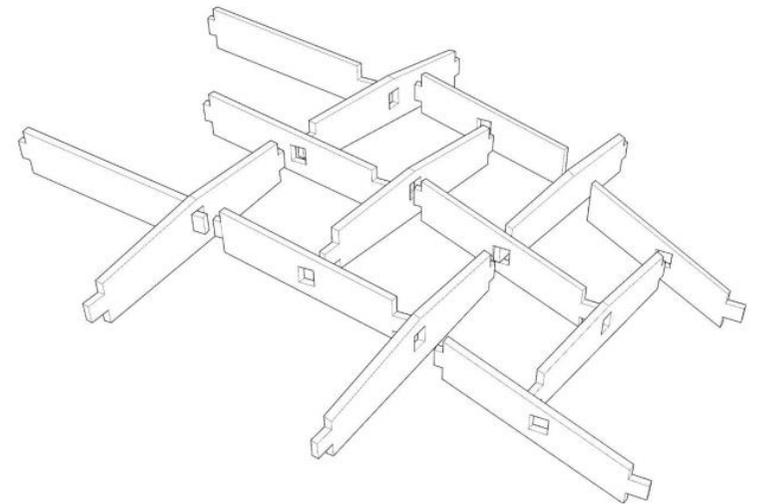


Figura 54: Detalhe dos encaixes entre as peças do pavilhão.
Fonte: Almeida (2005) adaptado pela autora (2021).

²³ Numa tradução livre: encaixe e cavilha

Estes croquis, desenvolvidos durante a fase de concepção do projeto, demonstram claramente a integração da dupla de arquitetos, com o engenheiro. As contribuições foram mútuas e propiciaram a evolução do projeto. A premissa de implantação, considerou a relação com a edificação [a galeria] e a vegetação existente. Nota-se, nas figuras 55 e 56, que ambos os croquis – de implantação e perspectiva externa – salientam a importância da árvore e a utilizam como referência para a proposição projetual. A figura 57, apresenta os croquis de estudo da configuração estrutural do pavilhão.

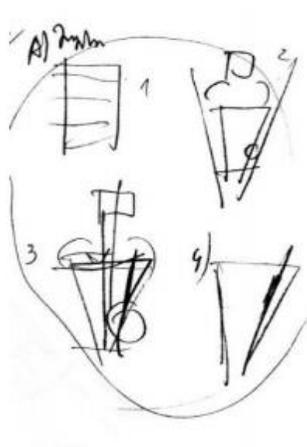


Figura 55: Croquis da implantação e evolução do pavilhão, de Souto de Moura. Fonte: Almeida (2005) adaptado pela autora (2021).

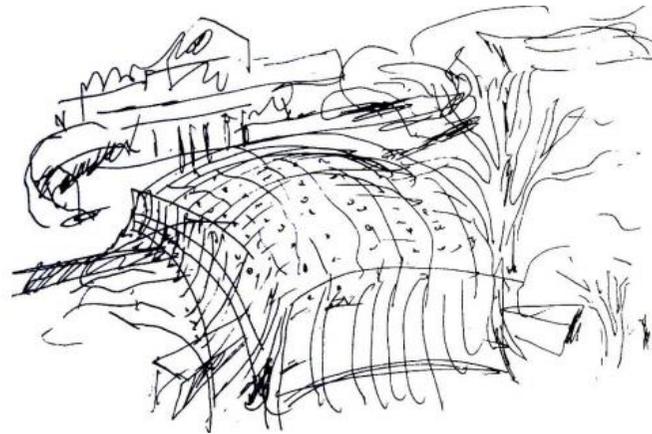


Figura 56: Croquis da perspectiva externa do pavilhão, de Siza. Fonte: Almeida (2005) adaptado pela autora (2021).

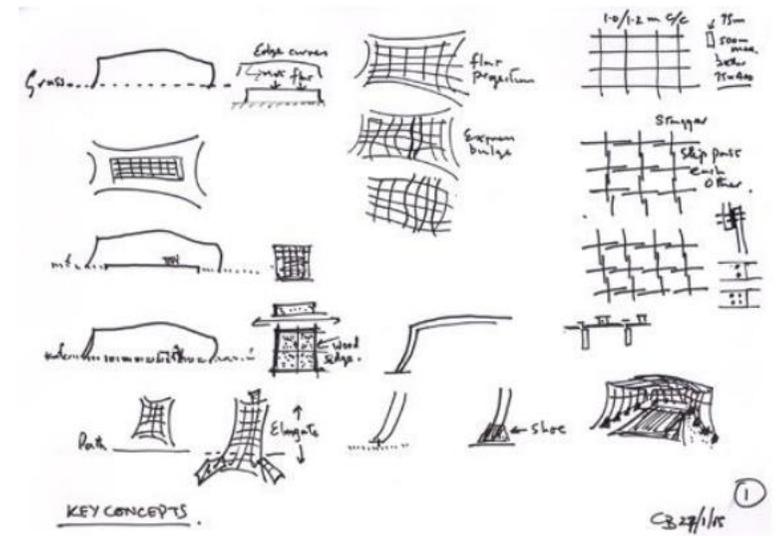


Figura 57: Croquis de estudos dos conceitos do pavilhão, de Baldmond. Fonte: Almeida (2005) adaptado pela autora (2021).

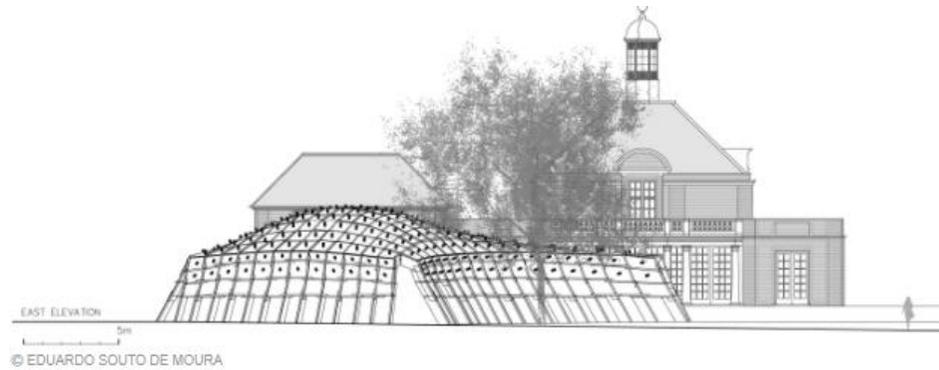


Figura 58: Elevação leste. Fonte: DIVISARE (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 59: Plantas: pavilhão e edificação existente. Fonte: Divisare (2019) adaptado pela autora (2021).

Inicialmente, Siza e Souto de Moura, pensaram em uma estrutura de grelha regular; foi contribuição de Cecil Balmond, a proposta de uma estrutura em '*Lamella*', onde cada peça tem uma dimensão distinta e são posicionadas alternadamente.

Também fora sugestão de Cecil Balmond a distorção da malha, ocasionando a sutil curvatura da estrutura. (ALMEIDA, 2005).

A figura 58 apresenta a elevação leste do pavilhão, com a edificação existente ao fundo e a árvore, em primeiro plano.

A figura 59, traz as plantas baixas, do térreo da galeria e do pavilhão, mostrando a relação entre edificação e vegetação existentes, e o pavilhão proposto; como se dá a implantação no lote.



Figura 60: Pavilhão Serpentine - vista externa. Fonte: Afaconsult (2019) adaptado pela autora (2021).



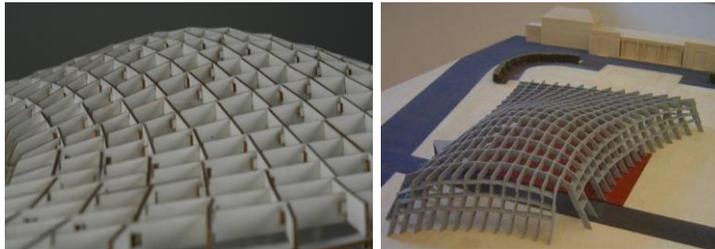
Figura 61: Pavilhão Serpentine - vista externa. Fonte: Afaconsult (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 62: Pavilhão Serpentine - vista externa. Fonte: Afaconsult (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 63: Pavilhão Serpentine - vista interna. Fonte: Afaconsult (2019) adaptado pela autora (2021).



Figuras 64 e 65: Modelos físicos de estudo do pavilhão. Fonte: Projeto paramétrico (2020) adaptado pela autora (2021).

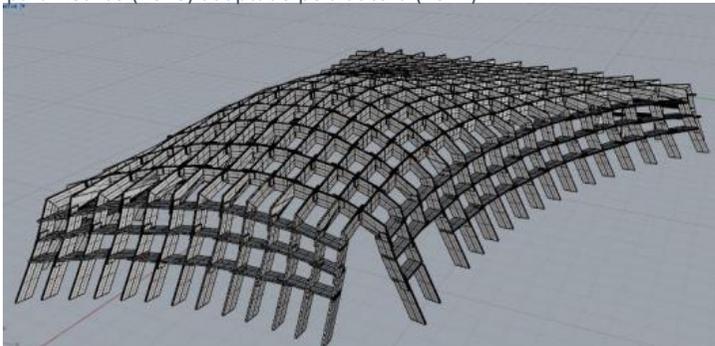


Figura 66: Modelagem 3D no *Rhinceros*. Fonte: Almeida (2015) adaptado pela autora (2021).

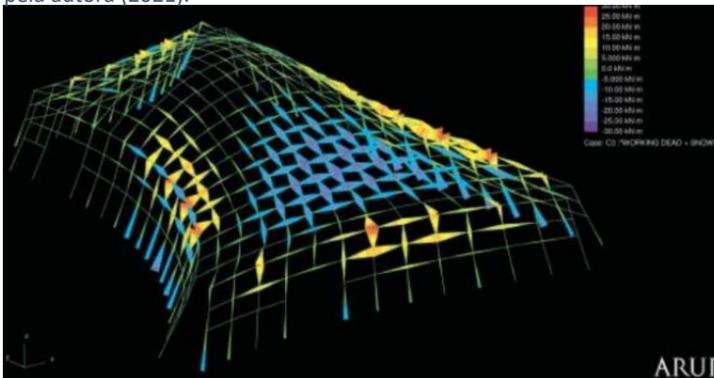


Figura 67: Análise estrutural no *software Oasys*. Fonte: Almeida (2015) adaptado pela autora (2021).

Durante a etapa de concepção do projeto, foram realizados modelos físicos, tanto para estudos, como mostra a figura 64, quanto para apresentação ao cliente, figura 65. O primeiro investiga os encontros e encaixes entre as peças; já o segundo, possibilita analisar a configuração da estrutura como um todo; este modelo é resultado de uma impressão 3D.

O pavilhão foi modelado, tridimensionalmente, no *software Rhinceros*, conforme demonstra a figura 66. Foram realizadas análises estruturais, pelo escritório ARUP, de Balmond, para verificação das cargas e esforços e comportamento da estrutura; utilizou-se o *software Oasys*, como pode ser verificado na figura 67. (ALMEIDA, 2005).

As imagens abaixo retratam dois momentos, distantes no tempo, mas que sintetizam a atmosfera do lugar. O *croquis*, desenhado na fase inicial, de concepção do projeto, já apresenta as principais características e propostas, dos arquitetos, para a criação deste espaço. A fotografia, da obra construída, reforça que a intenção inicial do projeto – esboçada no traço do arquiteto – foi alcançada. Mesmo tendo a participação de equipes distintas, nas fases de desenvolvimento e execução da obra; e, mesmo tendo sido um projeto que fora totalmente desenvolvido amparado pelas ferramentas digitais; a intenção, o olhar, o gesto dos arquitetos [e, neste caso, também do engenheiro] foram cruciais para a qualidade do projeto.

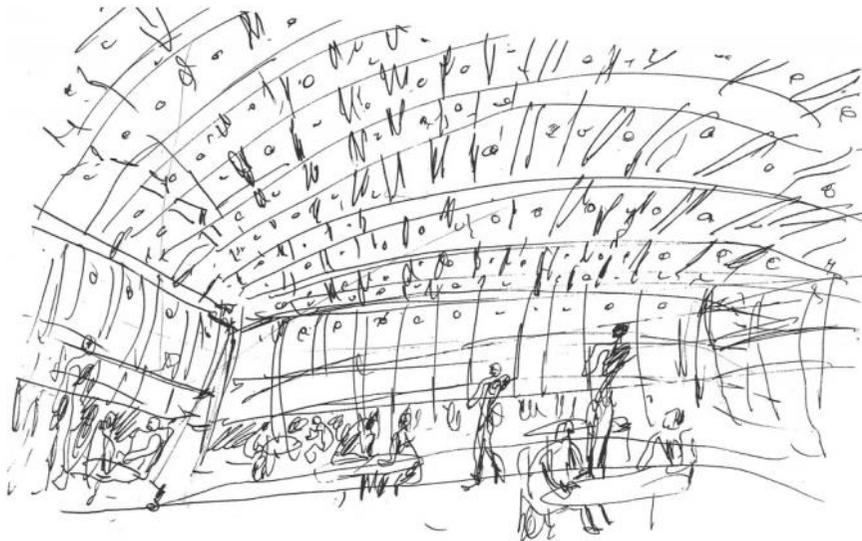


Figura 68: Vista interna do pavilhão - *croquis* desenvolvido por Álvaro Siza, na fase de concepção do projeto. Fonte: Projeto paramétrico (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 69: Vista interna do pavilhão. Registro fotográfico de 2005. Fonte: Architizer (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 70: Detalhe da estrutura do pavilhão. Fonte: Projeto paramétrico (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 71: Estrutura do pavilhão. Fonte: Afaconsult (2019) adaptado pela autora (2021).

A estrutura recebeu painéis de policarbonato, tanto na cobertura, quanto nos vedos laterais, onde estão a 1,30 m de distância do solo, para proporcionar ventilação natural. São 348 placas de policarbonato translúcido, com 5 mm de espessura, que foram cortadas individualmente, de acordo com os parâmetros fornecidos pelo escritório ARUP. Algumas placas têm um sistema individual de iluminação, a partir de um painel solar autônomo.

A fixação da estrutura se dá através de peças metálicas, que fazem a ligação entre as peças de madeira e a fundação rasa de concreto.

Conforme mencionado, anteriormente, neste projeto do Pavilhão *Serpentine*, utilizou-se laminado de madeira, denominado *Kerto*. Como este produto, também, é empregado no próximo projeto apresentado, serão destacadas suas principais características:

De acordo com a *Metsä Wood*²⁴ (2020), empresa que desenvolveu o produto, o *Kerto* é produzido a partir de árvores – da espécie Abeto – cultivadas, em áreas de reflorestamento ambiental e processadas em indústrias na Finlândia. O *Kerto* é constituído de madeira folheada laminada (LVL, do inglês *laminated veneer lumber*).

Dentre os tipos de produtos existentes, destacamos o utilizado nos projetos apresentados:

- ***Kerto LVL S-beam***: vigas para vãos longos

As peças são produzidas a partir da sobreposição e colagem de sucessivas camadas de lâminas de madeira, com 3 mm de espessura, gerando peças finais com espessuras entre 21 e 90 mm. Também, há variação no comprimento das peças, desde 200 mm até 600 mm. Tem como característica o fato de todas as lâminas terem a mesma orientação longitudinal. Pode ser utilizado para composições estruturais, como vigas, treliças ou pórticos. Tem alta resistência mecânica e é estável dimensionalmente: não cede, distorce ou diminui com o tempo ou com as cargas nele aplicadas.



Figura 72: *Kerto LVL S-beam*.
Fonte: Metsawood (2020)
adaptado pela autora (2021).

²⁴ Para maiores informações sobre 'Kerto', consultar:
<https://www.metsawood.com/global/Products/kerto/Pages/Kerto.aspx>

3.2 METROPOL PARASOL [2011]_Jürgen Mayer H. Architects



Figura 73: Metropol Parasol - vista externa. Fonte: Epochtimes (2019) adaptado pela autora (2021).



Localizado em Sevilha, Espanha, o Metropol Parasol pode ser considerado uma das maiores estruturas de madeira já construídas: são 150 metros de extensão, altura de 28 metros, largura de 75 metros e área de 2.155 m². (ARUP, 2020).

O projeto é do arquiteto Jürgen Mayer H. - em parceria com o escritório ARUP – fruto de um concurso para revitalização da '*Plaza de la Encarnación*'. A área encontrava-se degradada e pouco ocupada desde a demolição do antigo mercado central, há trinta anos.



A proposta do projeto contempla um programa variado, com intuito de atender às demandas dos habitantes locais e, também, tornar-se um atrativo para turistas.

Figuras 74 e 75: Metropol Parasol - vista aérea. Fonte: Mayer (2019) adaptado pela autora (2021).

De fato, a proposta de implantação de uma estrutura tão grande - destacando-se da malha urbana medieval da cidade – tem como propósito criar um marco arquitetônico para Sevilha e, com isso, fomentar e divulgar o caráter cultural e contemporâneo da cidade.

A estrutura é composta por seis grandes pilares, cujas configurações assemelham-se à cogumelos, uma vez que a treliça de madeira se mescla diluindo-se entre pilares e coberturas, criando uma trama orgânica e sinuosa, que perpassa a praça central, proporcionando sombreamento e integração visual entre os usos que a nova estrutura abriga e os antigos locais pertencentes ao centro tradicional. A obra cria recortes, que emolduram a paisagem; propicia recantos e abrigos que convidam ao descanso, incentivam o convívio social, acolhem atividades culturais e de lazer. A nova estrutura trouxe vitalidade ao bairro.

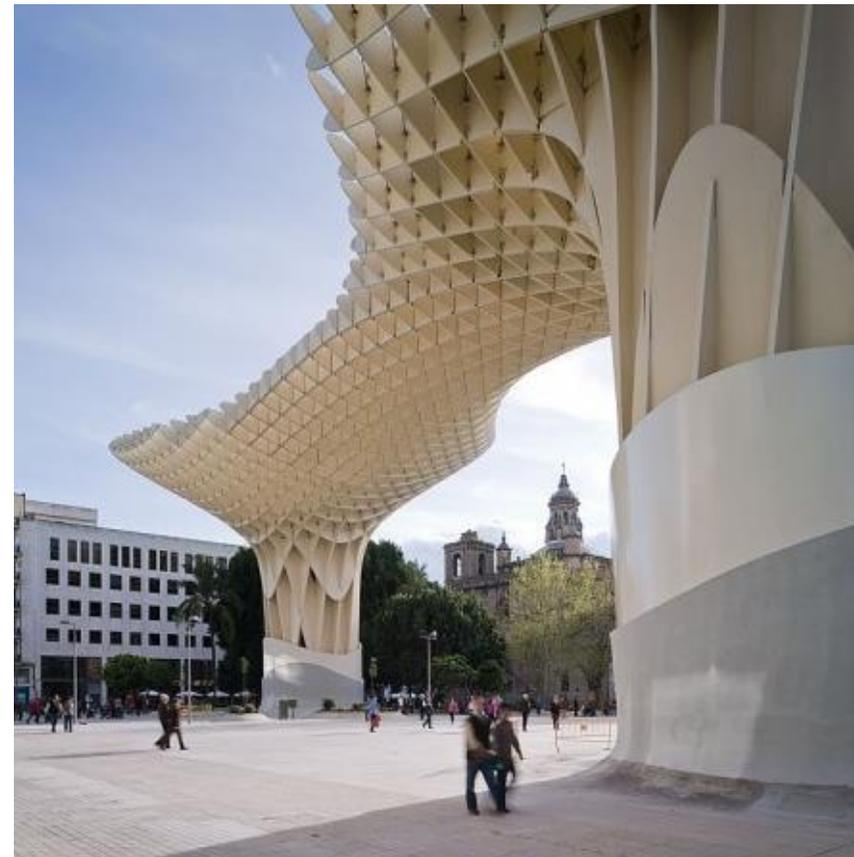


Figura 76: Metropol Parasol - vista externa. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

O fato de existir um lugar que propicie encontro de pessoas, criando uma atmosfera de acolhimento e pertencimento à cidade, colabora para o entendimento de que as cidades são para as pessoas e estas precisam sentir-se acolhidas e protegidas. À medida em que mais espaços de convivência forem surgindo, mais facilmente haverá a revitalização de áreas degradadas e desertas. Jan Gehl, enfatiza a importância de espaços com vida, para atrair as pessoas; quando há algo que desperte interesse em determinado local, inevitavelmente as pessoas estarão lá. E, sobretudo, o projeto deve ter como objetivo principal as pessoas que usufruirão daquele espaço. Qual a sensação que aquele espaço quer despertar nas pessoas? O desenho urbano deve ser pensado na escala do pedestre, das pessoas que transitarão por ali e, principalmente, criar condições de permanência das pessoas naquele sítio.



Figura 77: Metropol Parasol - vista externa. Fonte: Arup (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 78 e 79: Metropol Parasol - vista externa. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

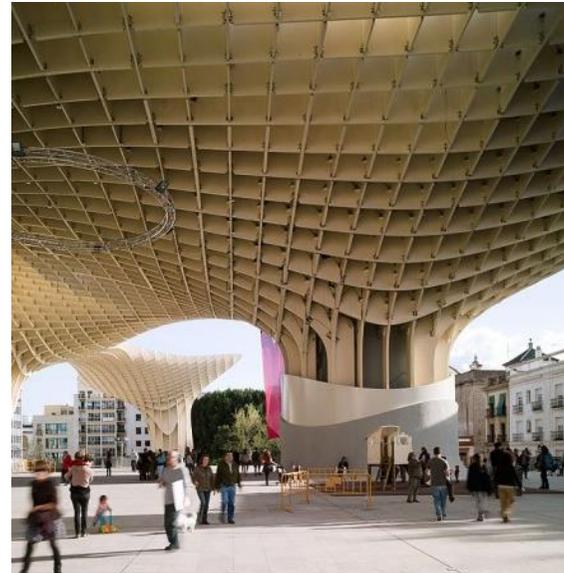


Figura 80 e 81: Metropol Parasol - vista externa. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

“Nada produz um discurso mais tocante em relação às qualidades funcionais e emocionais da vida e da atividade no espaço comum da cidade do que o seu oposto: a cidade sem vida. A cidade viva emite sinais amistosos e acolhedores com a promessa de integração social. Por si só, a simples presença de outras pessoas sinaliza quais lugares valem a pena.” (GEHL, 2015).

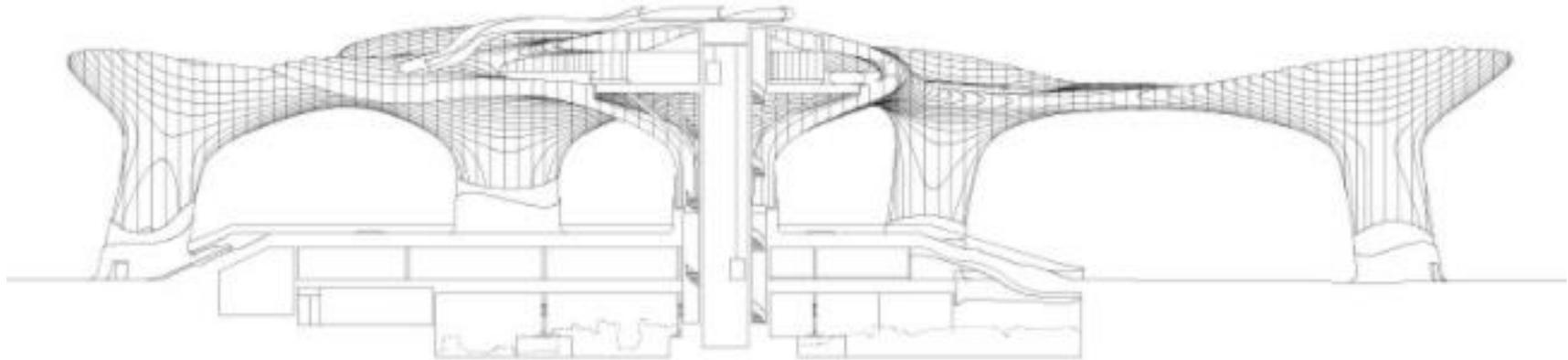


Figura 82: Corte longitudinal - Metropol Parasol. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

O Metropol Parasol configura-se em quatro níveis permeáveis entrelaçados: no piso subterrâneo encontra-se o Museu Antiquarium que abriga vestígios arqueológicos árabes e romanos; há um mercado, de 2.155m², com inúmeros estabelecimentos comerciais e gastronômicos; conta, ainda, com uma praça elevada para apresentações e shows; também, possui bares e restaurantes; e uma varanda pública com vista panorâmica do bairro antigo de Sevilha.



Figura 83: Metropol Parasol - vista da cobertura. Fonte: Mayer (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 84: Detalhe da estrutura - Metropol Parasol. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 85: Detalhe da cobertura - Metropol Parasol. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

De acordo o escritório ARUP (2020), decidiu-se utilizar o *Kerto*, após investigações experimentais comprovarem que o produto oferece uma resistência ao cisalhamento muito maior do que a madeira maciça. As peças da estrutura são protegidas das intempéries com um revestimento de poliuretano impermeável, de 2 a 3mm, mas que permite a transpiração.

Constituída de 3.000 peças, de madeira laminada, a estrutura configura-se a partir de uma malha ortogonal de 1,5 x 1,5 metros. A espessura das peças é variável, entre 7 e 22 cm.

As peças são unidas através de barras de aço fundido, montadas *in loco* e capazes de suportar as altas temperaturas de Sevilla.

Segundo Holanda (2019), Jan Peter Koppitz, engenheiro da construtora, conta: "Como o cálculo da estrutura requeria uma análise em 3D de grande complexidade, desenvolvemos um programa interativo capaz de determinar a espessura dos elementos de madeira em cada uma das uniões da estrutura para sua otimização adequada. Finalmente, os dados do modelo 3D do arquiteto integraram-se aos nossos e, também, ao modelo virtual da empresa de madeira."



Figura 86: Detalhe da estrutura - Metropol Parasol. Fonte: Archdaily (2019) adaptado pela autora (2021).

3.3 SWATCH OMEGA [2019]_Shigeru Ban Architects_Biel, Suíça



Figura 87: Swatch Omega - vista externa. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 88: Edifícios Swatch Omega. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 89: Edifícios Swatch Omega. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).

Shigeru Ban venceu o concurso para a nova sede da '*Swatch Omega*', em Basel, Suíça, cuja construção levou cerca de cinco anos. As empresas se fundiram, e as premissas do projeto pautaram-se em respeitar as características de cada uma; e, até mesmo, enfatizá-las através da arquitetura. Shigeru Ban consegue captar a essência e espírito de cada marca e traduzi-las através dos edifícios. Sua implantação cuidadosa e precisa, respeita o entorno e possibilita uma integração harmoniosa entre o novo e o já existente, no sítio escolhido. Sua arquitetura, integra interior e exterior de forma inteligente e respeitosa à natureza local, explorando e enfatizando seus aspectos positivos.

O projeto contempla três edifícios: a sede da '*Swatch*'; a fábrica da '*Omega*'; e, uma edificação que abriga dois museus - *Planet Swatch* e *Omega Museum* - e um auditório no último andar, denominada '*Cité du Temps*', interligando os dois primeiros edifícios, inclusive, simbolicamente.



Figura 90: Swatch Omega - vista aérea. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).

O edifício da *'Swatch'*, apresenta uma arquitetura orgânica, sinuosa e arrojada; sua estrutura híbrida de madeira abraça o edifício ortogonal, retilíneo e preciso que abriga a empresa *'Omega'*.

A silhueta curva e cintilante do edifício se estende por um comprimento total de 250 metros; tendo 35 metros de largura. Em seu ponto mais alto, a fachada atinge 27 metros (ARCHITONIC, 2020).

Sua proposição projetual vai ao encontro das premissas de Tadao Ando que “reconhece que a arquitetura cria uma nova paisagem e por isso tem a responsabilidade de ressaltar as características particulares de um determinado lugar (...) afirma: ‘a finalidade da arquitetura é basicamente a construção do lugar’. Tadao Ando, também, diz que a cultura japonesa enfatiza um limiar espiritual entre a construção e a natureza.²⁵

De fato, a transição entre espaço edificado e espaço livre - este limiar sutil - é característica deste projeto de Shigeru Ban.

Kengo Kuma²⁶, também, atribui grande importância ao vazio. Para a cultura japonesa, o vazio é tão importante quanto o espaço construído. E este ‘vazio’, normalmente, é destinado à natureza; seja com a presença da luz, do vento, do céu ou da vegetação. Dada sua importância, pode-se dizer que o vazio se

torna um elemento físico da construção, na cultura japonesa. A força que um abismo transmite, a gravidade que ele contém seria apenas uma exemplificação; este elemento possui uma abrangência muito grande de denotações em sua obra. Kengo Kuma citou-o e o utilizou, dentre outros aspectos, como um elemento integrador, fazendo a conexão entre as pessoas e o espaço; trazendo fluidez e permitindo movimentação e circulação nos ambientes.

²⁵ FRAMPTON, Kenneth (org.). **Tadao Ando: Buildings Projects Writings**. Nova York: Rizzoli, 1984, p. 133 e 134

²⁶ Em novembro de 2014, o arquiteto japonês, Kengo Kuma, ministrou uma palestra, na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, discorrendo sobre algumas de suas obras, correlacionando seu pensamento à sua

relação com a natureza, à arte, ao vazio; as influências da cultura japonesa, intrínsecas às suas concepções, que permeiam sua relação com espaço interior e exterior; além de inspirações advindas de sua contemplação e percepção à vida e às manifestações da natureza.



Figura 91: Edifícios: vista externa. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 92: Vista externa. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 93: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).

Fazendo três recortes – em escalas distintas – percebe-se nitidamente a intenção de interação e diálogo, premissas projetuais alcançadas por Shigeru Ban. Numa escala macro, como mostra a figura 91, é clara a relação dos novos edifícios com o entorno, com a paisagem local, criando integração entre espaço interior-exterior; espaço construído e vazio. Analisando sob a ótica do pedestre, mas ainda abrangendo a escala urbana, a figura 92, demonstra como a conformação orgânica e seus recortes, tornam-se atrativos e acolhedores. E, novamente, a presença do vazio – resultante do generoso pé direito – demonstra a qualidade do ambiente interno, a relação visual entre os pavimentos e, também, a relação com o ambiente externo, por meio da luz natural; como mostra a figura 93.

Se externamente a forma sinuosa, reluzente, transmite certo ar futurista; internamente, embora arrojada, sua organicidade torna-se acolhedora. A estrutura da cobertura reúne dois aspectos que denotam sensação de aconchego, na materialidade e na forma: a madeira, material natural, com tons e texturas tão característicos; e a curvatura abobadada, sem extremidades ortogonais, ou seja, sem cantos retos, cria um espaço orgânico, que remete à formas primitivas de abrigo [a caverna] ou, até mesmo, às sensações subconscientes do abrigo e proteção do ventre materno. Contribui, também, para a sensação de acolhimento, o fato da estrutura de madeira não se restringir apenas à cobertura; quando se estende aos vãos laterais, cria a sensação de 'abraçar' o edifício; proporciona o sentimento de estar abrigado, protegido. Ao mesmo tempo em que permite a conexão com o ambiente externo: o céu, a luz natural, a vegetação e paisagem próximas. São recortes de vida que adentram ao ambiente propiciando uma relação interior-exterior que assegura bem-estar aos usuários.



Figura 94: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 95: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 96: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).

Shigeru Ban elegeu a madeira como material construtivo, por dois motivos principais: do ponto de vista técnico, em função das características do material e, também, devido à precisão e rapidez de montagem da estrutura; e, do ponto de vista contextual, pelo fato de Biel abrigar a escola de engenharia expoente em tecnologia de madeira, na Suíça; tanto que, o protótipo estrutural do 'Centre Pompidou Metz' – um dos projetos representativos de Shigeru Ban - foi desenvolvido nesta cidade.

Além desta relação direta à história do local, há a questão da sustentabilidade, que permeia todo o projeto; e a madeira é um material estrutural renovável. A escolha deste material, também, encontra ressonância nas reflexões teóricas acerca deste tema, como no ensaio de William McDonough:

A configuração da Natureza [...] revela que tudo com o que temos de trabalhar já está dado – as pedras, o barro, a madeira, a água, o ar. Todos os materiais que a natureza nos dá retornam constantemente à terra, sem incluir nenhum conceito de desperdício da maneira como entendemos. Tudo é permanentemente reciclado e tudo o que sobra se torna alimento para outros sistemas vivos. (NESBITT, 2006 p. 431)²⁷.

“Todo o volume de madeira utilizado neste projeto é de 4.600m³, o que corresponde a dez horas de crescimento de árvores inteiras na Suíça.” (BAN, 2019).

De acordo com Architonic (2020), os 2.800 elementos em 'favo de mel' foram instalados durante a montagem da estrutura de madeira. Todos os elementos foram adaptados,

²⁷ NESBITT, Kate (org.). **Uma nova agenda para a arquitetura: antologia teórica (1965-1995)**. São Paulo: Cosac Naify, 2006.

individualmente, à estrutura de acordo com sua forma, função e posição.

Há três tipos de configurações, de vedação, destes elementos: opaca, translúcida e transparente. A maioria dos 'favos' é composta por elementos opacos e regulares, resistentes às intempéries, desempenhando a função de proteção solar. Alguns elementos são equipados com células fotovoltaicas; enquanto outros, podem ser abertos. Os 'favos' translúcidos, são almofadas de policarbonato, infladas internamente com ar, proporcionando isolamento térmico. Sendo que, integrada à estrutura foi instalada uma complexa rede de cabos.

Há nove varandas, proeminentes à estrutura, com formatos distintos e dimensões que variam de 10 a 20 m², propiciando a vista – figura 98. As cruces suíças de madeira – figura 94 – auxiliam na acústica dos escritórios devido às finas perfurações existentes.



Figura 97: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 98: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 99: Vista interna. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 100: Vista interna. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 101: Vista interna. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 102: Vista interna. Fonte: Archdaily_3 (2019) adaptado pela autora (2021).



Figura 103: Vista interna. Fonte: Archdaily_3 (2019) adaptado pela autora (2021).

Vislumbrando a configuração dos espaços internamente, percebe-se a sutileza do projeto – em cada detalhe – seja na forma, seja no material empregado. Os ambientes estão integrados, mesmo sendo espaços distintos – cada um com sua identidade – criam uma atmosfera leve, inspirando criatividade e interação. Demonstram que, mesmo se tratando de um ambiente corporativo, a sensação das pessoas, é o fator primordial para a concepção do projeto.

Christian Norberg-Schulz traz uma reflexão acerca da arquitetura e sua relação com o lugar:

[...] o ato fundamental da arquitetura é compreender a “vocação” do lugar. Dessa maneira, protegemos a terra e nos tornamos parte de uma totalidade compreensível. [...] o homem é parte integral do ambiente e que ele somente contribui para a alienação e ruptura do ambiente quando se esquece disso. Pertencer a um lugar quer dizer ter uma base de apoio existencial em um sentido cotidiano concreto. (NESBITT, 2006 p. 459).



Figuras 104 e 105: Vista interna. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).

Em entrevista concedida à LEHMANN (2020), Shigeru Ban¹ explica que: “O pedido original do ‘Swatch Group’ era construir três edifícios separados. Eu os reuni sob um teto - de forma livre - que representa as características da marca ‘Swatch’: ludicidade, inovação e provocação. A intenção era criar um contraste com os prédios da *Omega*, pela precisão, exatidão e estabilidade.”



Figura 106: Swatch Omega - vista aérea. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 107: Edifício da Omega. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 108: Edifício da Swatch. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).

¹ Shigeru Ban: “The original request from Swatch Group was to build three separate buildings. I brought them together under a Free Form roof that represents the characteristics of the Swatch brand: playfulness, innovation and provocation. The intention was to create a contrast to the buildings of Omega, the precision, exactness and stability.”

A estrutura reticulada da cobertura é composta por 4.600 peças de madeira, que foram projetadas e fabricadas pela empresa 'Blumer-Lehmann':

All three buildings are architecturally and technically striking. They show what is possible with the combination of innovative architecture, parameterised planning processes, and precision manufacturing and production methods. Notwithstanding the state-of-the-art technology, it is ultimately the people and the interaction of the expertise and skills of all parties involved that ensured the success of this large-scale project.² (LEHMANN³, 2020).

² Todos os três edifícios são arquitetônica e tecnicamente impressionantes. Eles mostram o que é possível com a combinação de arquitetura inovadora, processos de planejamento parametrizados e fabricação de precisão e métodos de produção. Apesar da tecnologia de ponta, são, em última análise, as pessoas e a interação



Figuras 109 e 110: Estrutura de madeira - edifício Swatch. Fonte: Ban (2019) adaptado pela autora (2021).

das experiências e habilidades de todas as partes envolvidas que garantem o sucesso deste projeto de grande escala (tradução nossa).

³ Para maiores informações sobre a empresa responsável pelas peças de madeira, consultar: <https://www.lehmann-gruppe.ch/>



Figura 111: Montagem in loco estrutura de madeira. Fonte: Lehmann (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 112: Detalhe do encaixe das peças de madeira. Fonte: Lehmann (2020) adaptado pela autora (2021).

Utilizaram-se *softwares* de desenho paramétrico para o desenvolvimento do projeto arquitetônico; estas ferramentas digitais possibilitaram que a complexa configuração da forma, da estrutura, fosse executada com precisão milimétrica [literalmente]. Possibilitaram que cada uma das peças componentes da estrutura, com seu desenho único, fosse cortada com exatidão pelas máquinas CNC.

As peças foram posicionadas *in loco*, com auxílio de guindastes e gruas, como demonstra a figura 115. Os cortes precisos das peças possibilitaram encaixes perfeitos entre os componentes, que foram parafusados pelos construtores [figura 113]. De acordo com a empresa 'Blumer-Lehmann' a montagem da estrutura de madeira durou dez meses [figura 114].



Figura 113: Fixação das peças de madeira. Fonte: Lehmann (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 114: Estrutura de madeira. Fonte: Lehmann (2020) adaptado pela autora (2021).



Figura 115: Içamento das peças de madeira. Fonte: Lehmann (2020) adaptado pela autora (2021).

De acordo com Lehmann (2020), para Shigeru Ban os principais desafios deste projeto foram: “os trabalhos de coordenação dos elementos da fachada, instalações elétricas, climatização e aquecimento, ventilação e sistema de *sprinkler* - todos tiveram de ser integrados na construção de madeira.”⁴

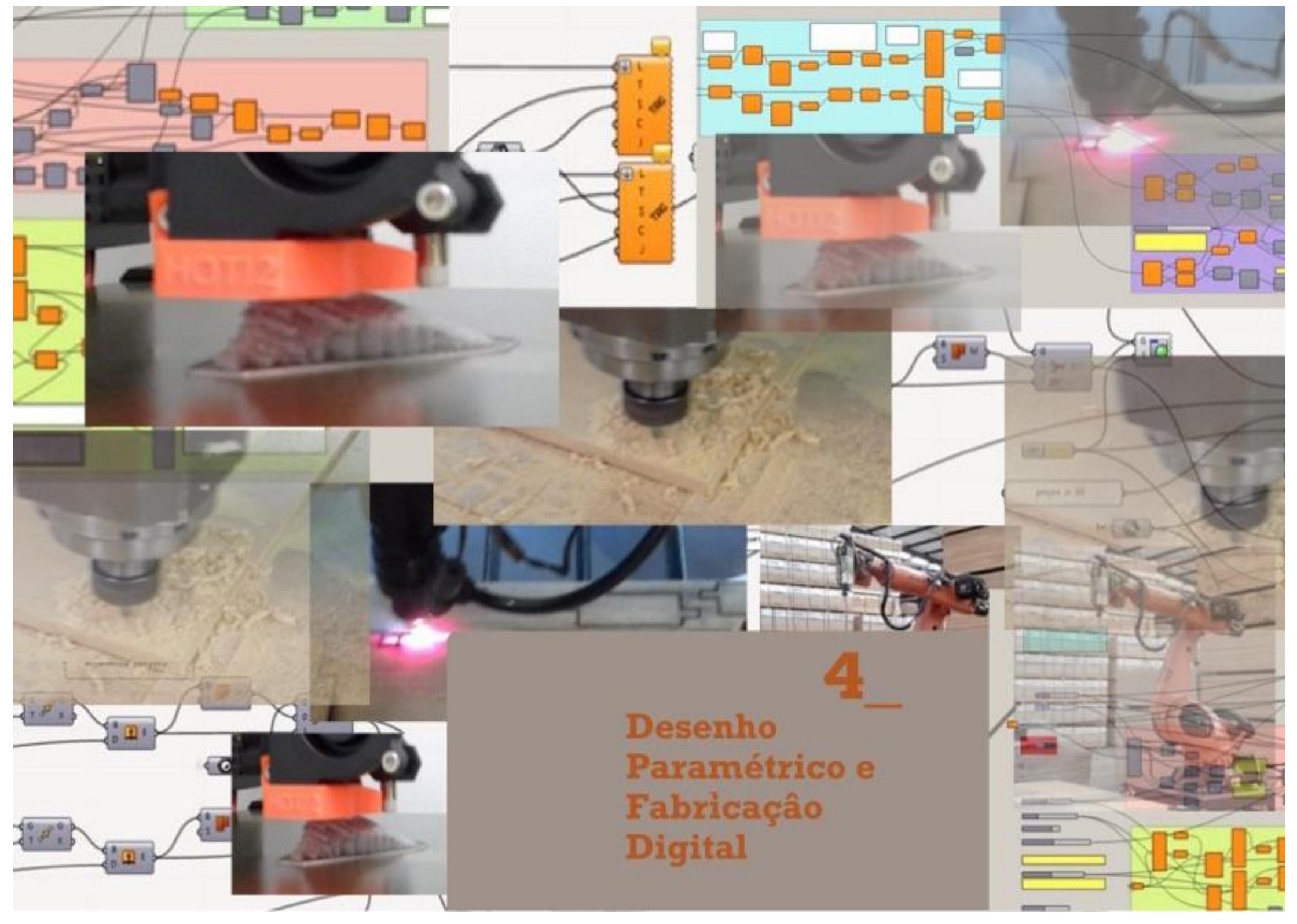
Shigeru Ban salienta, ainda, que as características da madeira favoreceram sua utilização como principal material construtivo: “A madeira é extremamente flexível em termos de design e produção altamente precisa, e o trabalho de instalação é rápido e silencioso.”⁵



Figura 116: Passarela entre os edifícios Swatch Omega. Fonte: Architonic (2020) adaptado pela autora (2021).

⁴ Shigeru Ban: “The coordination work for the façade elements, electrical installations, climate control and heating, ventilation and the sprinkler system – they all had to be integrated into the timber construction.”

⁵ Shigeru Ban: “Wood is extremely flexible in terms of design and highly precise production, and the installation work is fast and quiet.”



4_

Desenho Paramétrico e Fabricação Digital

4_ DESENHO PARAMÉTRICO E FABRICAÇÃO DIGITAL

4.1 PANORAMA ATUAL

Complex geometries in architecture may seem like an invention of the digital age, but for many years architects have been designing and constructing buildings that contain significant complex elements. Gaudí's Sagrada Familiar demonstrates that complex forms could be created as early as 1882.

²⁸ "Geometrias complexas na arquitetura podem parecer uma invenção da era digital, mas por muitos anos os arquitetos têm projetado e construído edifícios que contêm elementos complexos significativos. Sagrada Família, de Gaudí, demonstra que formas complexas poderiam ser criadas já em 1882. A Sidney Opera House, de Utzon, listada como patrimônio mundial 1957-1973, é um dos exemplos mais significativos de arquitetura orgânica antes do uso de computadores. O Vitra Design Museum, de Frank Gehry, em 1990 aludiu às formas fluidas que ele queria

Utzon's world heritage listed Sidney Opera House, 1957-1973, is one of the most significant examples of organic architecture before the use of computers. Gehry's Vitra Design Museum in 1990 alluded to the fluid forms that he wanted to create, but was unable calculate or realise, even with the very basic computational resources available to architects at the time.²⁸ (BOOTH, 2017).²⁹

Frei Otto, Eladio Dieste, Félix Candela, dentre outros, também são referências que demonstram a aplicação de geometrias complexas ainda sem o amparo digital. Estes exemplos reforçam a ideia de que os meios digitais são apenas ferramentas que contribuem com o processo projetual.

criar, mas não conseguiu calcular ou realizar, mesmo com os recursos computacionais muito básicos disponíveis para arquitetos na época. [tradução nossa]

²⁹ BOOTH, Pete. **Complex Geometries, Different Technologies**. Digital Technologies in Architecture: Principles and Applications – IAAC, Catalonia, 2017.



Figura 117: Sagrada Família, Antoni Gaudí.
Fonte: Sagradafamilia (2021) adaptado pela autora (2021).



Figura 118: Ópera de Sydney, Jørn Utzon.
Fonte: Operadesydney (2021) adaptado pela autora (2021).



Figura 119: Vitra Design Museum, Frank Gehry.
Fonte: Vitra (2021) adaptado pela autora (2021).

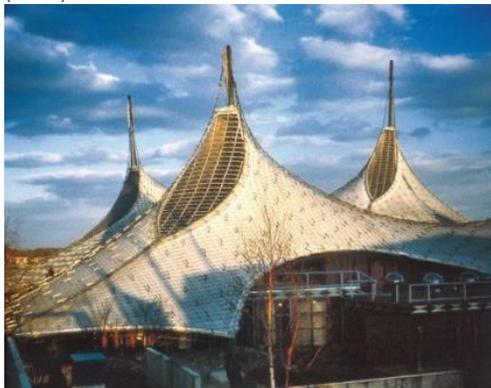


Figura 120: Pavilhão Alemão da Expo 67, Frei Otto e Rolf Gutbrod. Fonte: Archdaily (2021) adaptado pela autora (2021).



Figura 121: Igreja de São Pedro, Eladio Dieste.
Fonte: Fadu (2021) adaptado pela autora (2021).



Figura 122: Capela Bosjes, Félix Candela.
Fonte: Archdaily (2021) adaptado pela autora (2021).

As novas tecnologias não são uma ruptura; e sim, uma continuidade. Estamos vivenciando um momento de transição, onde os aspectos e aplicações estão se desenhando; há muitas possibilidades a serem exploradas e muitas lacunas ainda sem respostas. A transposição de *bits* para átomos, ainda requer investigação e, principalmente, experimentação. A aplicação prática – por meio da prototipagem – é uma poderosa ferramenta de aprimoramento do projeto. Assim como, os *softwares* que facilitam a concepção do projeto de forma tridimensional, possibilitando proposições espaciais, sensoriais e plásticas mais elaboradas.

O avanço das tecnologias dos *softwares* - empregados na arquitetura – extrapola as possibilidades criativas até então restritas e condicionadas aos meios de concepção e representação de projeto [representados principalmente por meio das projeções ortogonais, ou seja, desenhos 2D].

As facilidades – da modelagem 3D e da prototipagem – propiciam novas ferramentas projetuais: um novo olhar para

a concepção do espaço, para a aplicação dos materiais. Possibilidades de explorar novas formas ou, até mesmo, de melhor aproveitamento de formas já conhecidas, propiciando estruturas mais esbeltas e, conseqüentemente, racionalizando o uso de materiais.

Na construção civil, embora tenha-se avançado muito nos últimos anos, ainda há questões a serem aprimoradas, em se tratando da transposição da concepção digital para a concretização real do edifício; podemos destacar dois fatores principais:

- plasticidade: materiais adequados às formas complexas, orgânicas, concebidas por meio do desenho paramétrico;
- formas de trabalho: humana e maquinários – ainda não estão totalmente integradas e adaptadas às construções advindas do processo projetual atrelado à fabricação digital.

A tecnologia digital permite avanços significativos na construção civil, estando presente em todas as fases do processo, desde a fase conceitual, passando pelo desenvolvimento do projeto, fabricação CNC³⁰, até sua construção. Nestas últimas décadas, mesmo fragmentada, a indústria de construção tem visto, na implementação destas novas tecnologias, uma influência sem precedentes na concepção dos projetos e de novos materiais, com técnicas de manufatura, por meio de comandos computadorizados. As atuais ferramentas de análise permitem, aos arquitetos e engenheiros, criar formas de superfície, prevendo seu comportamento e concebendo estratégias de manufaturas eficientes. (BECHTOLD, 2008).³¹

Atualmente, a aplicação da tecnologia CAD/CAM³² e CNC se dá pela utilização de elementos de construção pré-

fabricados, em ambientes controlados, que são transportados para o sítio e, posteriormente, montados *in loco* – na maioria das vezes - por trabalhadores, com experiência prévia em carpintaria e construção civil. Mas, a tendência é que equipamentos, como braço robótico, ou impressoras 3D de grande porte, estejam no canteiro de obras, participando ativamente do processo construtivo.

Dentre as vertentes de aplicação de desenho paramétrico para concepção de projetos, há a busca da forma³³ por meio da análise de elementos finitos.³⁴ De acordo com Bechtold (2008), uma das principais vantagens deste método é que a análise estrutural e a busca da forma podem caminhar lado a lado, uma vez que ambos são amparados pelo mesmo ambiente e método computacional. Na concepção de uma casca, por exemplo, ao desenho da superfície, serão

³⁰ CNC: *Computer Numerical Control* [Controle Numérico Computadorizado]

³¹ BECHTOLD, Martin. **Innovative Surface Structures Technologies and Applications**. Taylor & Francis: New York, 2008.

³² CAD: *Computer-Aided Design* [desenho assistido pelo computador] / CAM: *Computer-Aided Manufacturing* Computer [manufatura assistida pelo computador]

³³ *Form-finding*

³⁴ FEA: *finite element analysis*

estabelecidos, simultaneamente, sua configuração formal e estrutural. Em um processo iterativo, à forma estabelecida são aplicadas as cargas que são esperadas na realidade física da casca em tamanho real. Estes, incluem não só o peso próprio, mas também, a neve, vento ou cargas sísmicas; todos os aspectos que não são normalmente considerados durante a concepção da forma. As simulações estruturais podem, então, ser carregadas para revisões da forma da casca que, por sua vez, requerem outra análise. Este processo de desenvolvimento - em ciclos - ocorre até que se encontre uma solução que satisfaça todos os critérios de projeto arquitetônico, construtivo e estrutural.

Um dos exemplos de aplicação dos métodos computacionais de busca da forma, é a estrutura reticulada projetada para a cobertura do Pátio do Museu Britânico, do escritório Foster + Partners³⁵. No processo de busca da forma, foram utilizados princípios de relaxamento dinâmico; um

recurso possibilitado pelo amparo de *softwares* de desenho paramétrico, que permite ajustar os elementos estruturais, de modo a se moldarem no espaço proposto, de acordo com as variantes e condicionantes pré-estabelecidas. Fazendo uma analogia, o princípio do relaxamento dinâmico, poderia ser descrito como se o *software* simulasse o gesto manual de acomodar uma trama, de cestaria por exemplo, cobrindo e unindo os volumes pré-existentes, resultando na forma mais eficiente.

The glazed canopy that makes all this possible is a fusion of state-of-the-art engineering and economy of form. Its unique geometry is designed to span the irregular gap between the drum of the Reading Room and the courtyard facades, and forms both the primary structure and the framing for the glazing,

³⁵ Para mais informações, consultar: www.fosterandpartners.com

which is designed to reduce solar gain.³⁶

(FOSTER, 2020).



Figura 123: Museu Britânico. Fonte: Foster (2020) adaptado pela autora (2021).

³⁶ A cobertura envidraçada que torna tudo isso possível é uma fusão de engenharia de ponta e economia de forma. Sua geometria única é projetada para abranger o vão irregular entre o volume da Sala de Leitura e as fachadas do pátio, e forma

tanto a estrutura primária, quanto o enquadramento da vidraça, que é projetada para reduzir o ganho solar [tradução nossa].

Patrik Schumacher³⁷ defende uma dupla tese que implica tanto a demarcação mais rigorosa, quanto a colaboração mais próxima entre arquitetura e engenharia como pré-condições para o avanço produtivo do ambiente construído.

A produção da forma baseada em regras que calculam resultados de entradas multivariáveis, por sua vez, permite - pelo menos em princípio - que as inferências sejam desenhadas na direção inversa: das variáveis de saída resultantes às variáveis de entrada. Uma compreensão intuitiva da lógica incorporada dessas formações espaciais baseadas em regras fornece aos usuários uma sensação de orientação e uma navegação intuitiva e bem-sucedida. É nessa busca de coincidências entre morfologias

técnicas e comunicativas que reside o projeto-chave da articulação tectônica. (ADRIAENSSENS, 2014).

As ferramentas digitais possibilitam que a integração entre arquitetura e engenharia ocorram durante a fase de concepção do projeto arquitetônico, de forma que haja influência mútua. Com as novas ferramentas e tecnologias, houve uma ruptura na sequência das etapas de projeto que, agora, caminham de forma não linear; os aspectos estruturais e detalhes construtivos, já são contemplados durante os primeiros esboços projetuais; os *softwares* de desenho paramétrico permitem que ajustes ocorram em qualquer etapa de projeto, de forma integrada, permitindo a compatibilização dos diferentes projetos automática e simultaneamente. A ruptura se dá, também, no processo de concepção dos projetos arquitetônicos, que podem, por exemplo, seguir a

³⁷ ADRIAENSSENS, Sigrid; BLOCK, Philippe; VEENENDAAL, Diederik; WILLIAMS, Chris. [org.] **Shell Structures for Architecture - Form Finding and Optimization**. Routledge: New York, 2014. [SCHUMACHER, Patrik - p. 271-273]

metodologia da busca da forma, amparados pelos *softwares*, possibilitando que aspectos semânticos e tectônicos sejam definidos concomitantemente, com complexidade espacial e morfológica.

No cenário contemporâneo, arquitetura e computadores são frequentemente sinônimos. Do projeto conceitual à fabricação e montagem no local, os computadores e as tecnologias digitais transformaram não apenas a maneira como representamos nossas idéias, mas também os meios pelos quais as geramos. Agora, uma variedade de ferramentas digitais está disponível: as exploratórias permitem ao projetista investigar conceitos emergentes por meio de novos cálculos e busca de formas generativas; descritivos, como modelagem e visualização

tridimensionais, permitem entender um design e seu desenvolvimento; ferramentas analíticas preditivas e avaliativas permitem que os *designers* testem as implicações e o desempenho das idéias de projeto; e algumas ferramentas até atuam como parte da produção final dos elementos de construção e coordenação da construção.³⁸ (DUNN, 2012 p.18).

Ou seja, há ferramentas destinadas às diferentes etapas e às formas distintas de concepção e desenvolvimento dos projetos arquitetônicos. A escolha, dentre tantas opções, se dá levando-se em consideração a necessidade do projeto; bem como em relação à identidade criativa e propositiva do projetista, uma vez que estas tecnologias são ferramentas que auxiliam a concepção, elaboração, representação e execução

³⁸ DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing Ltd, UK, 2012.

dos projetos; mas as sutilezas projetuais, as intenções e gestos arquitetônicos, são o fio condutor, que norteiam e direcionam o projeto como um todo. A composição formal, técnica, material, o local, dentre tantos aspectos inerentes à concepção de um projeto, continuam sendo as diretrizes do arquiteto, que elegerá quais são as ferramentas mais adequadas para que a convergência de tantos fatores resulte num projeto de qualidade.

O sistema BIM³⁹ implementou uma nova metodologia de projeto, na medida em que integra os profissionais e permite compatibilização imediata entre os diferentes projetos. Desta forma, possibilita a redução do tempo dispendido nos ajustes dos desenhos, evitando possíveis erros e incompatibilidades projetuais; bem como, realiza a especificação, quantificação e cálculo orçamentário dos materiais necessários. A integração entre os diferentes profissionais envolvidos, por meio da

mesma plataforma digital de trabalho, suscita o diálogo e possibilita agilidade nas decisões, uma vez que todos os aspectos inerentes ao projeto já estão contemplados em um único arquivo digital.

BIM é uma filosofia de trabalho que integra arquitetos, engenheiros e construtores (AEC) na elaboração de um modelo virtual preciso, que gera uma base de dados que contém tanto informações topológicas como os subsídios necessários para orçamento, cálculo energético e previsão de insumos e ações em todas as fases da construção. (EASTMAN, 2008)⁴⁰.

³⁹ BIM: *Building Information Modelling*

⁴⁰ EASTMAN, Charles M. et al. **Um Guia para Modelagem de Informações da Construção para Proprietários, Gerentes, Designers, Engenheiros e Empreiteiros.** John Wiley & Sons, 2008.

A contemporaneidade suscita respostas às demandas complexas; interconectividade, sustentabilidade, dentre tantos outros aspectos que se fazem necessários nos tempos atuais, contribuem para a busca por inovações tecnológicas que viabilizem a concretização de novos modos de pensar e viver. As formas de representação e apresentação dos projetos arquitetônicos sofreram significativas mudanças nas últimas décadas. Atualmente é possível, por meio da realidade aumentada, ter a sensação de percorrer um projeto arquitetônico ainda que de forma virtual. De fato, a experiência sensorial é inegavelmente distinta daquela oriunda da vivência real. Entretanto, tais ferramentas têm como artifício auxiliar no entendimento daquele projeto e favorecer a visualização das suas dimensões e espaços propostos, bem como da sua inserção no lote e relação com entorno. Permitem que o “plano das ideias”, ou seja, que as intenções projetuais dos arquitetos, fiquem mais tangíveis à compreensão do interlocutor.

Assim como, também, mudaram bastante nos últimos anos, as formas de concepção, desenvolvimento e construção. As ferramentas digitais permitem simulações e análises, que direcionam a concepção dos projetos arquitetônicos. Cálculos estruturais e análises do comportamento das estruturas, não são mais uma etapa posterior à concepção do projeto; atualmente, caminham concomitantemente e interagem entre si. E, em relação à construção, a fabricação digital trouxe avanços significativos, na medida em que possibilita experimentações de processos construtivos, implementação de novos materiais e inovação de soluções e proposições de elementos construtivos. As ferramentas digitais, já existentes, possibilitam que projetos tenham soluções únicas, com todos os elementos construtivos distintos, por exemplo, sem que haja aumento do custo de produção. A fabricação digital permite a customização em massa, ou seja, a produção em larga escala de peças não idênticas.

As funções contínuas geradas por algoritmos podem ser usadas para produzir elementos individuais, mas também para criar séries inteiras ou famílias de elementos. Nestas séries, todos os seus elementos, embora diferenciados por incrementos, compartilham uma matriz algorítmica. Em sua definição técnica mais simples, a produção *non-standard* significa produção em massa de peças não idênticas. Uma série *non-standard* não é definida pelo elemento individual que a compõe, mas pelas leis de mudança diferencial que geram a série; o que conta em uma série *non-standard* é o diferencial entre seus elementos, não os atributos específicos de cada um deles, incluindo formas visuais, que podem adquirir qualquer configuração. (ORTEGA, 2009 p.61).⁴¹

⁴¹ ORTEGA, L. (Ed) **La digitalización toma el mando. Compendios de Arquitectura Contemporánea.** GG, Barcelona, 2009.

Se a maneira de pensar, representar e fazer arquitetura passa por tantas mudanças e avanços, por que a forma de ensinar arquitetura permanece estanque?

Cabe aqui uma reflexão sobre o ensino de projeto na arquitetura⁴². Se vivenciamos o espaço tridimensionalmente, por que os alunos são ensinados a conceber o projeto a partir de representações bidimensionais do espaço? Sabemos que as representações ortogonais são instrumentos de diálogo entre o projetista e os executores. Mas será que é o meio mais eficaz de concepção de projeto? Os *softwares* atuais estão mais amigáveis aos usuários, permitindo que desenhos complexos sejam executados rapidamente. Por que não explorar este potencial como ferramenta de desenvolvimento projetual? E por que não se valer de modelos tridimensionais – protótipos – como maquetes de estudo? Por que não reforçar a ideia de diálogo entre *croquis* e modelo, criando uma via de mão dupla, ao invés da maquete ser apenas a última etapa do projeto?

⁴² O Anexo II apresenta uma experiência desenvolvida com alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, em 2018.

Inverter a lógica tradicional de concepção do projeto, pode enriquecer muito o desenvolvimento do estudante de arquitetura. Aliar ideia, intenção, ao desenho e ao modelo, parece ser um caminho tão natural quanto fortalecer o diálogo entre arquitetos e engenheiros desde a concepção estrutural ao desenvolvimento de novos materiais e possibilidades de aplicação.

Nesse sentido, as ferramentas de fabricação digital proporcionam um cenário de experimentação muito favorável ao aprimoramento do pensamento arquitetônico, pois possibilitam que as ideias migrem do plano virtual para o real, com rapidez e facilidade de manuseio e execução. Permitem testar possibilidades de formas e desenhos, instigando a criatividade e vislumbrando novas soluções.

⁴³ Para maiores informações, consultar: <https://www.fablabs.io/>

⁴⁴ Um Fab Lab, ou laboratório de fabricação digital, é um lugar para brincar, criar, orientar e inventar: um lugar para aprender e inovar. Os Fab Labs fornecem acesso ao ambiente, às habilidades, aos materiais e à tecnologia avançada para permitir

4.2 REDE FAB LAB

Os laboratórios – da rede Fab Lab⁴³ – são fundamentais para a disseminação destas ferramentas digitais e colaboram de forma muito ativa, às investigações relacionadas à fabricação digital, em diversas áreas, inclusive à Arquitetura e Urbanismo.

A Fab Lab, or digital fabrication laboratory, is a place to play, to create, to mentor and to invent: a place for learning and innovation. Fab Labs provide access to the environment, the skills, the materials and the advanced technology to allow anyone anywhere to make (almost) anything.⁴⁴ (FABLAB, 2020).

que qualquer pessoa em qualquer lugar faça (quase) qualquer coisa. [tradução nossa]

A rede foi criada em 2008 pelo Centro de Bits e Átomos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT).

Está presente em mais de cem países e possui mais de mil, setecentos e cinquenta laboratórios. Disponibilizando vários programas educacionais, além de serviços de fabricação digital, segundo a Fab Fondation.

Atuando, também, no Brasil em diversos estados, conforme demonstra o mapa na figura 125, contando com cento e vinte e três unidades registradas.

No estado de São Paulo, há diversas unidades da rede Fab Lab, sendo a maior concentração na grande São Paulo, conforme apresentado no mapa, referente à figura 126.



Figura 124: Mapa da rede mundial de Fab Labs. Fonte: Fablab (2020) adaptado pela autora (2020).



Figura 125: Rede Fab Lab no Brasil. Fonte: Fablab (2020) adaptado pela autora (2020).

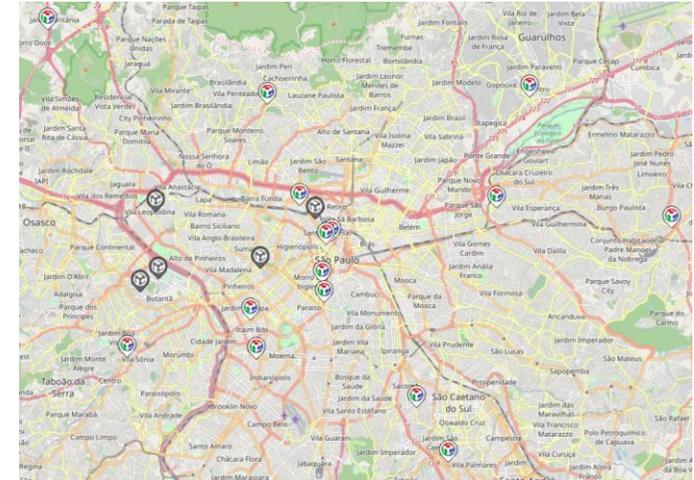


Figura 126: Mapa da rede FabLAB na grande São Paulo. Fonte: Fablab (2020) adaptado pela autora (2020).

Na cidade de São Paulo, uma parceria entre a Prefeitura, o Fab Foundation⁴⁵ e o Instituto de Tecnologia Social⁴⁶, criou-se o Fab Lab Livre SP; trata-se da maior rede de laboratórios públicos de fabricação digital do mundo. São espaços totalmente gratuitos, com livre acesso, para que as pessoas possam desenvolver projetos e participar de cursos e oficinas. Atualmente, a cidade conta com doze unidades, que oferecem mais de trinta tipos de cursos, todos voltados à fabricação digital. Para fazer parte da rede mundial Fab Lab, há alguns requisitos, dentre os quais estão os tipos de equipamento CNC disponibilizados aos usuários: impressora 3D, fresadoras e cortadoras a laser.

Em 2011, o primeiro Fab Lab, do Brasil, a fazer parte da rede global foi o FAB LAB SP, sediado na FAU USP⁴⁷. Este laboratório é oriundo da disciplina de Pós-Graduação

"Arquitetura e Design Contemporâneo", ministrada pelo Prof. Dr. Paulo Eduardo Fonseca de Campos, em 2009. Desde então, integrou-se ao LAME⁴⁸ - reforçando seu caráter como um espaço didático de experimentação e pesquisa - e à rede Fab Lab Livre SP, disponibilizando semanalmente horários livres destinados à comunidade, por meio do programa "*Open Day*". Entre 2011 e 2013 o grupo de pesquisa DIGIFAB-FAUUSP, coordenado pelo Prof. Dr. Paulo Fonseca de Campos, organizou duas edições do '*Workshop + Seminário Internacional FAB LAB SP*'.⁴⁹

Há, outros laboratórios pertencentes à rede Fab Lab e vinculados às universidades como, por exemplo, o do Centro Universitário Belas Artes de São Paulo⁵⁰, inaugurado em 2015; e que dentre suas ações, fez uma parceria com a *Architectural Association School of Architecture (AA)*, de Londres.⁵¹

⁴⁵ Para maiores informações, consultar: <https://fabfoundation.org/>

⁴⁶ ITS Brasil: <http://itsbrasil.org.br/>

⁴⁷ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo

⁴⁸ Laboratório de Modelagem e Testes

⁴⁹ Tendo como convidados: Alexandra Paio [ISCTE/IUL - Lisboa, Portugal], José Pedro Souza [FAUP - Porto, Portugal], Mauro Costa Couceiro [ESARQ/UIC - Barcelona, Espanha] e Paul Shepherd [University of Bath, Inglaterra].

⁵⁰ Para maiores informações, consultar <https://www.belasartes.br>

⁵¹ Em 2016, promoveu uma oficina conduzida pelos arquitetos Shajay e Vishu Bhooshan, do CO|DE, o departamento de computação do escritório Zaha Hadid.



Figura 127: 1º Workshop na FAUUSP, em 2011, coordenado pelos professores Mauro Costa Couceiro e José Pedro Souza: o pórtico feito na CNC foi a primeira estrutura reticulada feita no FAB LAB SP. Fonte: Tania Mayumi Senaga, 2011 adaptado pela autora (2020).

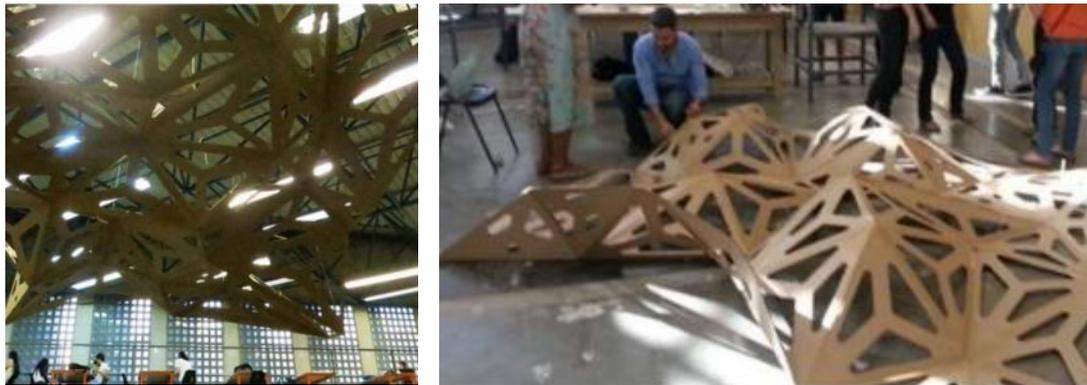


Figura 128: 2º Workshop na FAUUSP, em 2013, coordenado pelo professor Mauro Costa Couceiro: criação das Nuvens 1 e 2 - estruturas fractais feitas na CNC laser. Fonte: Mauro Costa Couceiro, 2013 adaptado pela autora (2020).



Figura 129: LAME-FAUUSP / CNC fresadora / CNC laser. Fonte: Autora (2018).

⁵¹Além de uma palestra ministrada por Shajay Bhooshan, muito inspiradora, sobre os métodos e processos de concepção de projetos, adotados pelo escritório Zaha Hadid.

Uma das referências mundiais é o Fab Lab Barcelona, da Espanha, inaugurado em 2007, integrado ao Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha e sede da Fab Academy, que é uma plataforma de educação e pesquisa global.

The Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC)⁵² is a centre for research, education, production and outreach, with the mission of envisioning the future habitat of our society and building it in the present.

IAAC follows the digital revolution at all scales (from bits to geography, from micro-controllers to cities, from materials to the territory) to expand the boundaries of architecture and design and meet the challenges faced by humanity.⁵³ (IAAC, 2020).

⁵² Para maiores informações, consultar: <https://iaac.net/>

⁵³ O Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC) é um centro de pesquisa, educação, produção e divulgação, com a missão de imaginar o futuro habitat de nossa sociedade e construí-lo no presente. IAAC segue a revolução digital em todas as escalas (de bits à geografia, de microcontroladores a cidades, de materiais a território) para expandir as fronteiras da arquitetura e design e enfrentar os desafios enfrentados pela humanidade. [tradução nossa]

Barcelona sediou, em outubro de 2019, o Congresso do IASS⁵⁴ - *International Association for Shell and Spatial Structures*⁵⁵. Dentre as atividades realizadas, houve uma palestra no IAAC, em que foram apresentados os principais projetos desenvolvidos pelo instituto e uma visita aos laboratórios e equipamentos constituintes do Fab Lab Barcelona.

O IAAC está organizando em quatro departamentos, todos eles dedicados à pesquisa, educação, produção e divulgação:

- *The Advanced Architecture Group*⁵⁶
- *The Fab Lab Barcelona*⁵⁷
- *The Urban Sciences Lab*⁵⁸
- *The Valldaura Self-sufficient Labs*⁵⁹

⁵⁴ Para maiores informações, consultar: <https://iass-structures.org/>

⁵⁵ O Anexo III traz algumas informações referentes ao Congresso IASS 2019

⁵⁶ Grupo de Arquitetura Avançada, dirigido por Areti Markopoulou

⁵⁷ Fab Lab Barcelona, dirigido por Tomás Diez

⁵⁸ Laboratório de Ciências Urbanas, dirigido por Willy Müller

⁵⁹ Laboratório Auto-suficiente de Valldaura, dirigido por Vicente Guallart

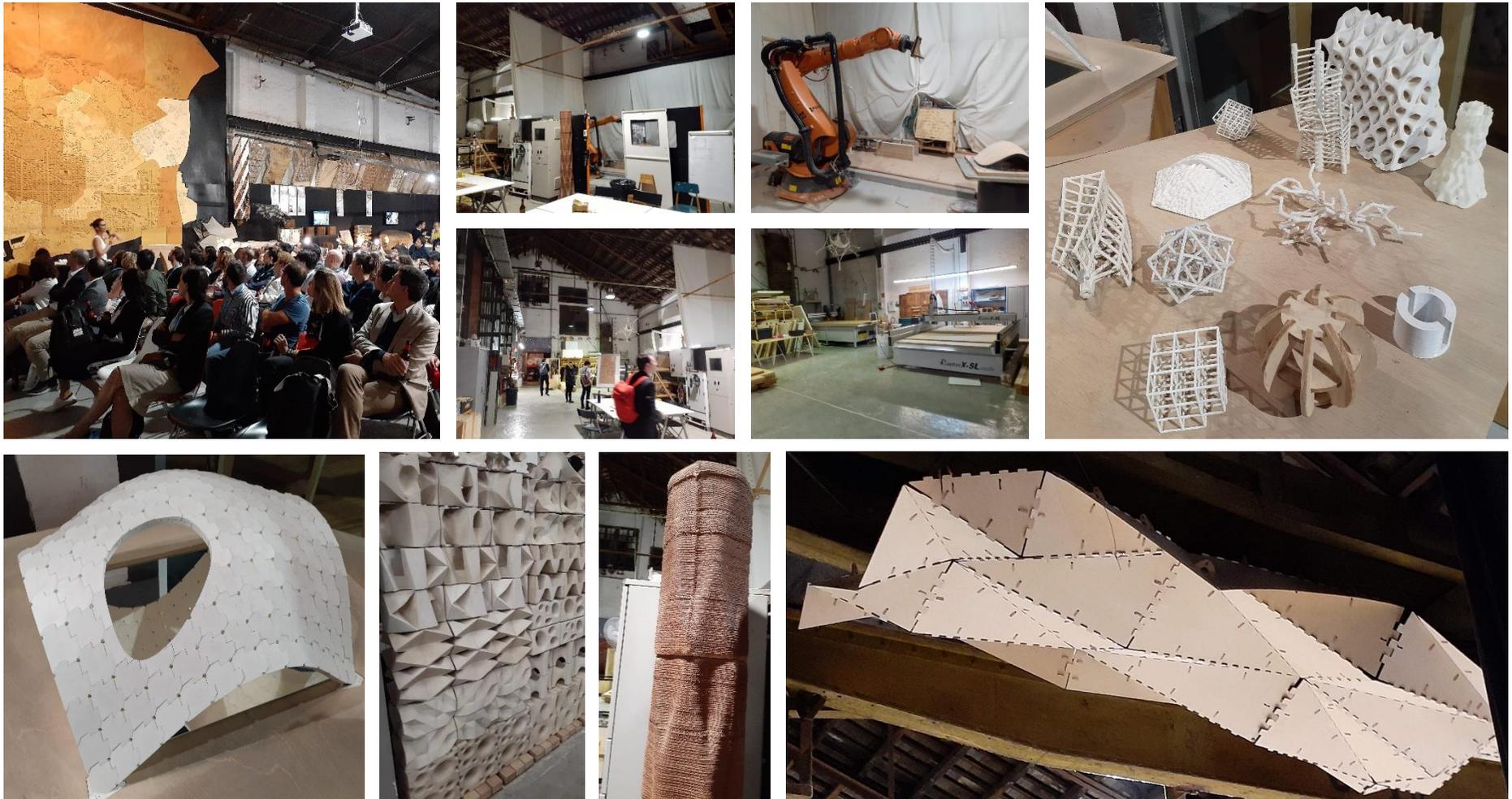


Figura 130: IAAC, Barcelona. Palestra realizada durante Congresso do IASS [International Association for Shell and Spatial Structures]. Protótipos do IAAC, Barcelona. Fonte: Autora (2019).

4.3 GRUPOS DE PESQUISA

Embora não façam parte da Rede Fab Lab, os laboratórios: LAPAC [UNICAMP]⁶⁰, LCC [FAU]⁶¹, GISE [POLI]⁶² e DFL [FAUP]⁶³ serão aqui mencionados por se tratar de grupos de pesquisa, vinculados às respectivas universidades, sendo referência nas investigações acerca dos temas relacionados às ferramentas e tecnologias digitais voltadas à Arquitetura, Urbanismo e Engenharia.

Na UNICAMP, sob coordenação da Prof^a. Dra. Gabriela Celani, há o Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção [LAPAC]. E, o PLASMA⁶⁴, um espaço de *coworking* e fabricação digital.

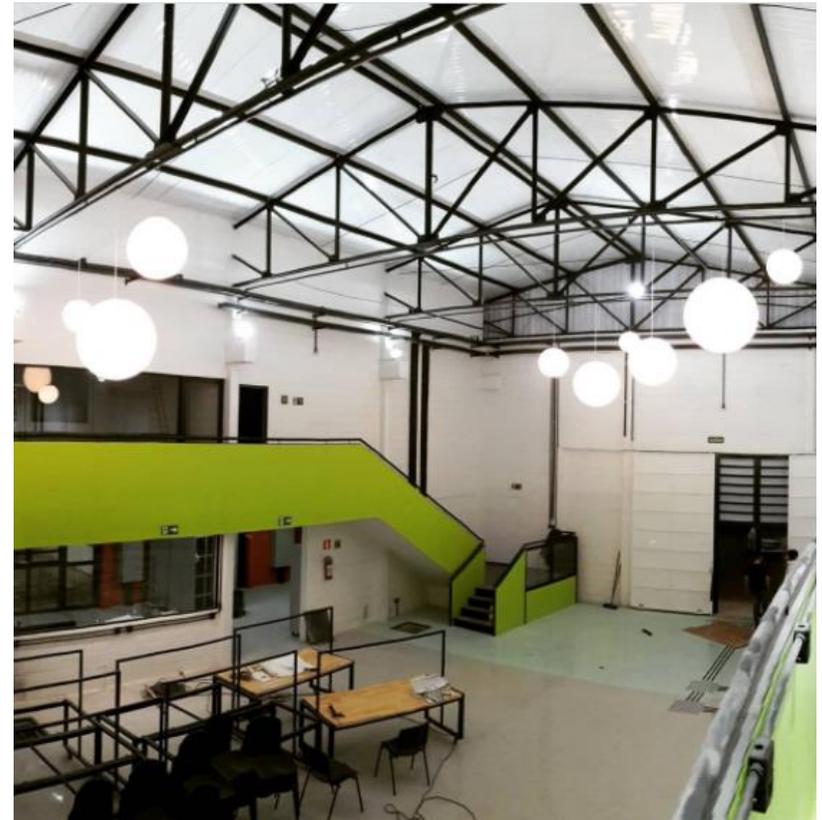


Figura 131: PLASMA. Fonte: Unicamp (2020) adaptado pela autora (2020).

⁶⁰ Universidade Estadual de Campinas

⁶¹ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo

⁶² Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

⁶³ Faculdade de Arquitectura, Universidade do Porto, Portugal

⁶⁴ Para maiores informações, consultar:

<https://www.unicamp.br/unicamp/eventos/2019/06/13/plasma>

Coordenado pelo Prof. Dr. Reginaldo Ronconi, o LCC – Laboratório de Culturas Construtivas – da FAU USP, desenvolve pesquisas criando um diálogo entre o LAME, o Canteiro Experimental e disciplinas da Graduação e Pós-Graduação, suscitando experimentações e possibilitando investigações no campo da Arquitetura, Urbanismo e Engenharia.



Figura 132: Protótipos de estudo: Canteiro Experimental FAUUSP e LCC - Laboratório de Culturas Construtivas, Prof. Reginaldo Ronconi. Fonte: Autora (2018).

O Grupo de Inovação em Sistemas Estruturais – GISE⁶⁵ – coordenado por: Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, Prof^a. Dra. Leila Meneghetti e Prof. Dr. Luis Bitencourt Jr. – atua na interface entre engenharia de estruturas e arquitetura.



Figuras 133 e 134: Trabalhos da Pós-Graduação, POLI, Prof. Ruy Pauletti. Fonte: Autora (2019).

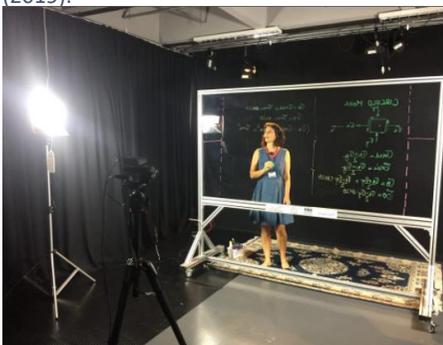


Figura 135: Estúdio *Lightboard*. Fonte: Gise (2020) adaptado pela autora (2020).



Figura 136: Logotipo GISE. Fonte: Marcello Nass Ruggiero - adaptado pela autora (2020).

Os projetos de pesquisa combinam o desenvolvimento e a aplicação dos métodos algorítmicos de projeto, modelagem paramétrica e otimização, para explorar temas como a morfologia estrutural, os novos materiais, as diversas ações estruturais, a 'pegada ecológica' e a sustentabilidade dos sistemas. Além das simulações, realizamos ensaios experimentais e protótipos de sistemas estruturais não usuais, empregando recursos de CAD/CAM e prototipagem rápida em parceria com o LEC (Laboratório de Ensino de CAD) e LEM (Laboratório de Estruturas e Materiais). (GISE, 2020).

⁶⁵ Para maiores informações, consultar: <http://gise.poli.usp.br>

Digital Fabrication Laboratory - DFL- coordenado pelo Prof. Dr. José Pedro Sousa – pertencente à Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Portugal.

The Digital Fabrication Lab (DFL) is the Research Group of CEAU/FAUP dedicated to investigate the use of computational design and fabrication technologies in the design and construction fields. Based in Porto, it departs from the City's and the School's unique cultural and architectural environments to frame and promote its technology-based research work at the global scale.⁶⁶ (DFL, 2020)⁶⁷.

Dentre os equipamentos CNC, disponíveis no laboratório, há o braço robótico.



Figura 137: Faculdade de Arquitectura - Universidade do Porto. Fonte: Autora (2019)

⁶⁶ O Digital Fabrication Lab (DFL) é o Grupo de Pesquisa do CEAU / FAUP dedicado a investigar o uso de tecnologias de design e fabricação computacional nas áreas de design e construção. Com sede no Porto, parte dos ambientes culturais e

arquitetônicos únicos da Cidade e da Escola para enquadrar e promover o seu trabalho de investigação de base tecnológica à escala global [tradução nossa].

⁶⁷ Para maiores informações, consultar: <https://df1.arq.up.pt/>

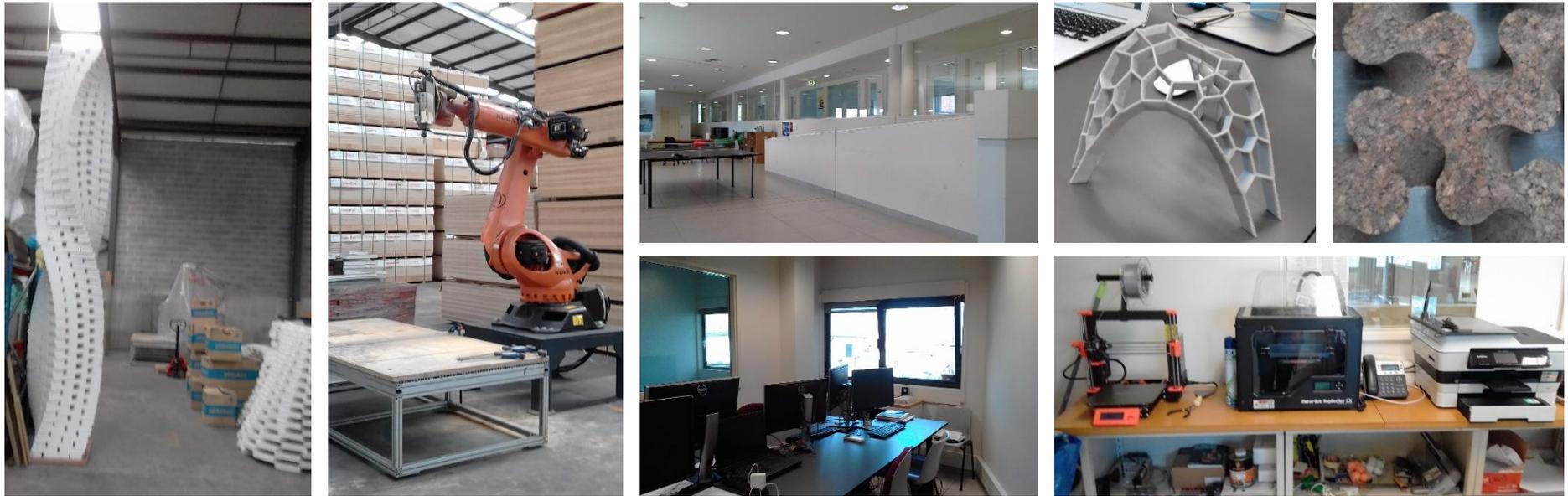


Figura 138: DFL - laboratório e equipamentos. Fonte: Autora (2019).

Com a bolsa PROEX-CAPES, houve a oportunidade de realizar o intercâmbio à Universidade do Porto, em 2019, e desenvolver algumas das etapas desta tese, no DFL, incluindo experimentos com a impressora 3D [que serão demonstrados no capítulo 5] e protótipos, utilizando braço robótico [que serão apresentados no capítulo 6].

4.4 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

(...) precisamos compreender profundamente os processos de fabricação digital, para que possamos projetar detalhes apropriados para as técnicas de produção automatizadas disponíveis. (CELANI, 2018).⁶⁸

De acordo com Dunn (2012), os processos para fabricação digital podem ser classificados em quatro categorias: corte, subtrativa, aditiva e formativa.

⁶⁸ <https://www.archdaily.com.br/br/886854/7-mitos-sobre-detalhamento-que-estao-mudando-na-era-digital>

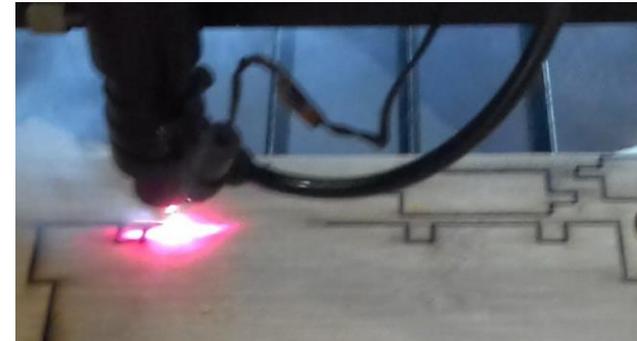


Figura 139: Técnica de corte, CNC laser. Fonte: Autora (2018).



Figura 140: Técnica subtrativa, fresadora CNC. Fonte: Autora (2017).

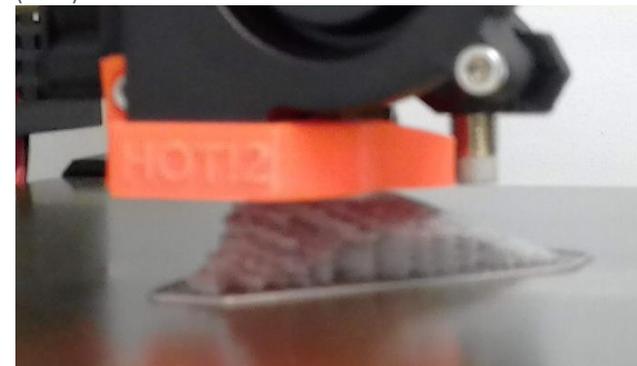


Figura 141: Técnica aditiva, impressora 3D. Fonte: Autora (2019).

4.4.1 TÉCNICAS DE CORTE

As máquinas CNC de corte produzem elementos planos, a partir de desenhos bidimensionais, gerados por *softwares* CAD. Os materiais e espessuras possíveis, para corte, variam de acordo com o tipo do equipamento. Atualmente, existem: cortadoras a laser, a jato d'água e corte a plasma.

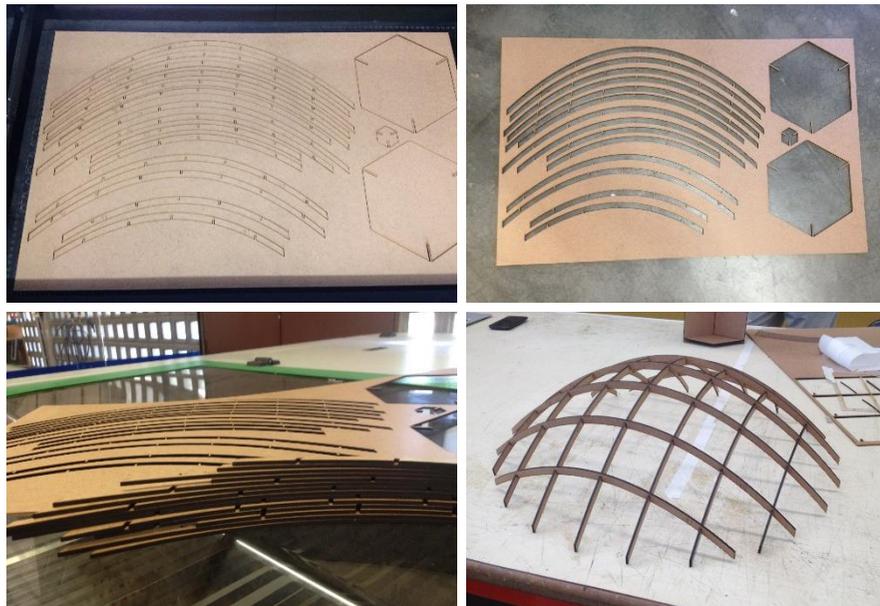


Figura 142: MDF (3mm de espessura) cortados na CNC laser. Fonte: Autora (2016).

As cortadoras a laser permitem o corte de materiais, com até 16 mm de espessura, dentre eles: MDF, bambu laminado, alguns tipos de papéis, papelão, tecidos e acrílico. A dimensão da área de corte varia em função do tamanho da máquina, de acordo com o fabricante.

As máquinas de corte a jato d'água, são utilizadas para corte de vidro, chapas metálicas e rochas. Tem alta precisão (0,1 mm) e possibilitam por exemplo, o corte de placas de titânio com espessuras de até 38 mm.

Os equipamentos de corte a plasma, utilizam um arco elétrico e gás comprimido; como atingem temperaturas muito elevadas, são capazes de cortar materiais como: aço carbono, alumínio, aço inoxidável, dentre outros metais, cujas espessuras podem variar entre 1 e 80 mm.

4.2 TÉCNICAS SUBTRATIVAS

Nesta técnica, de fabricação digital, o produto é obtido a partir da remoção de partes do material; que são desbastadas pelas ferramentas – denominadas fresas – acopladas à fresadora⁶⁹ CNC ou braço robótico.

Diversos materiais podem ser utilizados, dentre os principais, estão: madeira compensada, MDF, acrílico, alumínio, poliuretano, cortiça, bambu laminado e poliestireno expandido.

Estes equipamentos, podem utilizar duas dimensões, duas dimensões e meia (quando o eixo z é limitado e não produz peças com geometria complexa) e três dimensões. (BORÇATO, 2020).

Há, ainda, os braços robóticos, capazes de produzir modelos tridimensionais complexos, pois possuem até seis eixos.

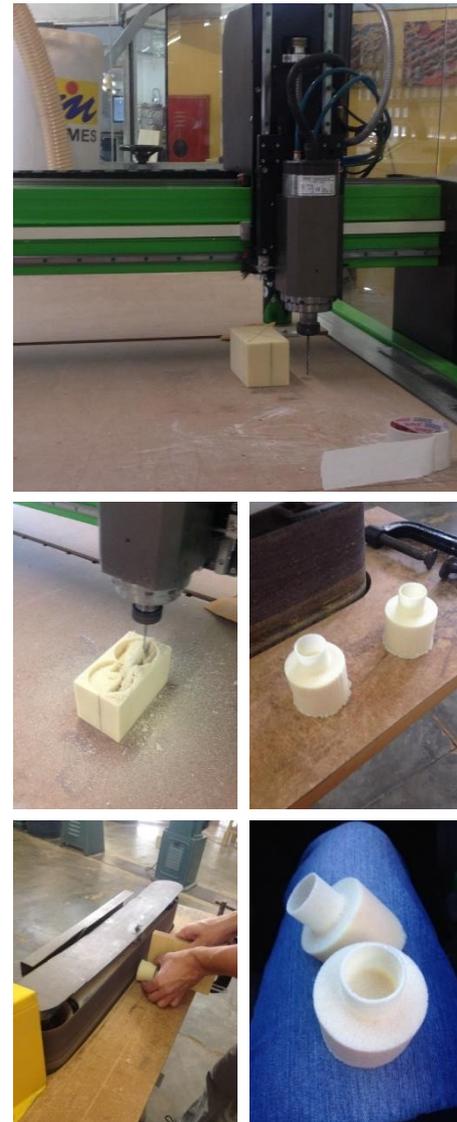


Figura 143: Técnica subtrativa. Fonte: Autora (2016).

Como exemplo de utilização de uma técnica de fabricação digital - subtrativa - realizou-se esta experimentação, LAME – FAUUSP. Cortou-se um bloco maciço de poliestireno, na fresadora CNC. O desenho da peça final consistia numa base cilíndrica maciça, cuja parte superior era constituída por um cilindro oco, cujas paredes tinham 1 mm de espessura. A máquina fez todo o processo de subtração do material, até atingir a forma desejada. O desenho foi realizado no *software Rhinoceros* e exportado para a CNC. Como acabamento, foi necessário apenas lixar as rebarbas da base do cilindro.

⁶⁹ Router CNC

4.2.1 TÉCNICAS ADITIVAS

As técnicas aditivas, têm como princípio a sobreposição de sucessivas camadas de material, até a conformação total do objeto em três dimensões.

Os modelos de impressoras 3D variam de acordo com os materiais que são utilizados para a confecção do objeto.

De acordo com Borçato (2020)⁷⁰, podem ser classificados nas seguintes categorias:

- **Sólidos:** FDM⁷¹ (*fusion deposition modeler*) e MJM⁷² (*multi jet modeling*);
- **Pó:** SLS⁷³ (*selective laser sintering*), 3DP⁷⁴ (*3D printer*);
- **Líquidos:** SLA⁷⁵ (*stereolithography apparatus*), PolyJet⁷⁶
- **Lâminas:** LOM⁷⁷ (*laminated object manufacturing*); PLT⁷⁸ (*paper lamination technology*).

⁷⁰ disciplina Fabricação Digital, curso de Pós-Graduação: Arquitetura e Projeto na Era Digital, Unyleya, idealizado e coordenado pela autora.

⁷¹ FDM = modelagem por fusão e deposição, ou método de extrusão, tem como principais materiais: ABS e EPL, denominados filamentos e vendidos em bobinas; são utilizados nas impressoras 3D.

⁷² MJM = modelagem por jato de tinta; os materiais utilizados são epóxi ou silicone; pequenas partículas de material são derretidas e pulverizadas sobre a plataforma da impressora 3D.

⁷³ SLS = sinterização seletiva a laser; o pó transformasse em sólido após aquecimento proveniente da fonte de laser; os materiais podem ser: plásticos, metais, nylon, poliamida, fibra de carbono, gesso e cerâmica.

⁷⁴ 3 DP = um líquido catalizador (*blinder*), proveniente do cabeçote de impressão, é depositado sobre o pó, realizando um processo de aglutinação. É necessário

aguardar o tempo de cura e estabilização. Os materiais podem ser: cerâmica, metal, gesso e materiais à base de amido.

⁷⁵ SLA = aparato de estereolitografia; este processo consiste na solidificação de uma resina, por meio da luz. São utilizados suportes temporários; e é necessária cura da peça em forno ultravioleta.

⁷⁶ tecnologia de impressão 3D capaz de produzir peças com resolução de camadas microscópica e precisão de até 0,014 mm.

⁷⁷ LOM = manufatura por objeto laminado; lâminas de metal são cortadas com laser e fundidas por calor e pressão, com um rolo térmico.

⁷⁸ PLT = tecnologia por laminação de papel; uma faca corta as lâminas de papel, que são unidas por pressão e calor, com um rolo térmico. Como material são utilizados papéis com adesivo.



Figura 144: Objeto feito por impressão 3D. Fonte: Autora (2016).

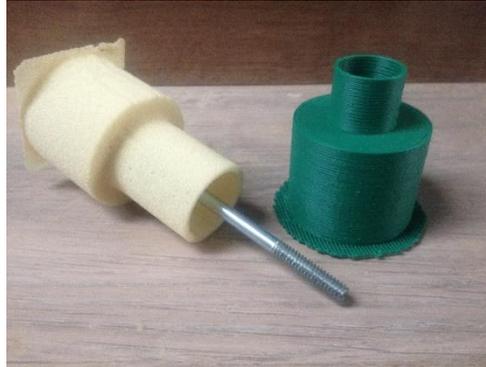


Figura 145: O mesmo objeto confeccionado na fresadora CNC [esquerda] e na impressora 3D [direita]. Fonte: Autora (2016).

Como forma de investigar as características de cada equipamento, realizou-se – no LAME, FAU USP – a impressão 3D de um objeto com as mesmas características daquele que fora confeccionado na fresadora CNC; base cilíndrica maciça, e cilindro oco sobre ela. Nos dois casos, o único acabamento necessário, foi a retirada de resíduos da base do cilindro, como demonstram as imagens acima [figuras 144 e 145].

As resistências das peças variam de acordo com os materiais utilizados; mas, neste experimento o que se buscava investigar, eram a fidelidade de produção da peça, de acordo com o desenho proposto; e, precisão do acabamento. A escolha do poliestireno, foi no sentido de verificar a precisão da fresadora CNC para realizar uma parede, com espessura mínima, em um material muito frágil. E a impressão 3D utilizou os filamentos disponíveis no laboratório.

Dentre as técnicas aditivas, há a impressão 3D de materiais como argila e concreto, utilizando braço robótico. O IAAC e o ETH Zurich têm realizado pesquisas muito promissoras, investigando as possibilidades de aplicação da impressão 3D empregando estes materiais: o IAAC com argila; e o ETH com concreto.

4.2.2 TÉCNICAS FORMATIVAS

A técnica formativa necessita de um molde, que propiciará a forma final do elemento a ser confeccionado, em um material distinto. Normalmente esta técnica é utilizada para a reprodução de peças idênticas, em larga escala, a partir de uma matriz única.

Entretanto, é possível valer-se deste método para a execução de elementos distintos, componentes de um mesmo projeto, como será apresentado no exemplo a seguir.

4.3 EXEMPLOS DE FABRICAÇÃO DIGITAL APLICADOS À ARQUITETURA

4.5.1 TÉCNICA DE CORTE E TÉCNICA FORMATIVA APLICADAS À ARQUITETURA

Projeto do escritório de arquitetura de Bernard Franken, em parceria com o escritório de engenharia Bollinger + Grohmann (B+G), o edifício '*The Bubble*' foi concebido para ser o pavilhão de exposições da BMW em Frankfurt [1999] e em Munique [2000].

The Bubble was one of the first structure
in the world which was completely created
with digital means, from the design
through to construction.⁷⁹

(FRANKEN,2020).⁸⁰

⁷⁹ 'A bolha' foi uma das primeiras estruturas do mundo totalmente criada em meios digitais, desde o projeto à construção [tradução nossa].

⁸⁰ Para mais informações, consultar: <http://www.franken-architekten.de>

É um exemplo de aplicação da técnica formativa aplicada à arquitetura, uma vez que os componentes de acrílico foram deformados termicamente sobre moldes de espuma de poliuretano. Para confecção dos moldes, utilizou-se a técnica subtrativa. Além destas, também, empregou-se a técnica de corte, com CNC de três eixos, para execução das peças de alumínio constituintes da estrutura.



Figura 146: Vista externa: edifício 'The Bubble'. Fonte: Franken (2020) adaptado pela autora (2020).

A configuração da estrutura foi definida visando atender às seguintes premissas: forma resultante da união de duas bolhas de ar e permeabilidade da luz. A intenção do projeto é transmitir o conceito de energia limpa e sustentabilidade na indústria automobilística; por isso, a conformação do pavilhão faz alusão às bolhas de ar, remetendo ao hidrogênio, como energia renovável.

Foi usado um programa de simulação (*Alias WaveFront*) baseado em forças físicas, através do qual se procurou criar uma forma dinâmica de duas bolhas unindo-se sobre a influência da gravidade. A superfície ou a "pele" procura expressar o frágil balanço entre a pressão interna e tensão superficial, característica das bolhas de ar. (HENRIQUES, 2005).

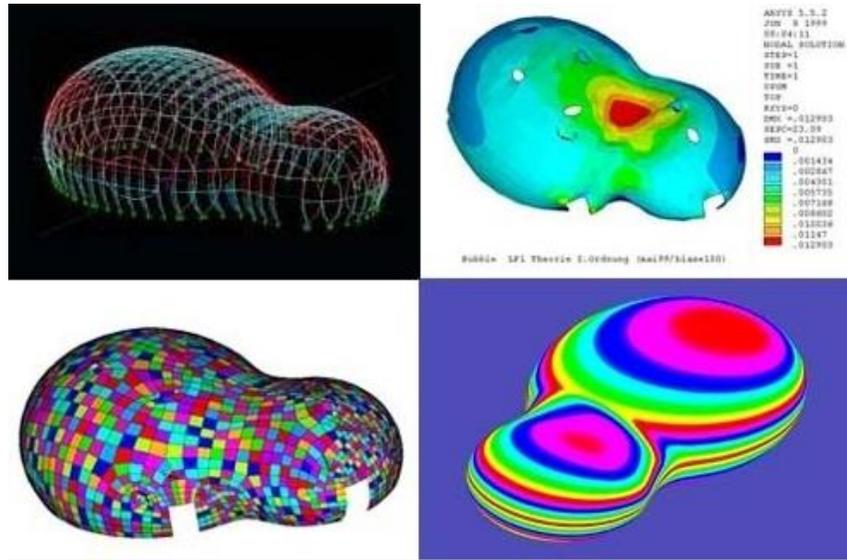


Figura 147: Simulações digitais do projeto: *'The Bubble'* Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).

Para atender às premissas, a estrutura – uma malha reticulada - foi desenvolvida por meio de chapas de alumínio, que foram previamente cortados na CNC e transportados ao local, para montagem. As peças têm dimensões de 230 x 24 mm, sendo constituídas por três camadas de alumínio [de 8 mm de espessura]. Este tipo de estrutura e sistema construtivo, possibilitam a desmontagem e remontagem do edifício em outro local; como, de fato, ocorreu com este pavilhão de exposições. Segundo Henriques (2005), este conceito denomina-se desconstrução.



Figura 148: Protótipo do projeto: *'The Bubble'* Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).



Figura 149: Execução do projeto: *'The Bubble'* Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).

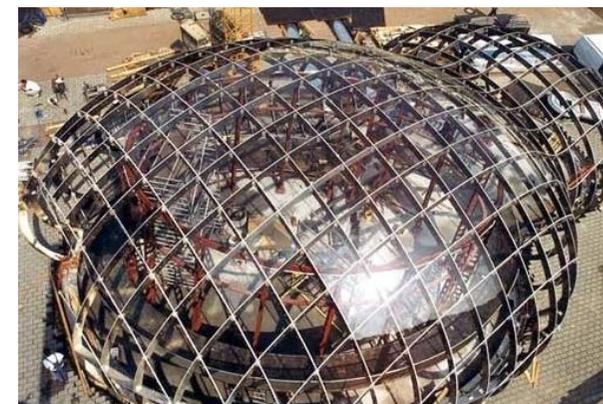


Figura 150: Execução do projeto: *'The Bubble'* Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).

A figura 151 mostra o processo de corte, na máquina CNC, das chapas metálicas que constituem os pórticos da estrutura do edifício, como podem ser observados na figura 155. As placas de acrílico, que compõem a vedação do edifício, foram confeccionadas em duas etapas: a primeira, constituiu-se na execução dos moldes de poliuretano – pela técnica de subtração - na fresadora CNC, como demonstram a figura 152 [durante o processo de subtração] e a figura 153 [o molde já finalizado]. Na segunda etapa, as placas de acrílico foram moldadas termicamente nos moldes de poliestireno, conforme apresentados na figura 154. As peças de acrílico têm espessura de 10 mm e dimensões médias de 1 a 1.7 m².



Figura 151: Corte das chapas metálicas. Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).



Figura 152: Confeção de moldes: técnica de subtração. Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).



Figura 153: Moldes para subtração. Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).

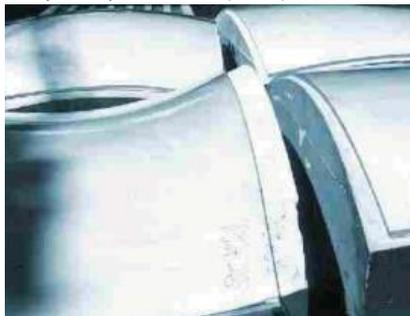


Figura 154: Moldagem do acrílico: técnica formativa. Fonte: Henriques (2005) adaptado pela autora (2020).



Figura 155: Edifício 'The Bubble'. Fonte: Franken (2020) adaptado pela autora (2020).



Figura 156: Vista noturna do edifício 'The Bubble'. Fonte: Franken (2020) adaptado pela autora (2020).

Cada pórtico é composto por três unidades aparafusadas entre si, transmitindo os esforços diretamente às fundações através de ligações mecânicas. As fundações são constituídas por uma viga de cintagem periférica, estabilizada por vigas transversais. As placas de acrílico foram fixadas à estrutura por intermédio de peças de interligação, aparafusadas no topo dos perfis entre os painéis, assegurando alguma mobilidade do conjunto. (HENRIQUES, 2005).

4.5.2 TÉCNICA ADITIVA APLICADA À ARQUITETURA

A impressão 3D – ou técnica aditiva – tem se mostrado viável, como método construtivo, a ser implementado na arquitetura. De acordo com Maganga (2021), em 2013, a empresa chinesa, a WinSun, imprimiu dez casas em um período de vinte e quatro horas, sendo uma das primeiras empresas a ter este desempenho usando a tecnologia de impressão 3D. Em 2018, uma família na França foi a pioneira a morar em uma casa impressa em 3D. A cidade de Dubai tem a meta de que, até 2025, 25% de seus edifícios sejam impressos em 3D.

Estes são, apenas, alguns dos exemplos que demonstram a disseminação e implementação desta tecnologia aplicada à arquitetura.

Uma das possibilidades de aplicação desta técnica, se dá na execução de projetos de habitação acessíveis, uma vez

que a impressão rápida das paredes, traz a vantagem de diminuição do tempo de execução da obra, bem como redução de desperdícios de materiais e margem de erro menor, em relação ao projeto. As questões técnicas e estéticas, intrinsecamente relacionadas, estão avançando no sentido de surgir uma identidade de linguagem apropriada ao material, explorando as características oriundas da técnica, sem suprimir questões plásticas e quesitos de conforto ambiental.

Um dos exemplos, desta vertente de arquitetura, foi realizado na cidade de Tabasco, sul do México, em 2019. É um projeto⁸¹ para famílias que vivem abaixo da linha de pobreza e que mais tarde se tornará uma comunidade de 50 moradias.

⁸¹ Realizado pela empresa de tecnologia de construção ICON em colaboração com a organização, sem fins lucrativos, New Story e contribuição do designer Yves Béhar.

O material de impressão, das habitações, é uma mistura de concreto local, que lhes confere característica de textura branca. Utilizam a impressora "Vulcron II"⁸² que, de acordo com a ICON (2021), foi especificamente projetada para os desafios de impressão em áreas rurais com recursos limitados. As casas impressas em 3D são constituídas por dois dormitórios, sala, cozinha e banheiro. Co-projetadas com participação das famílias, que irão habitá-las, as casas foram criadas para atender às necessidades específicas da comunidade. Situadas dentro de uma zona sísmica, foram projetadas considerando os requisitos de segurança, além do padrão estabelecido, incluindo fundações robustas, para garantir a longevidade das habitações.



Figura 157:Fotos externas e internas: casa impressa em 3D com concreto. Fonte: ICON (2021) adaptado pela autora (2021).

⁸² Para maiores informações, consultar: <https://www.iconbuild.com/>

Além do concreto, as impressoras 3D podem utilizar outros materiais, como: metal, plástico e argila, dentre outros. A seguir, alguns projetos que se valeram da técnica de manufatura aditiva para execução.



Figura 158: Ponte de metal impressa em 3D. Fonte: Archdaily (2021) adaptado pela autora (2021).

Concluído em 2021, o projeto desta ponte, em Amsterdã, teve início em 2015 e utilizou técnicas de *design* generativo e otimização topológica. A combinação dessas tecnologias permitiu maior liberdade formal e considerável redução de material empregado.

MX3D é uma tecnologia, patenteada, de impressão 3D utilizando metal. O processo consiste na sobreposição de camadas de metal, que vão sendo soldadas umas às outras.

Arquitetura: Joris Laarman Lab / Engenharia: Arup, MX3D



Figura 159: Portal de entrada, de plástico, impresso em 3D. Fonte: Archdaily (2021) adaptado pela autora (2021).

O portão leste do parque temático, em Nanjing, na China, foi finalizado em novembro de 2020. Sua estrutura, desenvolvida utilizando *form-finding*, é constituída por uma malha de aço e revestida por uma superfície, de plástico modificado, impressa em 3D. Apenas a superfície plana do telhado é recoberta com GRP.

Arquitetura: Archi-Union Architects



Figura 160: Parede de argila impressa em 3D. Fonte: IAAC⁸³ (2021) adaptado pela autora (2021).

Digital Adobe é uma pesquisa sobre *Adobe 3D Printing para Performative Habitat*. A pesquisa foi concluída com a construção de um protótipo 1:1 de uma parede performativa que adapta sua morfologia às necessidades estruturais e climáticas localizadas.

Digital Adobe é uma pesquisa inovadora voltada para a produção de soluções arquitetônicas com materiais naturais e impressão 3D. A tecnologia, desenvolvida no programa de pós-graduação em pesquisa aplicada *Open Thesis Fabrication*, permite customizar a forma de um edifício em múltiplas escalas, por meio do uso de modelagem paramétrica e métodos de avaliação de desempenho, no desenvolvimento do projeto. A pesquisa, também, desenvolve métodos de construção e uso de materiais eficientes: a robótica no local permite o uso de materiais locais e naturais para a construção. (IAAC, 2021).

As pesquisas do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC) foram desenvolvidas no programa *Open Thesis Fabrication* (OTF) 2017-18, em colaboração com Windmill e LaSalle, juntamente com o apoio de Nanosystems, ArtCon e SmartCitizen.

⁸³ Para maiores informações: consultar: <https://iaac.net/project/digital-adobe/>

4.5.3 TÉCNICA SUBTRATIVA APLICADA À ARQUITETURA

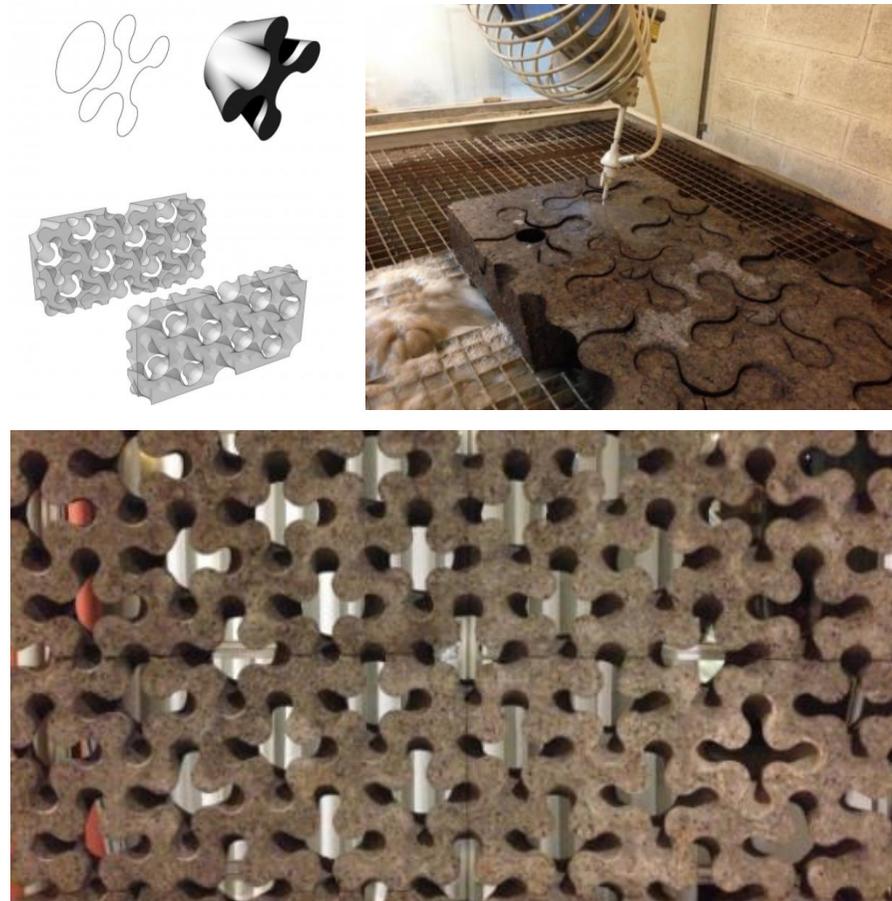
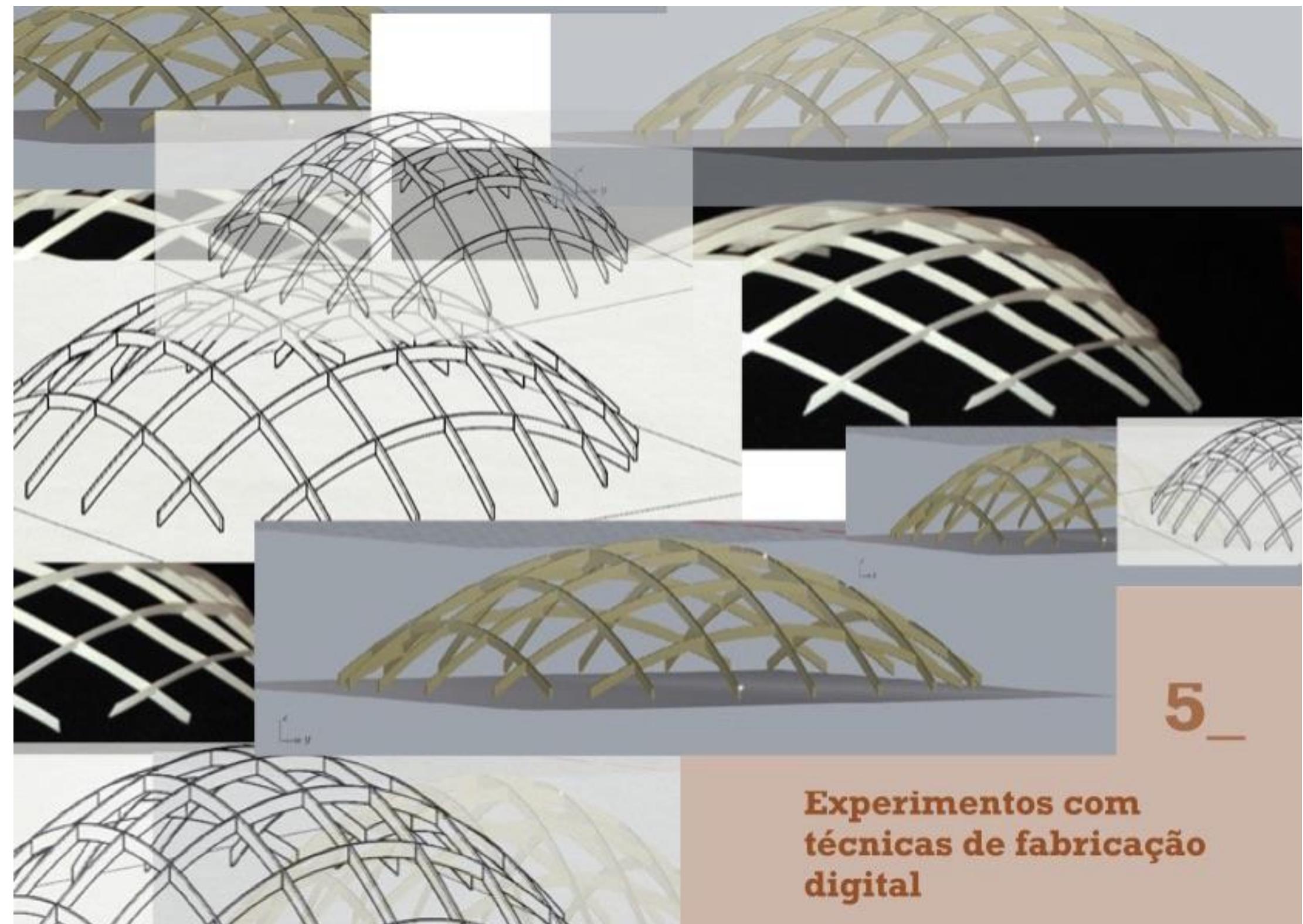


Figura 161: Técnica subtrativa: parede de cortiça. Fonte: DFL (2021) adaptado pela autora (2021).

A *Clover Wall* fez parte da instalação “*Now & Next*” desenvolvida para a 5ª Conferência Internacional de Isolamento de Cortiça em Lisboa, em 2014. Teve como premissa desvendar diferentes possibilidades de utilização da cortiça na arquitetura através das tecnologias de fabricação digital. A parede, tem dimensões de 2 × 2 metros. Para desafiar a produção robótica, o desenho das aberturas foi definido pela geometria da superfície regulada resultante da elevação de um círculo com contorno de trevo. Considerando que as máquinas CNC de 3 eixos não podiam fabricar tais perfurações, a experiência utilizou um sistema de corte a jato d’água montado num robô na empresa CEIIA, no Porto. Uma experiência posterior, com o fresamento robótico, facilitou a extração da peça interna resultante, devido à espessura da ferramenta de fresagem. Além disso, este último processo de fabricação mostrou-se mais flexível, para produzir uma gama mais ampla de soluções geométricas.

A instalação *Clover Wall* demonstrou a possibilidade de produzir divisórias interiores - em cortiça - com permeabilidade visual variável, tirando partido das propriedades acústicas deste material natural. (DFL, 2021).

Exemplos recentes têm demonstrado a viabilidade de incorporação de técnicas de fabricação digital e automação, à arquitetura. Ainda se faz necessário o aprofundamento de alguns aspectos acerca destas novas ferramentas e adaptações aos materiais. Questões referentes às normas técnicas e aplicabilidade destes métodos, *in loco*, são algumas das questões suscitadas. Entretanto, muitas respostas já foram encontradas, principalmente em relação à transposição da escala reduzida, de modelos e protótipos realizados nos laboratórios de pesquisa, à escala real. Foram apresentados exemplos de arquiteturas concebidas e executadas, utilizando-se ferramentas e tecnologias digitais. A congruência entre as especificidades humanas e robóticas possibilitam a exploração de novas maneiras de concepção e concretização da arquitetura. Novas respostas surgirão, como decorrência às demandas complexas que se apresentam. Inevitavelmente, questões como a minoração de desperdício de materiais, bem como a utilização de materiais naturais, atrelados à necessidade de habitações dignas, são temas que requerem prioridade, e estão indissociados do tema urgente que, de fato, é a sustentabilidade.



5_

Experimentos com técnicas de fabricação digital

5_EXPERIMENTOS COM TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DIGITAL

Durante o percurso de desenvolvimento desta tese, uma etapa fundamental, ao entendimento dos processos e equipamentos de fabricação digital, deu-se por meio de experimentos práticos realizados em diferentes laboratórios.

A seguir serão apresentados protótipos realizados por meio das seguintes técnicas:

- Técnica de corte: CNC laser;
- Técnica aditiva: impressão 3D;
- Técnicas subtrativas: fresadora CNC e braço robótico.

5.1 ESTUDO DE UMA ESTRUTURA RETICULADA

A utilização de *softwares* de desenho paramétrico – para o desenvolvimento de projetos – aliada ao emprego de máquinas CNC, permitem extrapolar as configurações de peças padronizadas, cartesianas; pode haver um projeto, cujas peças são diferentes entre si, sem onerar demasiadamente seu custo de execução. As máquinas automatizadas, executam os cortes de forma simples e precisa, possibilitando trabalhos cujas peças tenham encaixes específicos.

Visando uma apropriação das ferramentas e técnicas digitais, optou-se como primeiro estudo uma estrutura reticulada, a partir de uma geometria simples. Para tirar partido desta solução estrutural há que se pensar no detalhamento acurado: como serão as emendas, encaixes e intersecções. Paralelamente ao desenvolvimento de formas eficientes e de recortes adequados, além do estudo do desempenho com relação à rigidez, estabilidade e resistência; também há a

questão dos detalhes construtivos. Esta apropriação do uso da linguagem da fabricação digital deu-se, em grande parte, através das disciplinas cursadas no Programa de Pós-graduação da FAUUSP. “Arquitetura Extrema: Concepção e Construção de Projetos com Alto Desempenho”, ministrada pelo Prof. Dr. Arthur Hunold Lara, possibilitou o primeiro contato com os *softwares* de desenho paramétrico, contribuindo para o andamento desta pesquisa, resultando na concepção de um projeto e execução de protótipo, no LAME, Laboratório da FAU-USP. A programação do *plug-in Grasshopper* – adaptada pelo engenheiro Fernando Simões – possibilita a alteração dos parâmetros dos elementos da estrutura, bem como os parâmetros referentes aos encaixes. A interface do *software Rhinoceros* permite visualizar o modelo, simultaneamente, em 2D e 3D. Este *software* possibilita a elaboração de modelos digitais que poderão ser executados nas impressoras 3D ou cortados nas CNC fresadora e *laser*. Também permite a integração com outros *plugins* como o *Grasshopper*, por exemplo, que possibilita a parametrização do modelo.

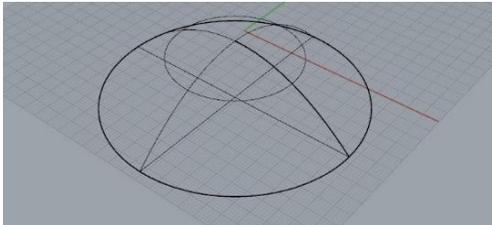


Figura 162: Concepção da forma no *software Rhinoceros*. Fonte: Autora (2016).

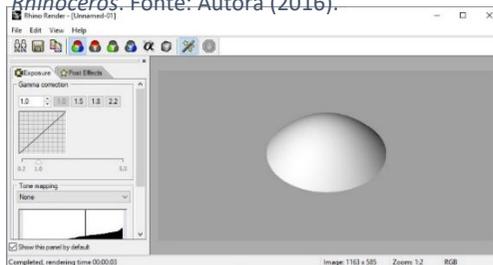


Figura 163: Concepção da forma no *software Rhinoceros*. Fonte: Autora (2016).

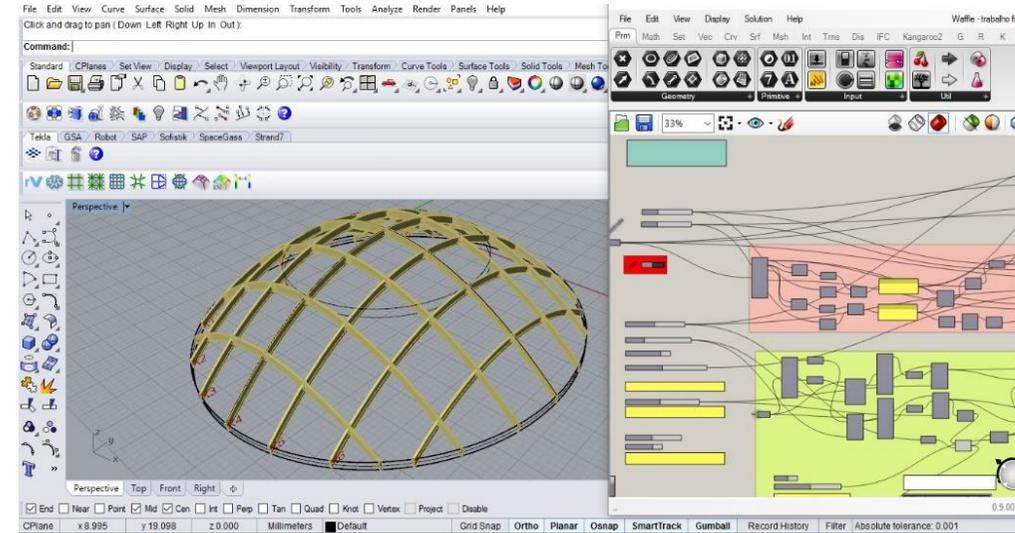


Figura 164: Definição da malha reticulada no *plug-in Grasshopper*. Fonte: Autora (2016).

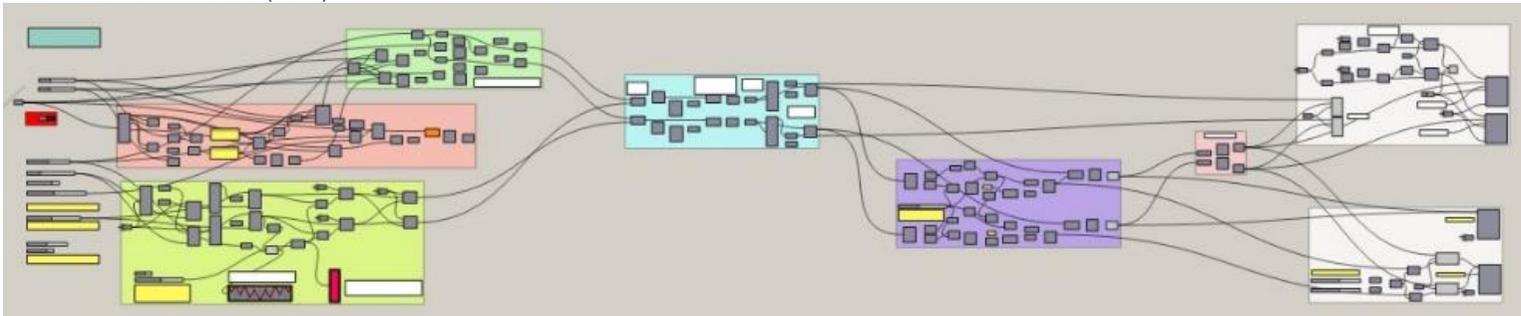


Figura 165: Algoritmo da malha reticulada no *plug-in Grasshopper*. Fonte: Autora (2016).

A figura 162 mostra o início da concepção da forma, no *software Rhinoceros*, com o desenho da geometria. À geometria escolhida, atribuiu-se uma espessura, configurando-a como uma casca [figura 163]. Em seguida, utilizando-se o *Grasshopper*, aplicou-se a programação na geometria da casca [figura 164]; este algoritmo cria uma estrutura reticulada a partir da geometria selecionada [neste caso a casca]. A figura 165 demonstra a programação completa, que permite a parametrização de vários atributos referentes à estrutura reticulada.

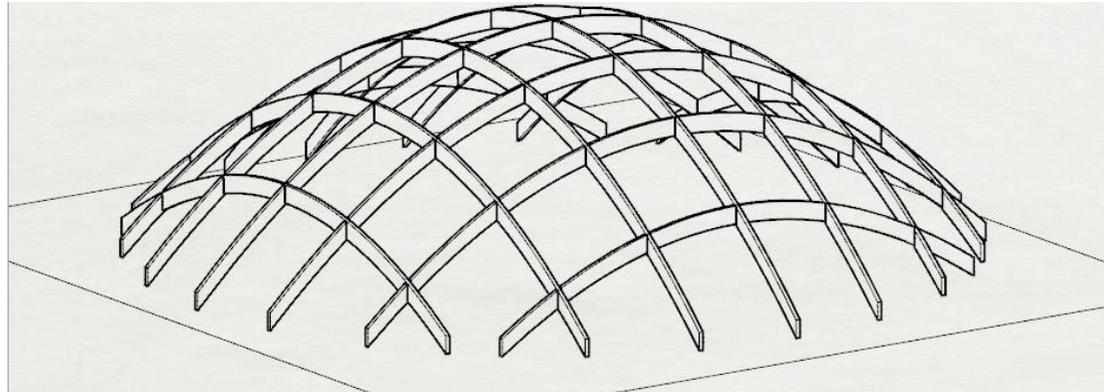


Figura 166: Estrutura reticulada no software *Rhinceros*. Fonte: Autora (2016).

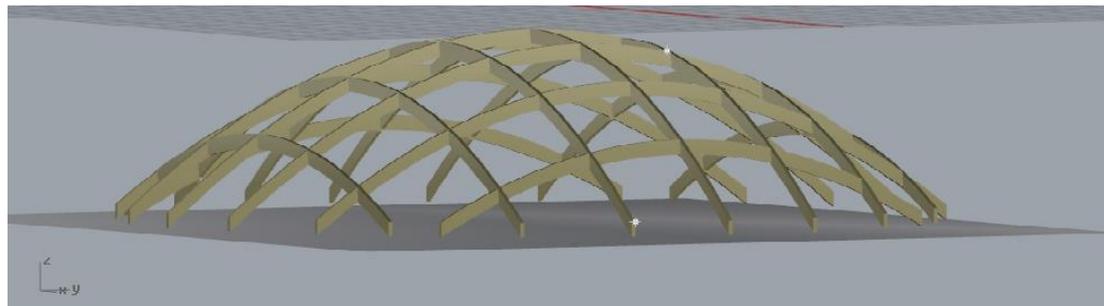


Figura 167: Estrutura reticulada no software *Rhinceros*. Fonte: Autora (2016).

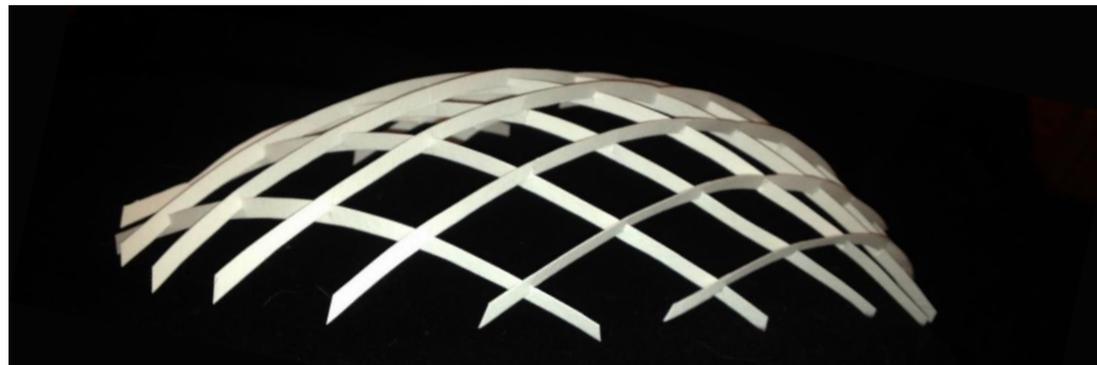


Figura 168: Estrutura reticulada – modelo físico - em papel. Fonte: Autora (2016).

As figuras 166 e 167 mostram a estrutura reticulada, após a inserção da programação na geometria da casca; desenhos tridimensionais na interface do *Rhinceros*.

A figura 168 apresenta um modelo físico – confeccionado em papel – a partir das peças planificadas, da estrutura reticulada, geradas pela programação do *Grasshopper*, sobre a geometria da casca.

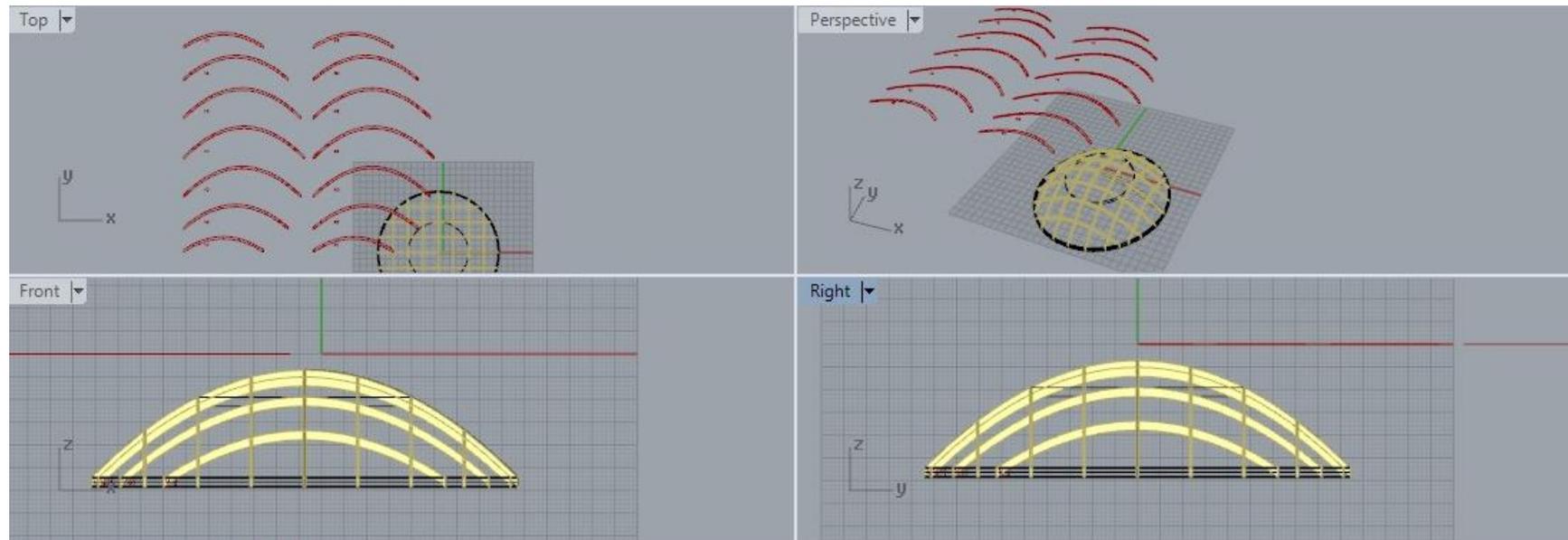


Figura 169: Estrutura reticulada no software *Rhinoceros* - com as peças planificadas para corte - obtidas por meio do algoritmo desenvolvido no *Grasshopper*. Fonte: Autora (2016).

As figuras acima apresentam a interface do *Rhinoceros*, demonstrando a aplicação do algoritmo [gerado no *Grasshopper*] na geometria desenhada inicialmente. Neste momento, a casca já está definida como estrutura reticulada. Os desenhos em vermelho, representam as peças planificadas para corte na CNC.

A figura ao lado mostra o modelo físico, cortado na CNC laser, em MDF 3 mm. As peças, dos eixos X e Y, são contínuas e as ligações perpendiculares, entre as peças, são por meio de encaixes.



Figura 170: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm. Corte à *laser* a partir dos desenhos das peças planificadas oriundas da definição do *Grasshopper*. Fonte: Autora (2016).

5.2 TÉCNICA DE CORTE: CNC LASER

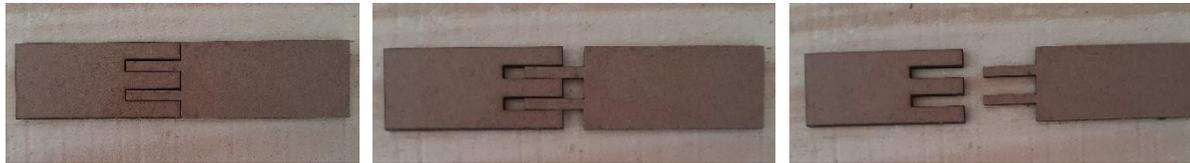


Figura 171: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser* . Encaixe de prolongamento das peças: opção 1. Fonte: Autora (2017).



Figura 172: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser* . Encaixe de prolongamento das peças: opção 2. Fonte: Autora (2017).



Figura 173: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser* . Encaixe de prolongamento das peças: opção 3. Fonte: Autora (2017).



Figura 174: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser* . Encaixe de prolongamento das peças: opção 4. Fonte: Autora (2017).

Como forma de apropriação das características dos equipamentos CNC, desenvolveu-se uma série de desenhos para ligações entre peças. São opções de ligações perpendiculares entre peças; e ligações para prolongamento das peças. Para desenvolvimentos destes desenhos, foram consideradas as espessuras dos materiais utilizados. E, para realização dos cortes, há alguns fatores que são determinantes para configuração da máquina: tipo do material e espessura. Inicialmente, as propostas de ligações foram desenhadas para testes na CNC *laser*.

Os encaixes são desenhados e cortados bidimensionalmente, seguem alguns exemplos:



Figura 175: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser*. Encaixe perpendicular entre as peças: opção 1. Fonte: Autora (2017).

Estudos de ligações, entre peças, ortogonalmente. Tipo de encaixe inspirado no projeto da Serpentine Gallery Pavilion, 2005, projetado por Álvaro Siza e Eduardo Souto de Moura.

Esta proposição difere-se, do projeto referência, pelo fato das proeminências nas peças apresentarem sempre o ângulo de 90°.

Estudos de ligações, entre peças, para prolongamento longitudinal. Solução proposta para trabalhar conjuntamente com a ligação ortogonal apresentada na página anterior. Os protótipos foram cortados em MDF, 3 mm, na CNC *laser*.



Figura 176: Modelo físico - escala reduzida – em MDF 3mm: corte CNC *laser*. Composição entre os encaixes longitudinal e ortogonal: opção 1 do encaixe perpendicular entre as peças; e opção 3 do encaixe de prolongamento das peças. Fonte: Autora (2017).

Para realização dos testes nas máquinas CNC - com bambu laminado - foi necessário utilizar-se tábuas, para alimentos, comercializadas no mercado varejista. Suas dimensões foram um fator limitante aos desenhos das peças. A característica de ser uma placa composta por duas camadas de bambu laminado, com as fibras no mesmo sentido, foi um dos fatores importantes, considerados para os testes, principalmente no que diz respeito ao fendilhamento das peças e encaixes.



Figura 177: Placa de bambu laminado 8mm: corte CNC *laser*. Processo de gravação das peças. Fonte: Autora (2018).



Figura 178: Placa de bambu laminado 8mm: corte CNC *laser*. Processo de gravação das peças. Fonte: Autora (2018).

O primeiro teste - com laminado de bambu [8 mm] - realizado na CNC *laser* utilizou as seguintes configurações da máquina:

- Velocidade=7
- Potência=95

Primeiro realizou-se a gravação na placa de bambu laminado [figuras 177 e 178] com intuito de verificar potência e velocidade do equipamento.

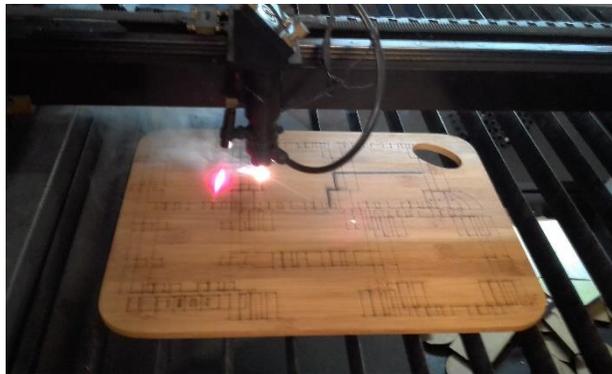


Figura 179: Placa de bambu laminado 8mm: corte *CNC laser*. Início dos cortes das peças. Fonte: Autora (2018).

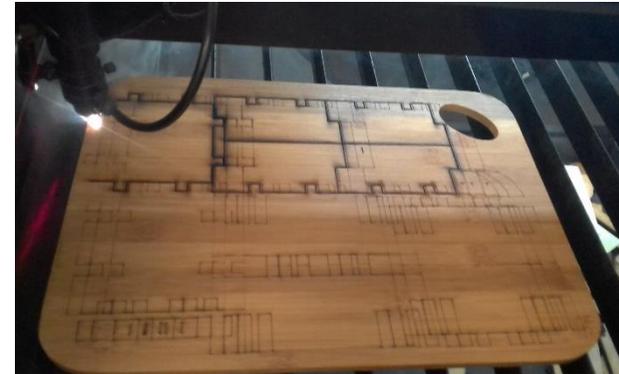


Figura 180: Placa de bambu laminado 8mm: corte *CNC laser*. Execução dos cortes das peças. Fonte: Autora (2018).

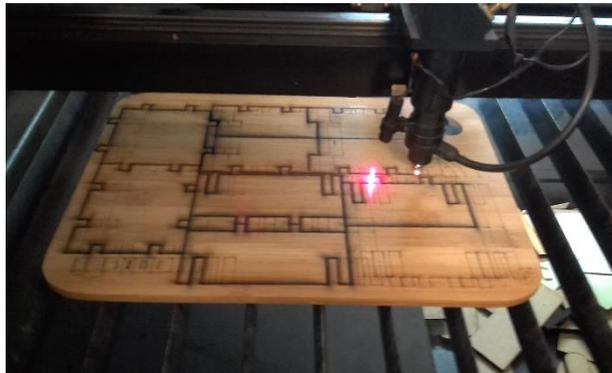


Figura 181: Placa de bambu laminado 8mm: corte *CNC laser*. Execução dos cortes das peças. Fonte: Autora (2018).

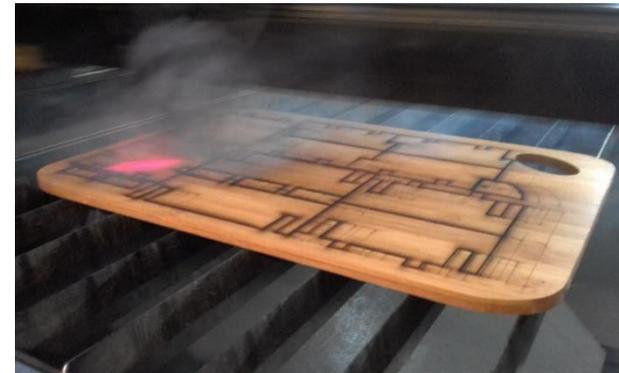


Figura 182: Placa de bambu laminado 8mm: corte *CNC laser*. Finalização dos cortes das peças. Início de combustão do material. Fonte: Autora (2018).

Em seguida, iniciou-se o processo de corte das peças: figuras 179 e 180.

A placa de bambu laminado, embora com espessura reduzida, apenas 8 mm, apresentou resistência elevada, dificultando o corte.

Em dado momento, houve princípio de combustão do material – conforme demonstra a figura 182.

Após a finalização da etapa de corte – figura 183 – observou-se que o corte não havia ocorrido completamente, ou seja, não atravessou totalmente o material, como mostra a figura 184. Foi necessário finalizar o corte manualmente, com lâmina, a fim de retirar as peças da placa de bambu laminado – figura 185. Entretanto, este procedimento causou danos às peças, como podem ser observados na figura 186. Esta imagem evidencia que o feixe de laser não transpassou totalmente a espessura do material; nota-se que somente a parte superior fora queimada.

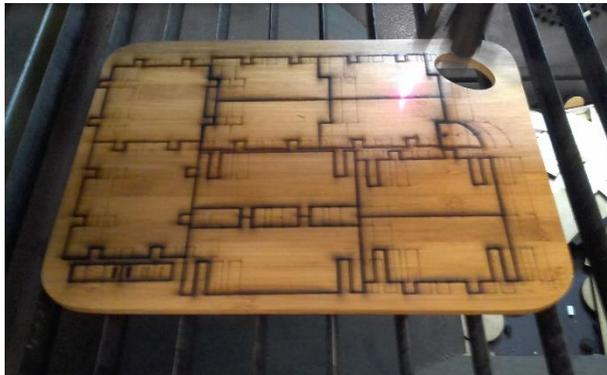


Figura 183: Etapa de corte finalizada: parte frontal da placa de bambu laminado. Fonte: Autora (2018).



Figura 184: Etapa de corte finalizada: parte posterior da placa de bambu laminado. Fonte: Autora (2018).

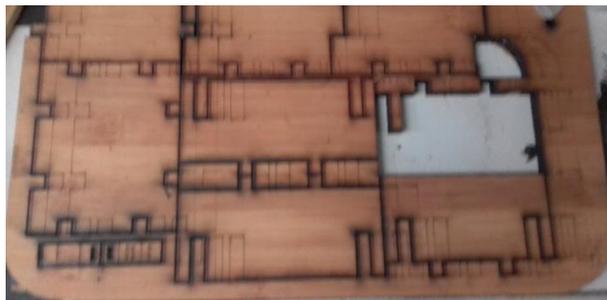


Figura 185: Retirada das peças cortadas, da placa de bambu laminado. Fonte: Autora (2018).

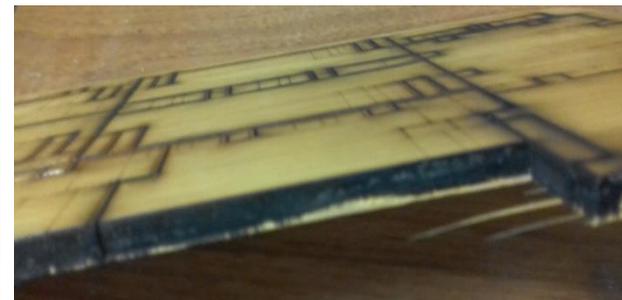


Figura 186: Retirada das peças: fendilhamento da placa de bambu laminado. Fonte: Autora (2018).

O segundo teste - com bambu laminado [8 mm] - realizado na CNC *laser* utilizou as seguintes configurações da máquina:

- Velocidade=4
- Potência=97

Em função dos resultados obtidos no primeiro teste, foi necessário diminuir a velocidade de corte e aumentar a potência do *laser*. A placa de bambu laminado foi colocada sobre uma chapa de MDF. Desta forma, o material foi cortado corretamente e as peças destacaram-se com facilidade da placa.



Figura 187: Início do corte: segundo teste. Placa de bambu laminado sobre chapa de MDF. Fonte: Autora (2018).

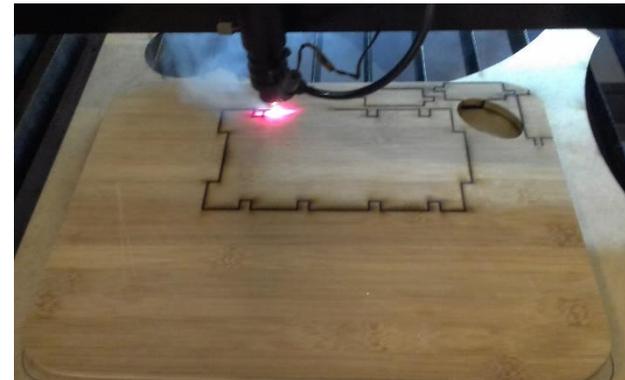


Figura 188: Processo de corte: segundo teste. Placa de bambu laminado sobre chapa de MDF. Fonte: Autora (2018).



Figura 189: Caixa de bambu laminado: modelo 1. Corte na CNC *laser* Fonte: Autora (2018).

O objetivo principal destes dois primeiros testes, foi analisar o comportamento do bambu laminado na CNC laser. Estes testes não puderam ser realizados no Laboratório da FAUUSP, em função da característica do equipamento existente, pois a espessura máxima de corte é de apenas 3 mm. Por isso, houve a necessidade de utilização do equipamento de uma empresa de engenharia.



Figura 190: Caixa de bambu laminado: modelo 2. Corte na CNC *laser* Fonte: Autora (2018).

Como resultado, foram obtidos dois modelos de caixas, medindo aproximadamente 12x10x6cm, montadas com sistema de encaixes entre as peças e cola látex. O modelo representado na figura 189 é constituído de uma peça única para base e dois tipos de peças para os fechamentos laterais. Já o segundo modelo, apresentado na figura 190, é composto por uma peça para base e um mesmo desenho utilizado para os fechamentos laterais.

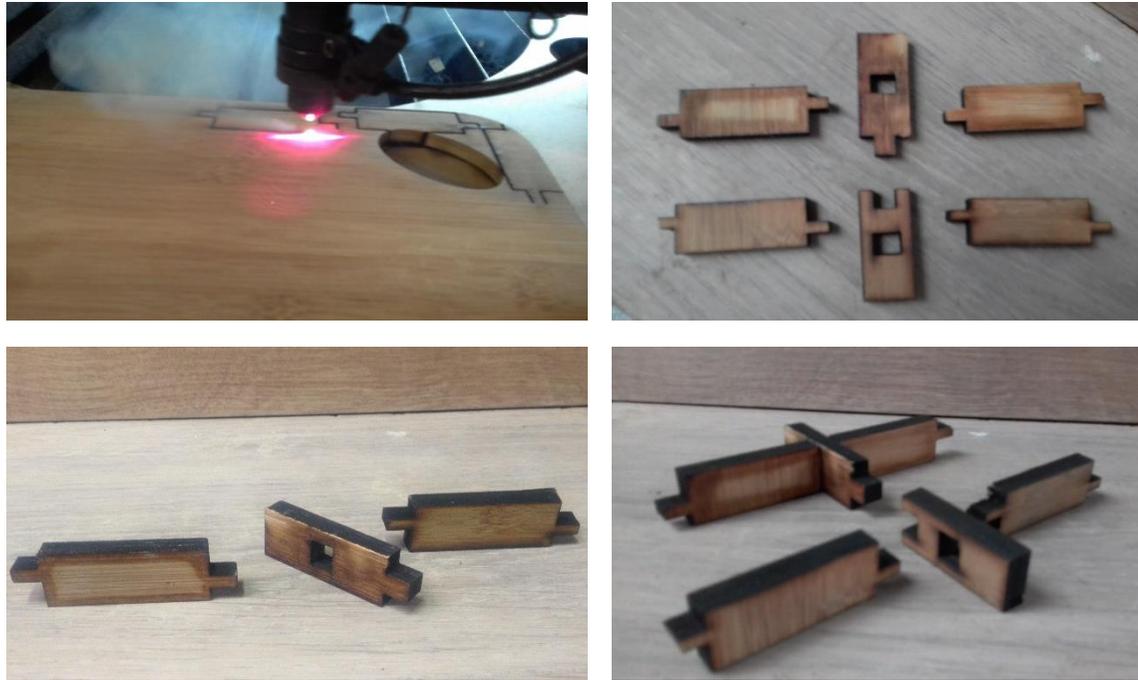


Figura 191: Corte na CNC *laser*: peças com encaixes longitudinais articulados; e encaixes ortogonais entre 3 peças.
Fonte: Autora (2018).

TESTES _ LIGAÇÕES ARTICULADAS

Com a finalidade de explorar as possibilidades de ligações articuladas, optou-se pelo desenho de uma peça, inspirado no modelo já apresentado [na figura 175], para as ligações perpendiculares; mas com sistema de articulação, entre as peças, para as ligações longitudinais.

Estas peças [figura 191] foram cortadas, juntamente com as demais, no segundo teste descrito na página anterior.

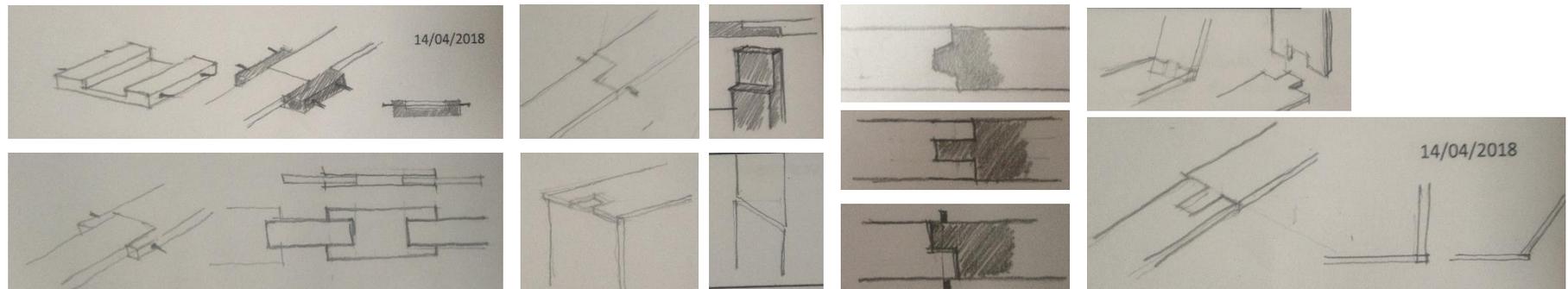


Figura 192: Estudos dos desenhos de peças com encaixes longitudinais articulados. Fonte: Autora (2018).



Figuras 193 a 195: Perfuração e fixação dos parafusos nas peças com encaixes longitudinais articulados. Fonte: Autora (2018).

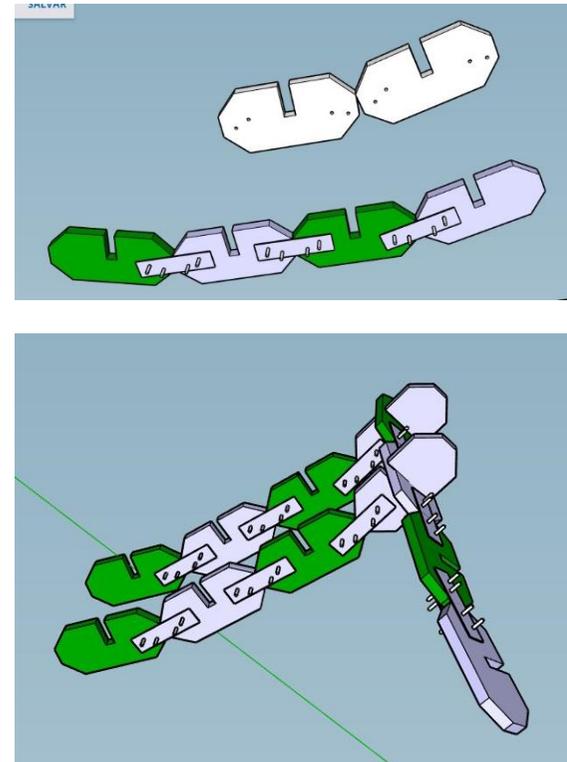


Figuras 196 a 199: Composições de peças com encaixes longitudinais articulados; e encaixes ortogonais entre 3 peças. Fonte: Autora (2018).

Posteriormente, utilizando-se uma mini retífica – figuras 193 a 195 - foram realizados furos para colocação de parafusos e porcas, para o sistema de articulação. As figuras 196 a 199 apresentam as peças conectadas, com as possibilidades de articulações e composições entre componentes.

TESTES_MALHA ARTICULADA

Com objetivo de investigar possibilidades de configurações de estruturas, para coberturas, constituídas de elementos idênticos, elaborou-se os desenhos de duas peças: uma peça maior, com encaixe para fixação, de outra peça idêntica, e desta forma compor um elemento ortogonal. A segunda peça, com dimensões menores, cumpre a função de fazer as ligações longitudinais, entre as peças maiores. Estas ligações são articuladas, devido aos parafusos e porcas, que fazem a fixação das peças menores, nas maiores.



Figuras 200 e 201: Malha articulada composta por peças idênticas. Fonte: Autora (2018).

CONCEPÇÃO DAS PEÇAS_MALHA ARTICULADA

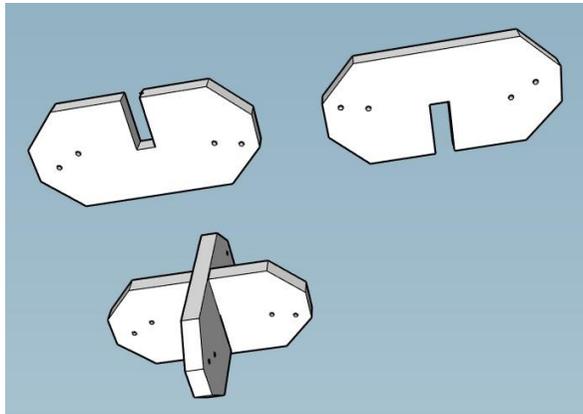


Figura 202: Primeiro estudo: peças idênticas - para malha articulada - com bordas chanfradas: Fonte: Autora (2018).

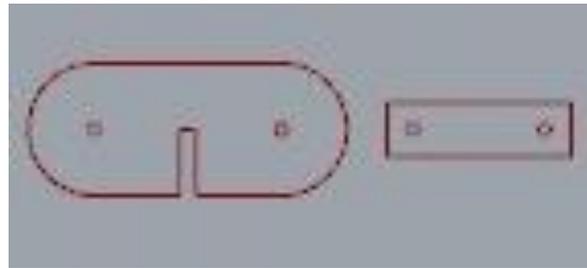


Figura 203: Segundo estudo: peças idênticas - para malha articulada - com bordas arredondadas e conector com bordas ortogonais. Fonte: Autora (2018).

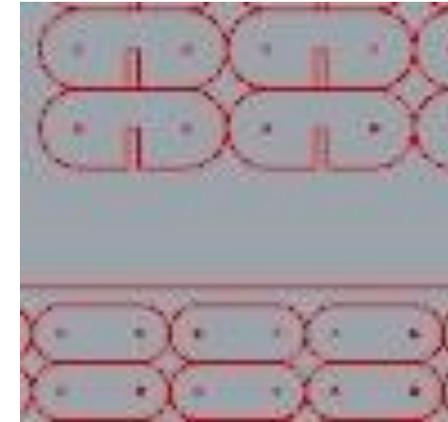


Figura 204: Terceiro estudo: peças idênticas - para malha articulada - com bordas arredondadas e conector com bordas arredondadas. Fonte: Autora (2018).

A figura 202 apresenta o primeiro estudo, como proposta para o desenho das peças idênticas, que formarão a malha reticulada; a figura mostra o encaixe perpendicular entre as peças, já com os furos para possibilitar o encaixe longitudinal entre os elementos. A figura 203 mostra uma evolução da primeira proposta: as extremidades das peças foram arredondadas para permitir maior variação angular entre as peças; mostra, também, uma opção de peça de ligação longitudinal. A figura 204, traz a opção final dos desenhos: as peças para as ligações perpendiculares, conforme proposto na figura anterior; e as peças de ligação longitudinal, também, com as extremidades arredondadas para propiciar maior flexibilidade formal à malha reticulada.

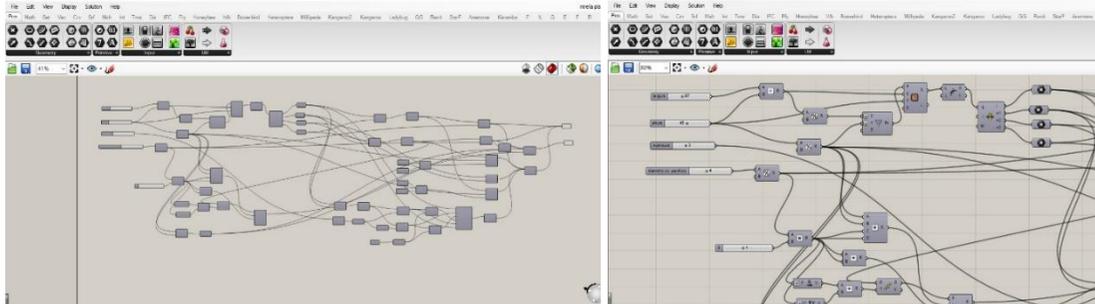


Figura 205: Algoritmo no *Grasshopper*: peças idênticas - para malha articulada - com bordas arredondadas e conector com bordas arredondadas. Fonte: Autora (2018).

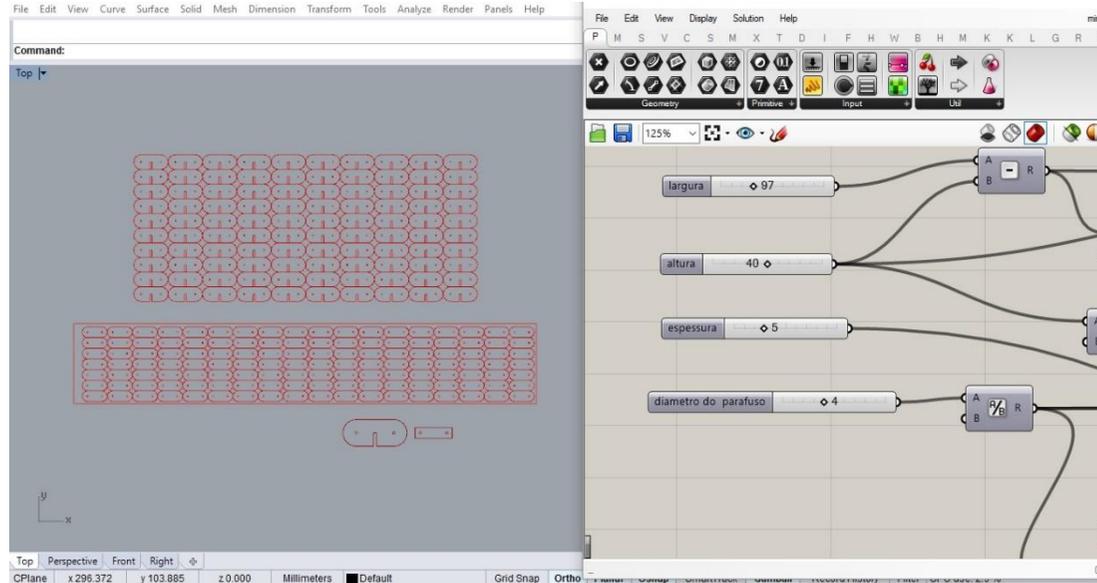


Figura 206: Desenhos das peças e conectores – da malha articulada – para corte na CNC *laser*. Fonte: Autora (2018).

Figura 207: Algoritmo no *Grasshopper*: parametrização das dimensões das peças e conectores – da malha articulada. Fonte: Autora (2018).

Foi desenvolvida uma programação, no *Grasshopper*, pelo engenheiro Fernando Simões, do LCC-FAUUSP, que possibilita ajustar os parâmetros das peças, de modo que as dimensões possam variar de acordo com a necessidade e características do material, principalmente em relação à espessura, devido ao encaixe perpendicular; mas, mantendo a proporção do desenho inicial da peça; também é possível ajustar o recorte para encaixe perpendicular entre as peças: nesta configuração [fig. 2], o corte foi definido para 50%. A figura 205 mostra a programação, na interface do *Grasshopper*. As figuras 206 e 207 apresentam as interfaces simultaneamente: esquerda *Rhinoceros*, com os desenhos das peças para corte na CNC *laser*; à direita *Grasshopper*, com as possibilidades de ajustes das dimensões das peças.

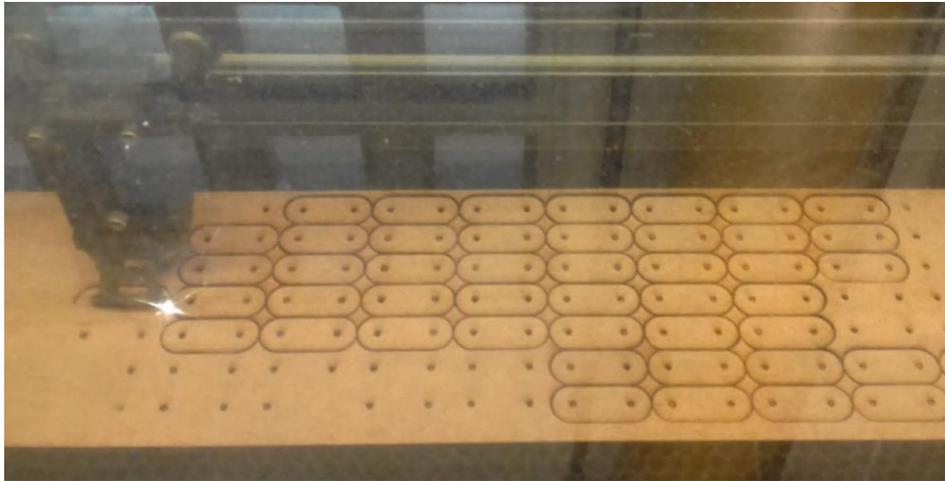


Figura 208: CNC *laser*: corte das peças e conectores – da malha articulada – em MDF 3 mm. Fonte: Autora (2018).



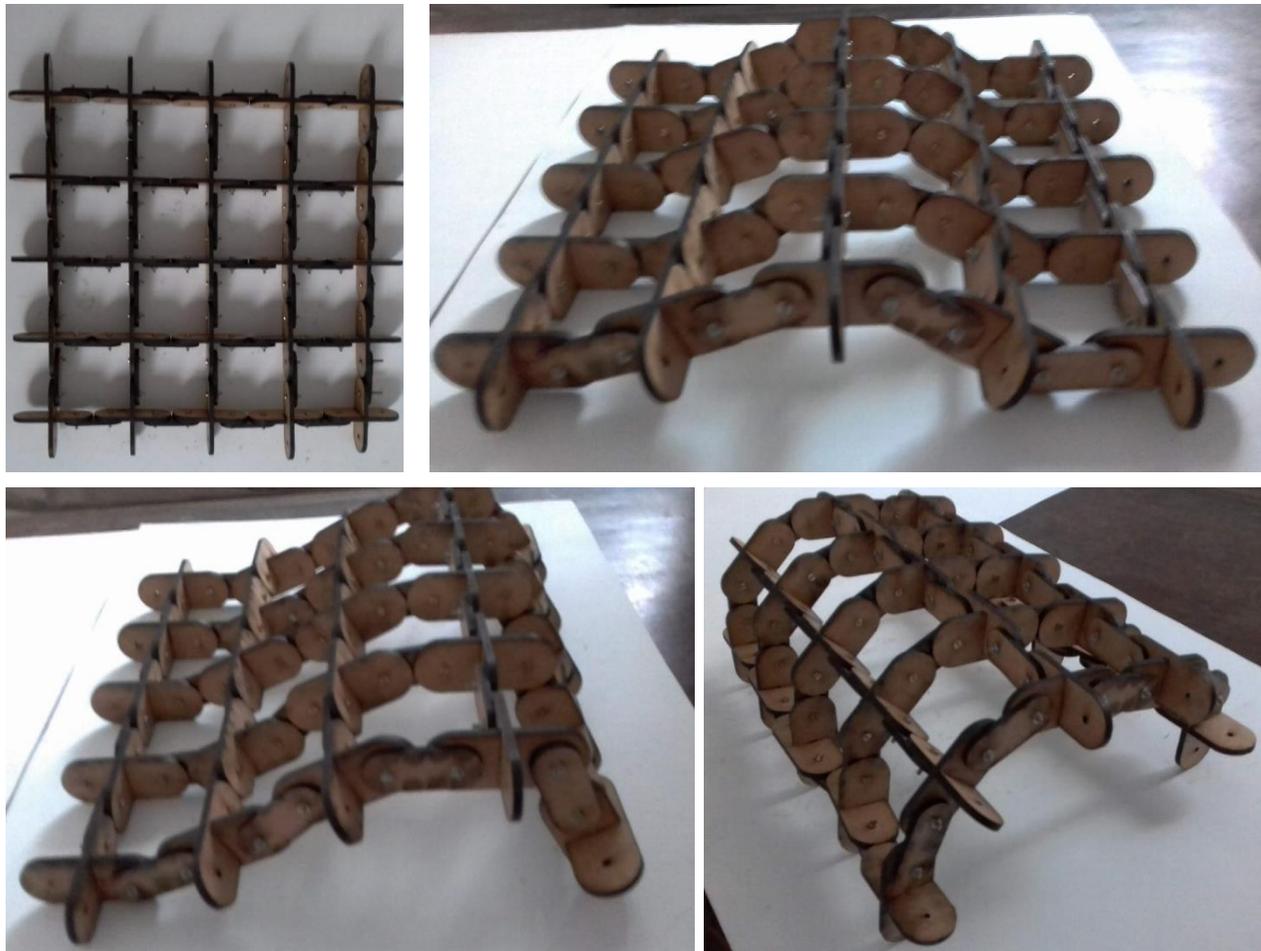
Figura 209: CNC *laser* e respectivo computador: LAME- FAUUSP. Fonte: Autora (2018).

A figura 208 mostra o processo de fabricação digital na CNC *laser*: a placa de MDF, 3 mm, sendo cortada, de acordo com os desenhos das peças, demonstrados nas imagens anteriores. Na figura 209, a máquina CNC laser e o computador, conectado, controlando os comandos da máquina. Equipamentos utilizados, do laboratório LAME-FAUUSP.



Figuras 210 a 213: Possibilidades de configurações – da malha articulada – com peças idênticas. Fonte: Autora (2018).

Após a finalização da etapa de corte, na CNC *laser*, não foi necessário nenhum tipo de acabamento manual; as peças já estavam prontas para montagem dos modelos físicos. Apenas, foi necessária a utilização de pequenos parafusos e porcas, para conexão longitudinal entre as peças. As figuras, ao lado, demonstram algumas das possibilidades de configuração formal, da malha reticulada composta por elementos idênticos.



Figuras 214 a 217: Possibilidades de configurações – da malha articulada – com peças idênticas. Fonte: Autora (2018).

As figuras, acima, apresentam algumas das investigações de possibilidades de conformação, da malha reticulada composta por elementos idênticos, explorando as variações de ângulos entre as peças.

No livro "*La digitalización toma el mando. Compendios de Arquitectura Contemporânea*", Mario Carpo, escreve o artigo "*La desaparición de los idénticos. La estandarización arquitectónica en la era de la reproductibilidad digital*", nele discorre sobre a questão dos elementos idênticos na produção digital:

"Podemos continuar a apreciar o idêntico por uma série de razões, mas no mundo digital a reprodução idêntica é irrelevante do ponto de vista dos custos. Mil cópias idênticas ou mil variantes diferentes do mesmo protótipo digital podem ser produzidas com a mesma máquina ao mesmo custo por unidade. Também conhecida como personalização em série, essa nova abordagem de produção sugere uma grande mudança de paradigma em nosso ambiente técnico e implica mudanças sociais e culturais igualmente importantes em como fazemos as coisas, em como usamos e vemos o objetos

manufaturados, e na forma como estes objetos podem representar significado e valor, incluindo seu valor de mercado." (ORTEGA, 2009 p.63).

A reflexão suscitada acerca da vantagem de se poder trabalhar com elementos distintos, sem alteração no custo das peças, sem dúvida é um ponto importante a ser analisado. Entretanto, há que se refletir sobre outros aspectos em que a produção de elementos idênticos, mesmo que produzidos por meio digital, podem trazer vantagens. A repetição de um único elemento construtivo, por exemplo, pode originar formas arquitetônicas distintas. A principal vantagem de se optar por um único desenho é a facilidade no processo de construção da edificação. Quando todas as peças são diferentes entre si, há que se ter um projeto bem elaborado de execução da montagem da estrutura; as peças precisam ser numeradas e há o local exato para cada uma delas. Este processo, requer cuidado e atenção, e demanda mais tempo na construção. Com peças idênticas há, também, a questão de redução de perda de

material; com possibilidade de melhor aproveitamento da disposição das peças, para corte.

A opção de se trabalhar com peças idênticas, em projetos paramétricos, não pode ser encarada como uma contradição. Uma vez que se vale dos meios digitais para concepção do projeto, e execução das peças, o fato de ser um único elemento não pode depreciar o projeto. Há muitas variáveis que envolvem as decisões projetuais e, em certos casos, a escolha de se adotar um mesmo elemento, pode ser a premissa do projeto ou a melhor alternativa em função do material escolhido, tempo de execução da obra, quantidade de pessoas disponíveis para execução, dentre outros fatores. São muitas variáveis e condicionantes, que devem ser analisadas para a tomada de decisão projetual.

Em determinado momento, no decorrer da pesquisa, percebeu-se uma dicotomia: duas linhas de pensamento em relação à produção de elementos idênticos ou distintos, por meio da fabricação digital. Há a vertente que valoriza e estimula

o desenho paramétrico, justamente, pelo seu caráter *non-standard*, com todas as suas possibilidades em termos de exploração da forma e, com a vantagem, de não onerar o valor final da execução em função disto. Argumentam que a utilização de elementos idênticos é uma contradição, quando se trata de utilizar os recursos do desenho paramétrico. A outra vertente, argumenta que não há contra-senso em utilizar-se elementos únicos, amparados pelo desenho paramétrico, uma vez que há sua utilização na concepção, desenvolvimento e execução.

Com o propósito de investigar cada uma destas vertentes, houve o desenvolvimento da “malha articulada” apresentada nas páginas 150 a 154.

Entretanto, para dar continuidade à pesquisa optou-se por desenvolver a proposição projetual apresentada no II Encontro Cascas Estruturadas, POLI_FAUUSP, realizado em dezembro de 2016, apresentada no capítulo 6.

5.3 TÉCNICA SUBTRATIVA: CNC FRESADORA



Figuras 218 a 220: Caixinha [modelo 2] executada na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).



Figuras 221 e 222: Caixinha [modelo 2] cortada na CNC *laser*. Fonte: Autora (2018).

Estas imagens demonstram as diferenças entre peças – com desenhos idênticos – executadas na CNC fresadora e cortadas na CNC *laser*.

As figuras 218 a 220 mostram que as peças executadas na CNC fresadora apresentam os ângulos internos arredondados, decorrentes do percurso da broca.

Nas figuras 221 e 222, pode-se observar que nas peças cortadas na CNC *laser*, os ângulos internos são de 90° e apresentam a marca de queima, resultado da trajetória do *laser*.

CORTE NA ROUTER
 ENCAIXE = 8 mm
 H PEÇA = 18 mm
 FILLET = RAIO = 3 mm
 PEÇAS: X1, X2, Y1 E Y2

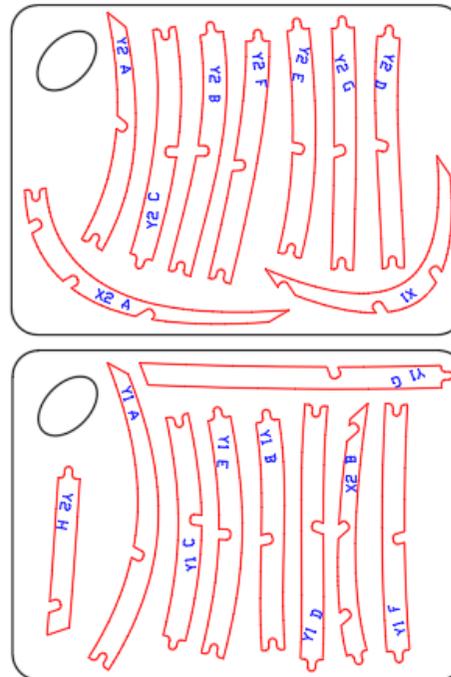


Figura 223: Desenhos das peças para CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).



Figura 224: Peças executadas na CNC fresadora: aglomerado de madeira. Fonte: Autora (2018).



Figura 225: Peças executadas na CNC fresadora: bambu laminado. Fonte: Autora (2018).

As imagens, acima, referem-se à utilização da CNC fresadora. A figura 223 mostra os desenhos de peças. Com o objetivo de verificar as dimensões dos encaixes, foi realizado um teste com aglomerado de madeira, antes de realizar o processo com o material objeto de estudo: bambu laminado. Para tanto, utilizou-se placas com as mesmas espessuras: 8 mm. A figura 224 mostra as peças sendo retiradas da placa de aglomerado de madeira, após o processo de subtração da fresadora CNC; as peças passarão por uma etapa de acabamento manual, com lixas adequadas, para que os encaixes entre as peças possam ocorrer satisfatoriamente. A figura 225 mostra o processo de subtração da fresadora CNC: a broca segue a trajetória definida pelas linhas do desenho [figura 223]. O material utilizado é placa de bambu laminado com 8 mm de espessura. Também, foi necessário o processo de acabamento manual, com lixas adequadas, após a retirada das peças.

5.4 TÉCNICA ADITIVA: IMPRESSÃO 3D

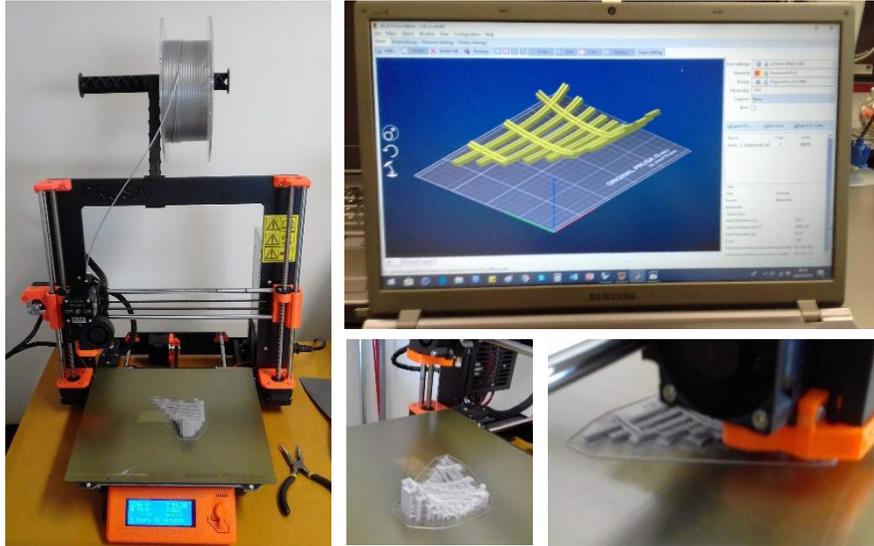


Figura 226: Processo de impressão 3D. Fonte: Autora (2019).

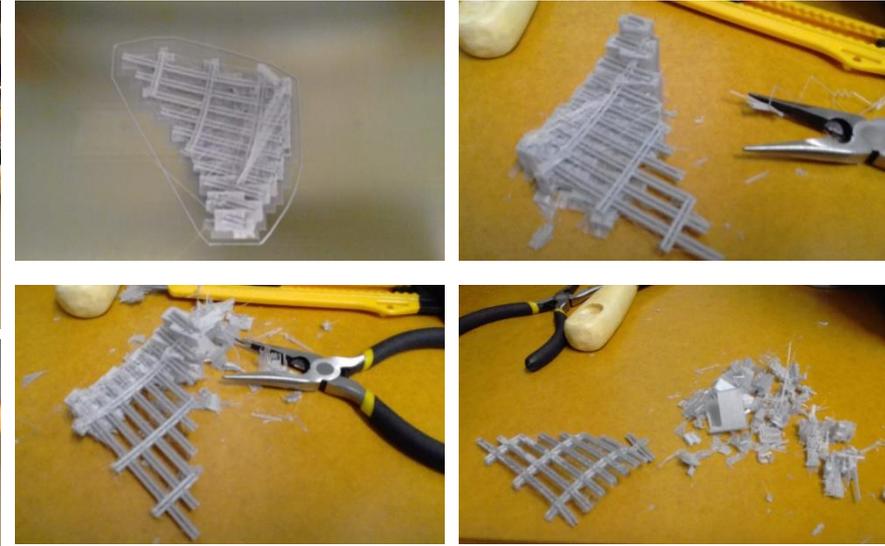


Figura 227: Retirada dos suportes, após impressão 3D. Fonte: Autora (2019).

A experiência que se deu, como forma de apropriação das características e possibilidades dos equipamentos CNC, técnica aditiva, foi realizada no DFL – Digital Fabrication Laboratory, pertencente à Universidade do Porto, Portugal, em 2019.

Definiu-se um trecho de uma estrutura reticulada para confecção na impressora 3D. O desenho foi realizado utilizando-se o *software Rhinoceros*. Posteriormente, o arquivo foi exportado para o *software* da impressora [neste caso, Prusa]. Este *software* permite analisar a duração da impressão e ajustá-la de acordo com parâmetros, como quantidade de material depositado, velocidade, entre outros. Também é possível avaliar a quantidade de material, de acordo com os suportes do objeto; ou seja, para que o objeto fique estabilizado na plataforma da impressora, são impressos elementos de suporte, que ao término da impressão, devem ser retirados, como demonstram as figuras acima. Para a impressão deste trecho da estrutura foram realizados três testes, variando os parâmetros de impressão e posição dos suportes.

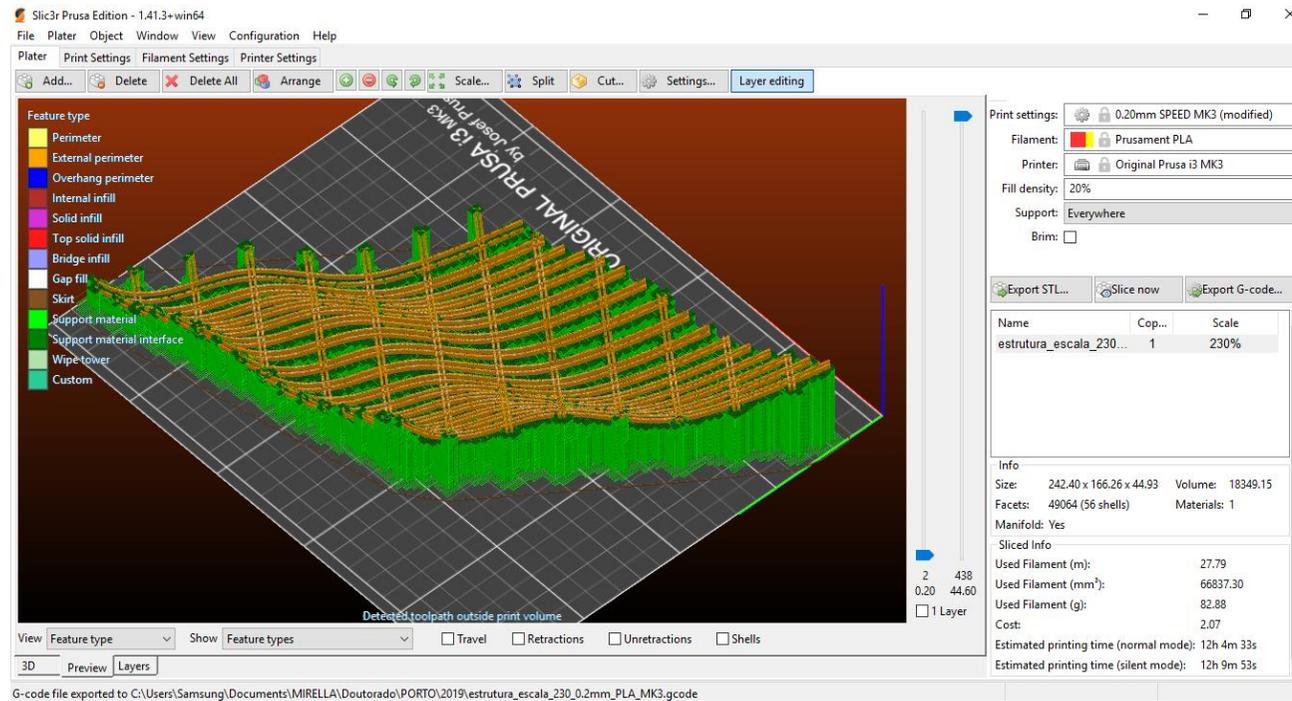


Figura 228: Visualização da estrutura a ser impressa em 3D. Fonte: Autora (2019).

Inicialmente, considerou-se realizar a impressão da estrutura - objeto de estudo desta tese - completa. Entretanto, em função do tempo destinado à impressão – mais de doze horas – e à quantidade de material dispendido – mais de vinte e sete metros de filamento – optou-se pela impressão de apenas um trecho da estrutura. Estas informações, dentre outras, são calculadas pelo *software* da impressora. Na figura 228, ao lado, o que está representado pela cor caramelo refere-se à estrutura; e, retratado pela cor verde, estão os suportes de impressão.

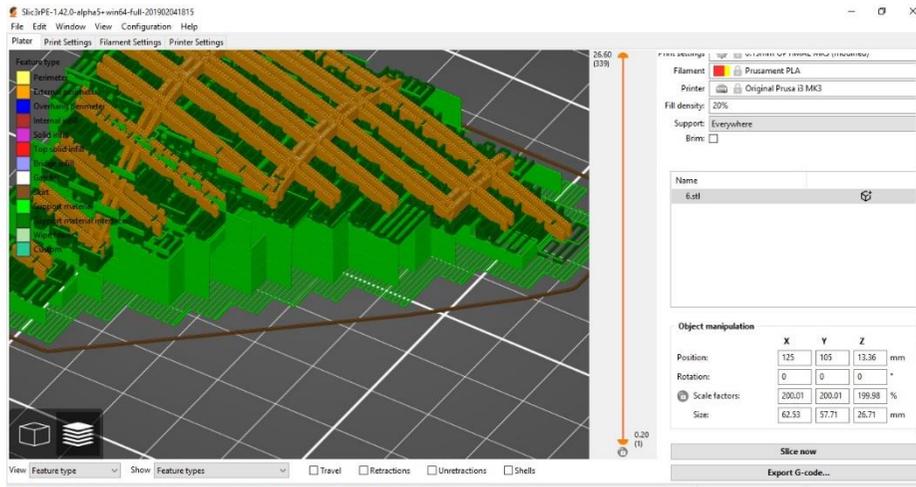


Figura 229: Visualização da impressão em 3D. Fonte: Autora (2019).

A figura 229, ao lado, demonstra o trecho da estrutura que fora selecionado para a impressão. O mesmo trecho da estrutura foi impresso em duas escalas distintas – conforme demonstram as figuras 230 e 231 – sendo a segunda o dobro da primeira. Estas imagens – na cor amarela – representam tudo o que será impresso [estrutura e suporte]; e as informações, à direita da imagem, contêm dados como tempo, material a ser utilizado, densidade de preenchimento e etc.

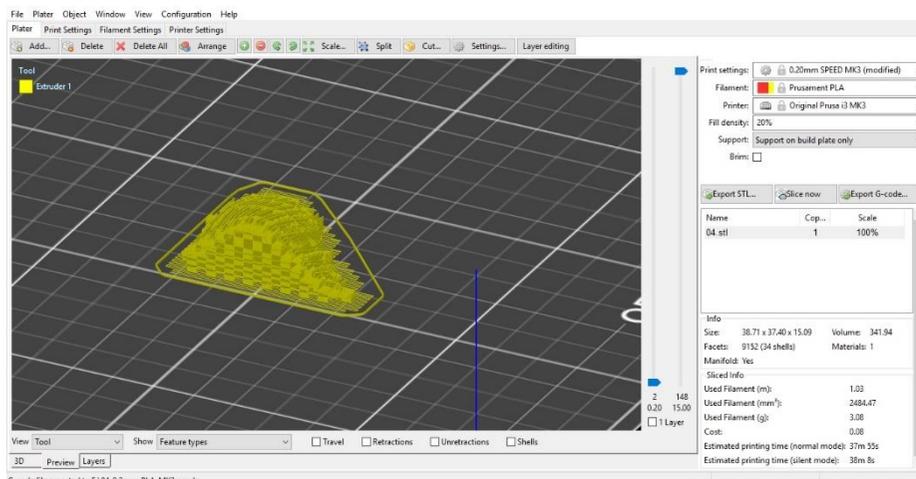


Figura 230: Visualização da impressão em 3D - dimensões: 38.71 x 37.40 x 15.09 mm. Fonte: Autora (2019).

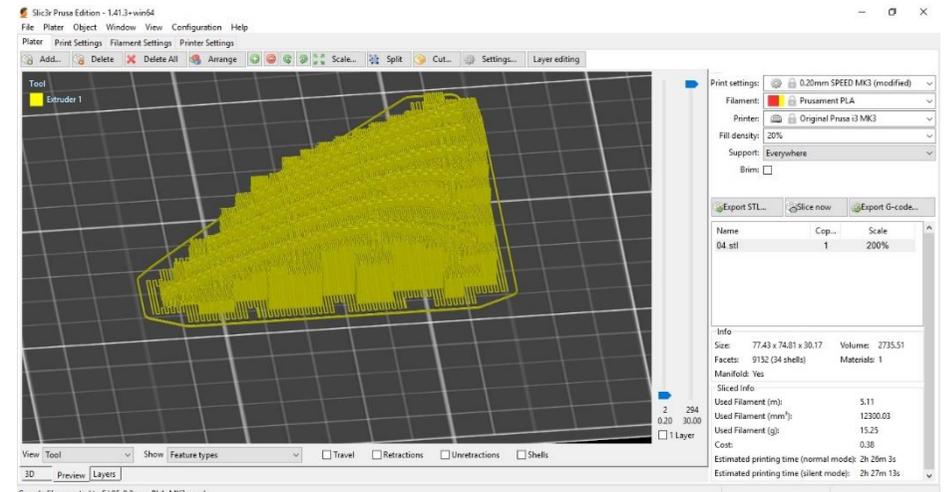
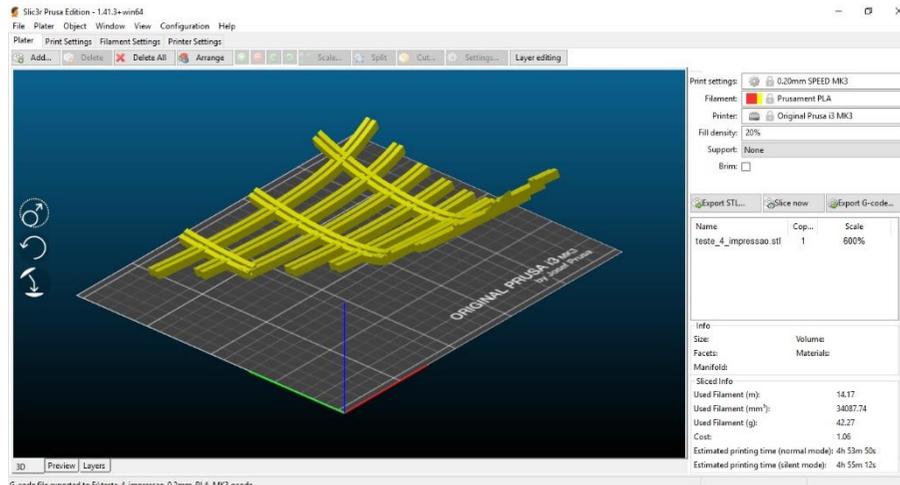
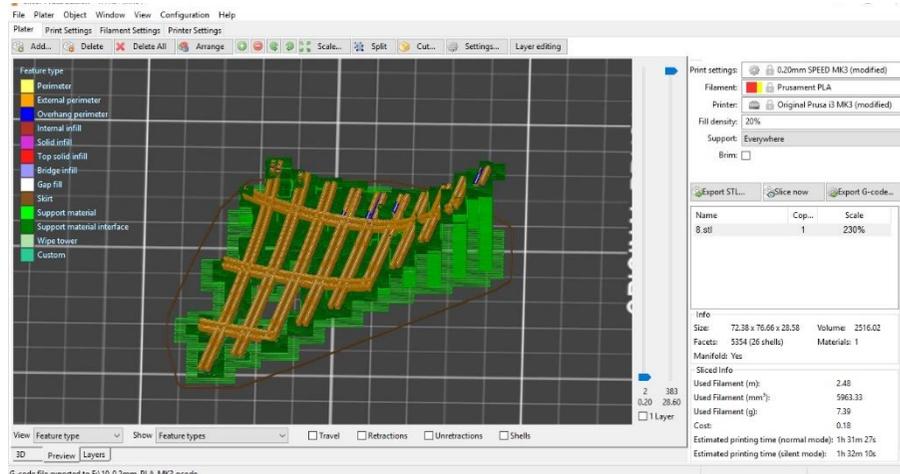


Figura 231: Visualização da impressão em 3D - dimensões: 77.43 x 74.81 x 30.17 mm. Fonte: Autora (2019).



G-code file exported to E:\teste_a_impressao_0,2mm_PLA_MK3.gcode

Figura 232: Visualização da estrutura em novo posicionamento para impressão 3D. Fonte: Autora (2019).

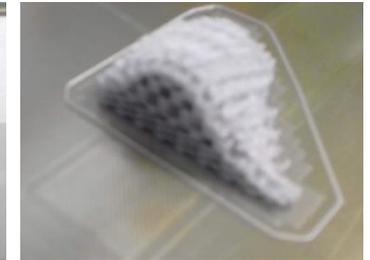
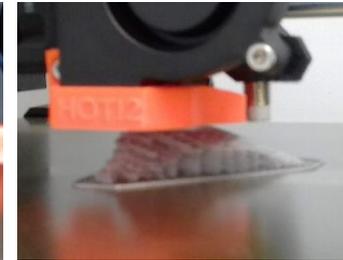
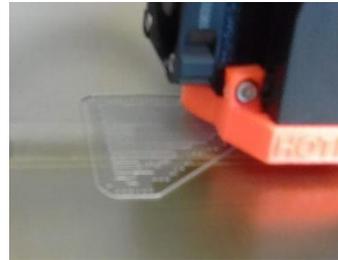


G-code file exported to E:\10_0,2mm_PLA_MK3.gcode

Figura 233: Visualização da estrutura - em novo posicionamento - e suportes de impressão 3D. Fonte: Autora (2019).

Analisando os modelos anteriores, percebeu-se significativa perda de material, para confecção dos suportes de impressão; então, decidiu-se realizar a impressão de uma terceira peça – do mesmo trecho da estrutura – mas com dimensão 30% superior em relação à segunda escala. Desta vez, a estrutura foi posicionada, na plataforma de impressão, ao contrário do que fora anteriormente; ou seja, a parte superior da estrutura ficou apoiada na superfície da impressora; deste modo, houve considerável redução na quantidade de apoios [suportes necessários para impressão], o que resultou em economia de material e tempo de impressão, além de facilitar a remoção dos suportes, evitando danos à peça.

As figuras 234 e 235 apresentam o processo de impressão – do trecho selecionado da estrutura – referente ao primeiro teste. A figura 236, mostra o modelo após a impressão, ainda com os suportes de apoio.



Figuras 234 e 235: Impressão do modelo 1. Fonte: Autora (2019).

Figura 236: Modelo 1 finalizado - ainda com apoios. Fonte: Autora (2019).

A figura 237 mostra o processo de impressão – referente ao terceiro teste – do trecho da estrutura. Na figura 238, o modelo ainda com os suportes de impressão. E a figura 239, mostra o modelo durante o processo de retirada dos apoios.



Figura 237: Impressão do modelo 3. Fonte: Autora (2019).

Figura 238: Modelo 3 finalizado :ainda com apoios. Fonte: Autora (2019).

Figura 239: Modelo 3: retirada dos apoios. Fonte: Autora (2019).

A figura 240 apresenta os modelos – ainda com suportes – resultantes das impressões dos primeiro e segundo testes. E, a figura 241, apresenta o resultado dos três testes, nas escalas distintas.



Figura 240: Modelos 1 e 2: ainda com apoios. Fonte: Autora (2019).

Figura 241: Os 3 modelos finalizados. Fonte: Autora (2019).

Nota-se que no primeiro modelo ainda há resquícios de apoios, devido à dificuldade de retirá-los sem comprometer a peça. No segundo modelo, houve danos à peça no momento de retirada dos apoios. O terceiro teste, foi o que se obteve melhor resultado; não só por ser o modelo com maior dimensão, mas principalmente, pelo seu posicionamento para impressão, com redução da quantidade de apoios.

5.5 PROCESSOS DE UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS CNC

5.5.1 CNC LASER

Algumas considerações sobre o desenvolvimento dos desenhos para CNC laser:

Para que o encaixe - entre as peças - seja perfeito, há que se considerar o diâmetro do feixe de luz [do *laser*]; para que não haja folga, no encaixe, deve-se criar uma linha externa, ao desenho final da peça, com a medida do diâmetro do corte. É importante considerar a linha de corte – feita pelo laser – pelo lado externo da peça. Desta forma, não haverá diminuição no tamanho final da peça. É claro que a medida do diâmetro do feixe de luz, é bem pequena, entre 1 e 2 milímetros, dependendo do equipamento; entretanto, dependendo do material utilizado e tipo de desenho do encaixe, esta sutil diferença, somada às duas peças constituintes do encaixe, pode ser suficiente para que o encontro entre as duas peças não resulte num encaixe perfeito, comprometendo o resultado.

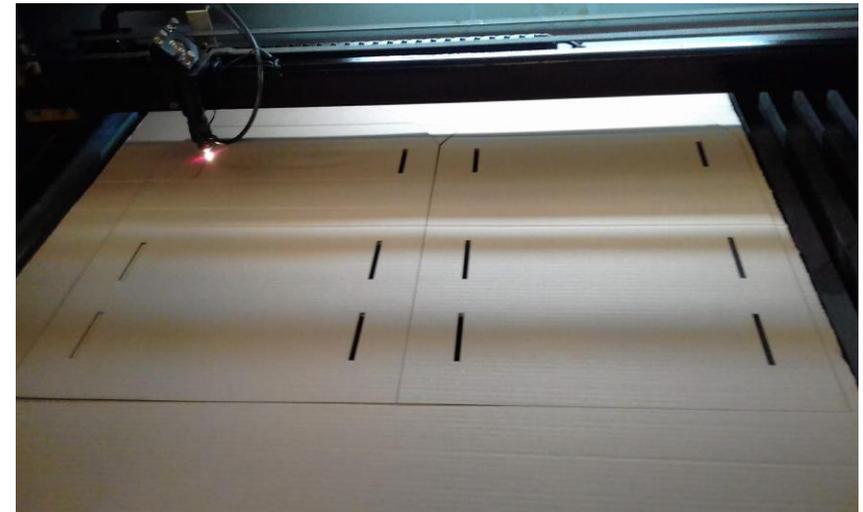


Figura 242: CNC laser: corte de papelão. Fonte: Autora (2017).

A máquina tem comandos para gravar e para cortar. Estas duas funções precisam ser definidas já no desenho, utilizando-se cores de linhas distintas: uma para cada função. Além disso, há como configurar potência e velocidade do feixe de *laser* para corte das peças. E a espessura máxima permitida para corte, é um fator limitante.

Sobre a execução dos desenhos, além das duas cores distintas, há que se tomar cuidado com linhas sobrepostas. Corte à *laser* tem a vantagem de, devido ao diâmetro bem

reduzido do laser, possibilitar melhor aproveitamento do material; é possível encostar duas peças distintas, aproveitando-se a mesma linha de desenho e, com isso, reduzindo a perda de material. Entretanto, esta linha que fará parte das duas peças, precisa ser única, sem sobreposição [figura 243]. O *laser* faz a trajetória da linha desenhada e caso existam duas ou mais linhas sobrepostas, ele irá percorrer este trajeto tantas vezes quantas forem a quantidade de linhas existentes; e cada vez que o *laser* faz uma trajetória, ele queima o material. Se ele passar mais de uma vez pelo mesmo local, ele desgastará mais o material naquele trecho; em se tratando de encaixes, entre peças, este desgaste maior do material acarretará folga e imprecisão na ligação entre as peças.

Estes diagnósticos só foram possíveis devido às observações e várias tentativas com desenhos e materiais distintos, ao longo do desenvolvimento da tese.

Foram realizados cortes na CNC *laser*, utilizando-se MDF, papelão, papel paraná e bambu laminado. Para cada

material, um desenho diferente, uma vez que as espessuras dos materiais são distintas e, conseqüentemente, necessitavam de ajustes nos desenhos das ligações.

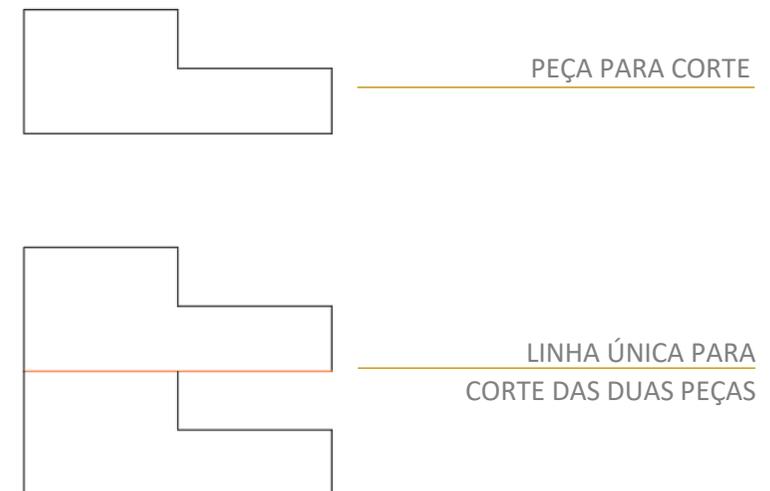


Figura 243: Desenho explicativo sobre linhas sem sobreposição para corte na CNC laser. Fonte: Autora (2020).

5.5.2 CNC FRESADORA

Também, foram testados cortes na fresadora CNC com MDF e bambu laminado, com peças cujas dimensões são maiores que aquelas cortadas na CNC *laser*. Para os cortes na fresadora CNC, os desenhos precisam ser desenvolvidos considerando-se as características da máquina. É outro processo de execução; totalmente diferente da CNC *laser*. E, por isso, os desenhos precisam ser pensados considerando-se o tipo de material, sua espessura e o diâmetro da broca, que fará o corte. Na fresadora CNC, é possível elaborar encaixes tridimensionais, uma vez que ela “esculpe” o material, trabalhando-o em camadas distintas. Um aspecto importante para ser considerado durante a etapa de desenho é o diâmetro da fresa, por dois motivos: em cortes na parte interna da peça, não há como fazer ângulos de 90°; os vértices ficarão arredondados de acordo com o diâmetro da fresa utilizada [figura 244]. E não há como desenhar duas peças distintas unidas, aproveitando a mesma linha limite de corte, como na

CNC *laser*, pois há a espessura da fresa, que corta o material. Deste modo, o aproveitamento do material é reduzido, pois há que se deixar áreas livres entre as peças para o percurso da fresa.

O princípio de utilização do braço robótico é o mesmo da fresadora CNC. Mas, há uma grande diferença com relação à precisão do corte. Diferentemente da fresadora CNC utilizando-se braço robótico, não há necessidade de se fazer acabamento na peça, com lixa, após o corte. Para realizar o corte, é necessário - no desenho da peça - traçar o percurso da fresa, considerando-se sua espessura, em função do diâmetro. Esta linha deve ser externa ao desenho da peça [figura 245]. E o robô utiliza um programa específico para corte; portanto, os desenhos precisam ser exportados para este *software* que fará a leitura dos desenhos e corte do material.

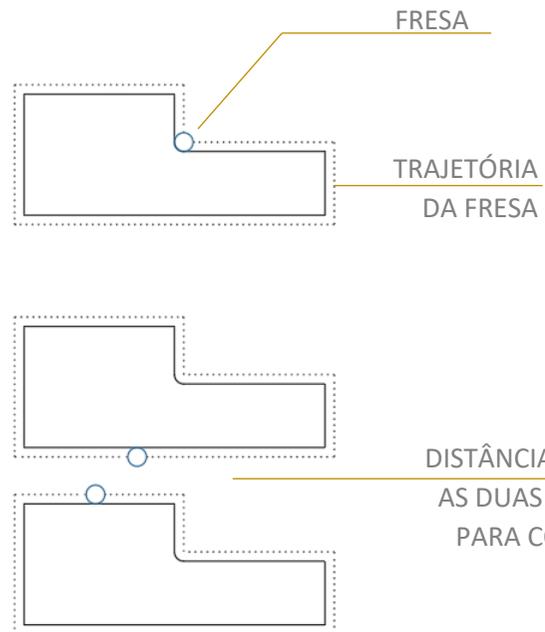


Figura 244: Exemplo de desenho para corte na fresadora CNC. Fonte: Autora (2020).

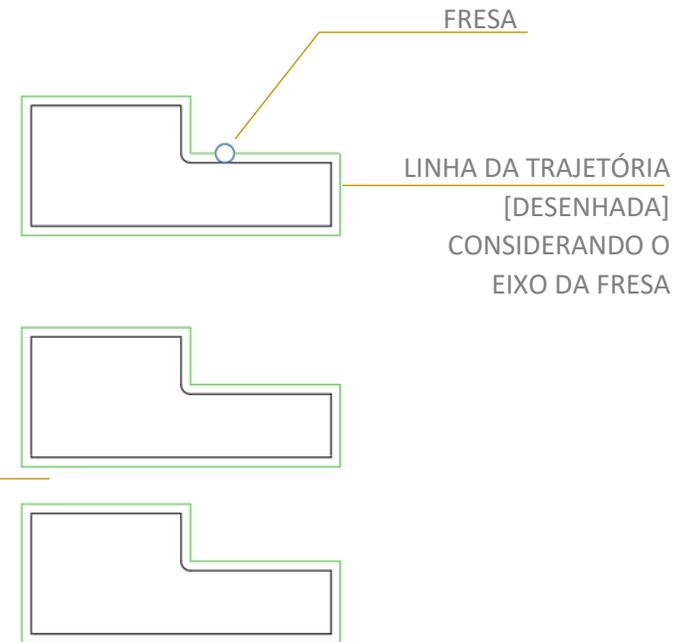
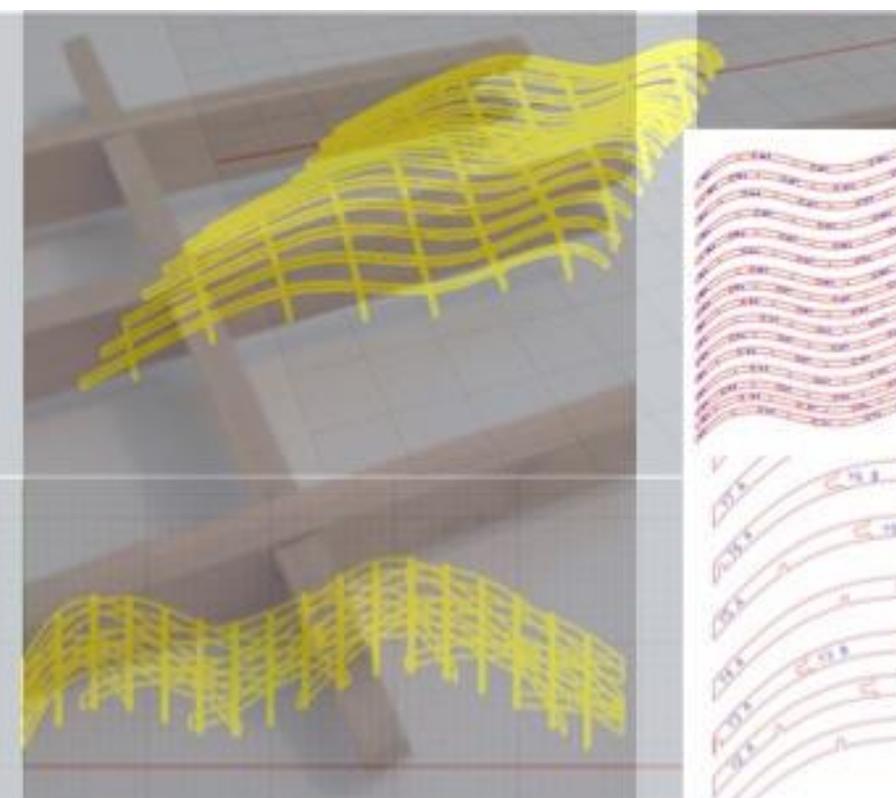
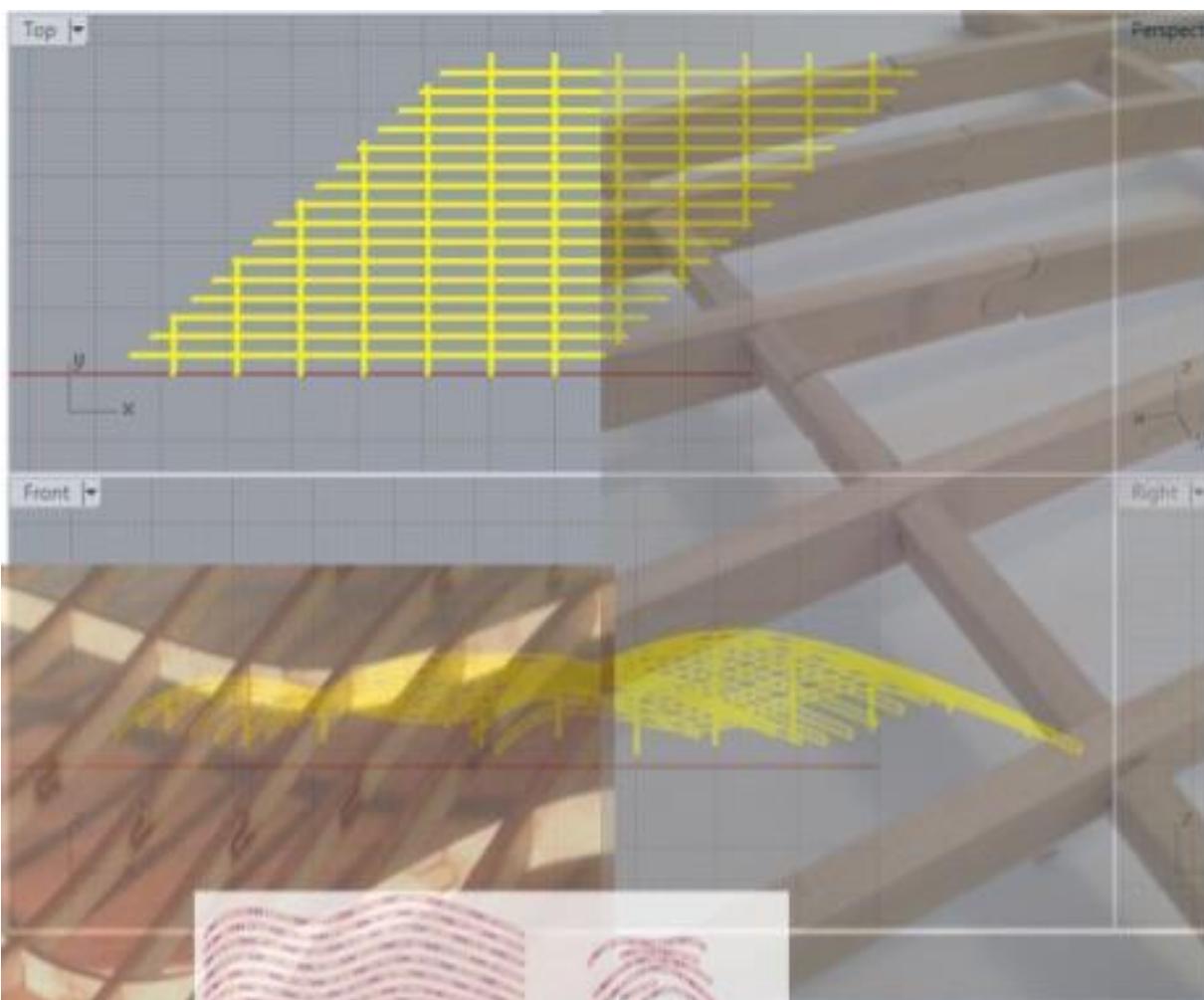


Figura 245: Exemplo de desenho para corte no braço robótico. Fonte: Autora (2020).

A figura 244 apresenta os desenhos de peças para utilização da fresadora CNC: a linha pontilhada indica a trajetória da fresa e mostra o ângulo interno, da peça, arredondado em função do desbaste da fresa; sinaliza, também, a necessidade de distanciamento entre as peças, devido à trajetória da fresa. A figura 245, mostra os desenhos para utilização do braço robótico; os princípios são os mesmos apresentados na figura anterior, para utilização da fresadora; entretanto, a diferença consiste na existência das linhas referentes à trajetória da fresa – aqui representadas em verde – que necessitam serem desenhadas, para que o programa do robô as utilize como percurso da fresa.



6_
**Construção
representativa:**

**Estrutura reticulada
de bambu laminado**

6_CONSTRUÇÃO REPRESENTATIVA: ESTRUTURA RETICULADA DE BAMBU LAMINADO

Esta tese tem como propósito demonstrar a viabilidade da utilização do bambu laminado como elemento construtivo estrutural na arquitetura contemporânea.

Como metodologia de pesquisa, foi proposta a investigação desta aplicação, pautando-se no estudo de uma construção representativa de uma estrutura reticulada de bambu laminado. Como proposição projetual, optou-se pela concepção de uma cobertura.

6_Construção representativa: estrutura reticulada de bambu laminado

Uma estrutura reticulada tem a característica de ser uma malha; as vigas encontram-se ortogonalmente umas às outras. A escolha deste sistema construtivo estrutural, deve-se ao fato de ser uma estrutura leve; possibilitando uma trama de modulação pequena, vencendo grandes vãos; utilizando pouco material; propiciando montagem, desmontagem e remontagem da estrutura; além da tipologia adequada à utilização do bambu laminado, devido à sua resistência à flexão.

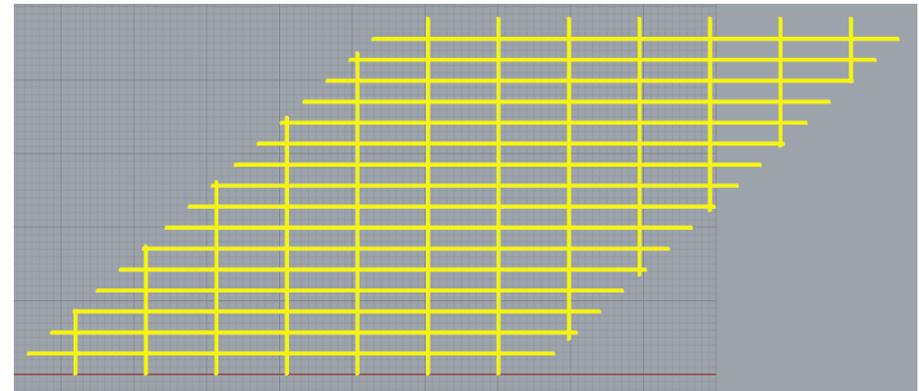


Figura 246: Vista superior da estrutura reticulada: 12 x 9m. Fonte: Autora (2016).

A concepção da forma, foi desenvolvida utilizando-se o *software Rhinoceros*. Modelou-se uma superfície, de dupla curvatura, como casca.

Uma vez definida a forma, utilizou-se o *plugin Grasshopper*, com uma programação ajustada pelo engenheiro Fernando Simões, integrante do LCC – Laboratório de Culturas Construtivas, da FAUUSP, para que fosse possível transformar a superfície da casca, em uma estrutura reticulada.

Esta programação permite a parametrização de vários aspectos da estrutura:

- ajustes nas dimensões das vigas: altura e espessura;
- ajustes na dimensão vertical do corte: para os encaixes perpendiculares entre as vigas;
- ajustes na proporção do desenho do encaixe tipo “rabo de andorinha”: para prolongamento longitudinal das vigas;
- planificação e numeração das peças: para corte na CNC⁸⁴.

Adotou-se a estrutura reticulada, como suporte à investigação, como objeto de estudo, considerando suas particularidades e características para aprofundamento das questões suscitadas ao longo da pesquisa e reflexões acerca dos temas intrínsecos ao seu desenvolvimento. Foram realizados alguns estudos explorando as possibilidades de parametrização do projeto. E, tratando-se de uma investigação, optou-se por explorar os diferentes processos das máquinas CNC: *router*, *laser* e impressora 3D⁸⁵.

⁸⁴ CNC = equipamentos com comandos de controle numérico computadorizado

⁸⁵ Experimentos desenvolvidos no DFL, Porto e relatados no capítulo 5

6.1 CONCEPÇÃO DA FORMA

Com a finalidade de investigar as dificuldades técnicas envolvidas na execução de um projeto arquitetônico amparado pelas tecnologias que envolvem desenho paramétrico e fabricação digital, optou-se pela concepção de uma estrutura reticulada.

Não se trata da proposição de um projeto arquitetônico, que atenda a um programa de necessidades ou esteja implantado em um sítio específico, ou que considere os demais aspectos, fatores e complexidades que envolvem um projeto arquitetônico, de fato. Trata-se de um estudo, demonstrando uma das muitas possibilidades de emprego do bambu laminado como elemento construtivo estrutural, na arquitetura contemporânea.

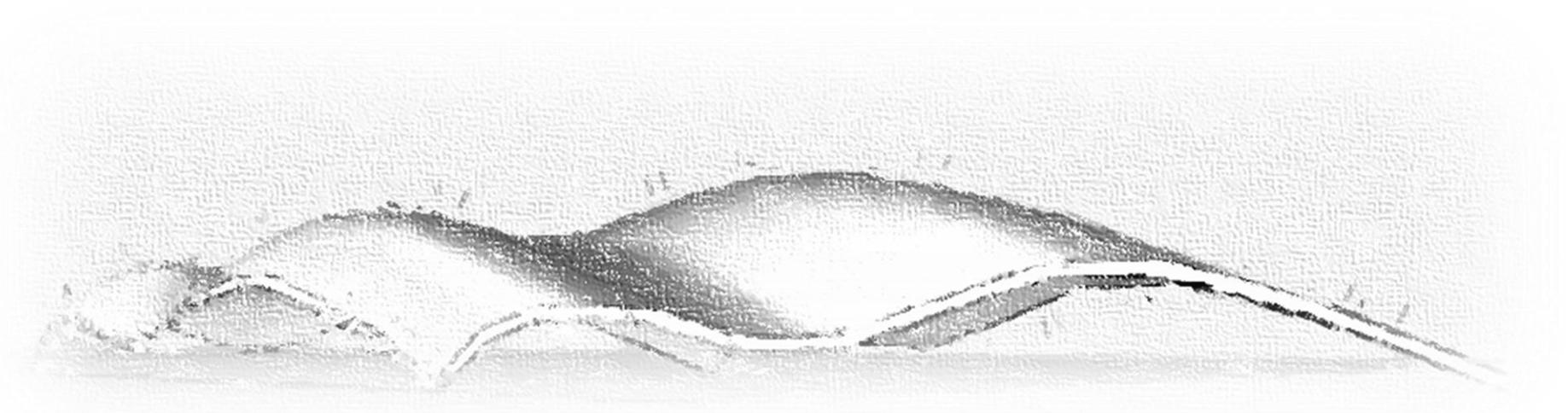


Figura 247: *Croquis* da estrutura reticulada. Fonte: Autora (2016)

A concepção da forma, teve como premissa explorar a configuração de uma geometria complexa, por isso, a proposição da dupla-curvatura. A intenção foi gerar uma superfície com suaves ondulações.

Esta cobertura é uma estrutura com grande vão [12 x 9 m] sem apoios centrais. A estrutura em malha reticulada – *gridshell* - possibilita o vão livre.

Outra premissa do projeto foi optar pela execução da estrutura com todas as peças diferentes entre si. O objetivo desta escolha foi explorar ao máximo o potencial de parametrização do projeto, permitindo a execução de uma estrutura com relevante complexidade de montagem.

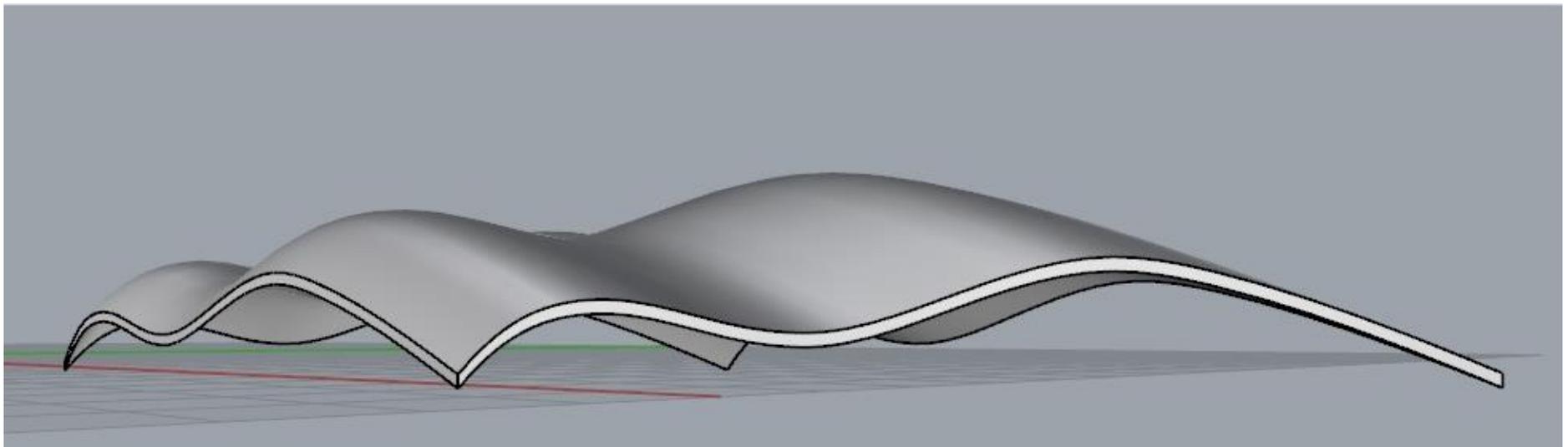


Figura 248: Perspectiva da superfície com espessura. Modelagem no *Rhinceros*. Fonte: Autora (2016).

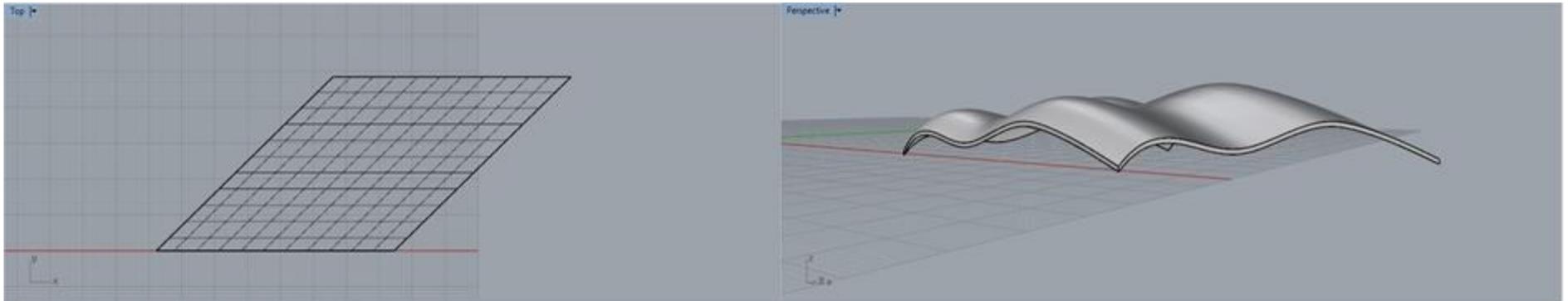


Figura 249: Concepção da forma: vista frontal. Fonte: Autora (2016).

Figura 250: Concepção da forma: perspectiva. Fonte: Autora (2016).

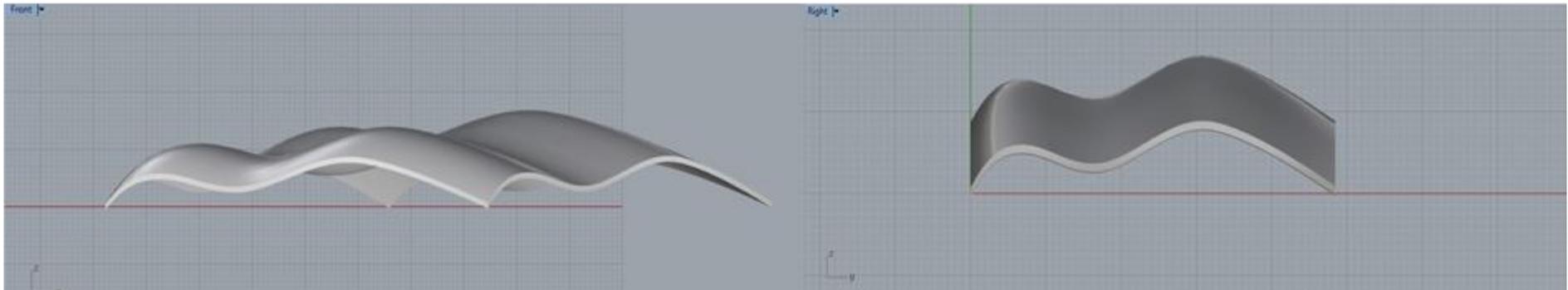


Figura 251: Concepção da forma: vista frontal. Fonte: Autora (2016).

Figura 252: Concepção da forma: vista lateral. Fonte: Autora (2016).

A concepção da forma, foi desenvolvida utilizando-se o *software Rhinoceros*. Foi gerada uma superfície, de dupla-curvatura. Posteriormente, atribuiu-se espessura à superfície.

A figura 249 mostra a vista superior do projeto, já com a superfície gerada. Esta malha, é definida pelo *software* para gerar a superfície de dupla-curvatura. A figura 250 mostra uma perspectiva do modelo. As figuras 251 e 252 apresentam vista frontal e vista lateral, respectivamente.

6.2 MODELOS DIGITAIS E MODELOS FÍSICOS

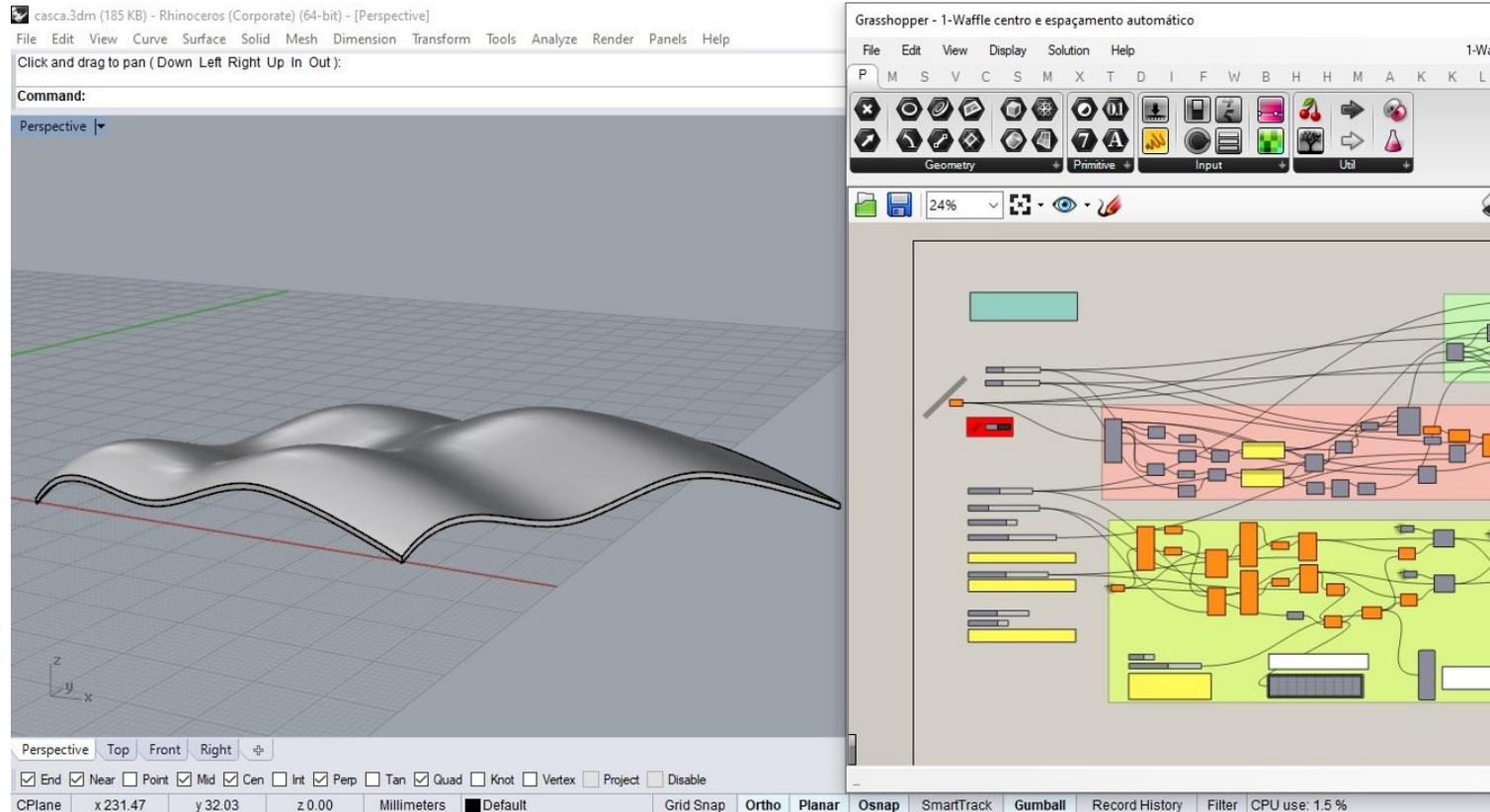


Figura 253: Concepção da forma: interface do *Rhinoceros* [forma] e do *Grasshopper* [algoritmo]. Fonte: Autora (2016).

A figura 253 mostra a superfície modelada no *software Rhinoceros* [esquerda] e o *plugin Grasshopper*, com a programação para parametrização da estrutura reticulada, a ser aplicada na superfície modelada. Esta imagem mostra o ambiente de trabalho, dos programas que interagem entre si. Neste caso, o desenho – concepção da forma – foi desenvolvido no *Rhinoceros* e, posteriormente, foi realizada a interação da programação, no *Grasshopper*, ao modelo no *Rhinoceros*.

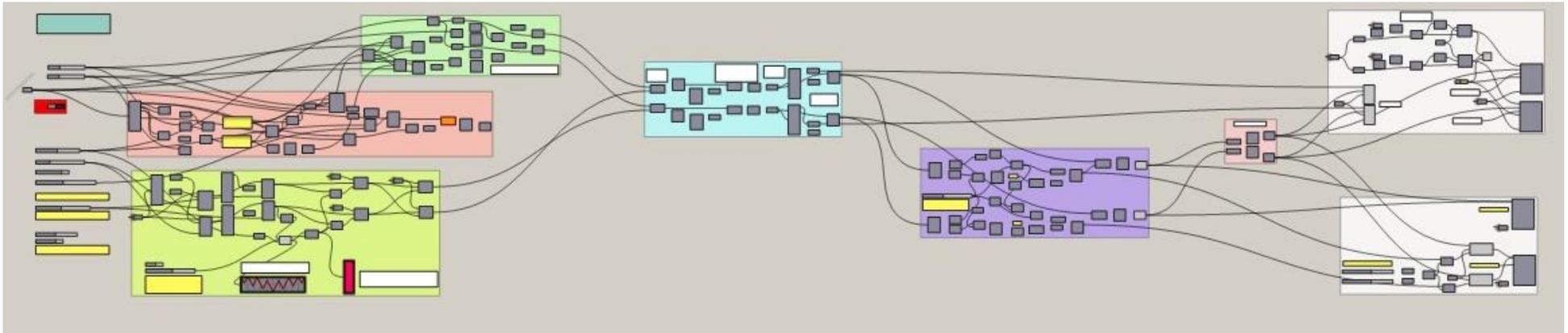


Figura 254: Definição do *Grasshopper* [algoritmo]. Fonte: Autora (2016).

A figura 254 mostra a programação, desenvolvida no *Grasshopper*, para a parametrização da estrutura reticulada. Cada elemento retangular, representa um comando específico; a programação, basicamente, consiste na sequência de comandos a serem executados, de acordo com o objetivo estabelecido. As linhas, representam a ligação entre os comandos e a cronologia dos acontecimentos. Há alguns atributos que podem ser variáveis, por isso, denominação de parametrização; há a possibilidade de ajustar os parâmetros desejados, desde que o algoritmo tenha sido projetado para tal. Um dos comandos, associa a geometria desenhada no *Rhinceros* à programação no *Grasshopper*; ou seja, vincula a programação a qualquer geometria desenhada. No caso, específico, desta programação a geometria necessariamente deverá ser uma superfície com espessura. A parametrização se dará na escolha das dimensões das vigas: altura e espessura; na profundidade de corte dos encaixes perpendiculares e distância entre as vigas [a malha reticulada]. Esta programação faz, automaticamente, a planificação das peças para corte, bem como a numeração das peças, distinguindo-as em eixos x e y.

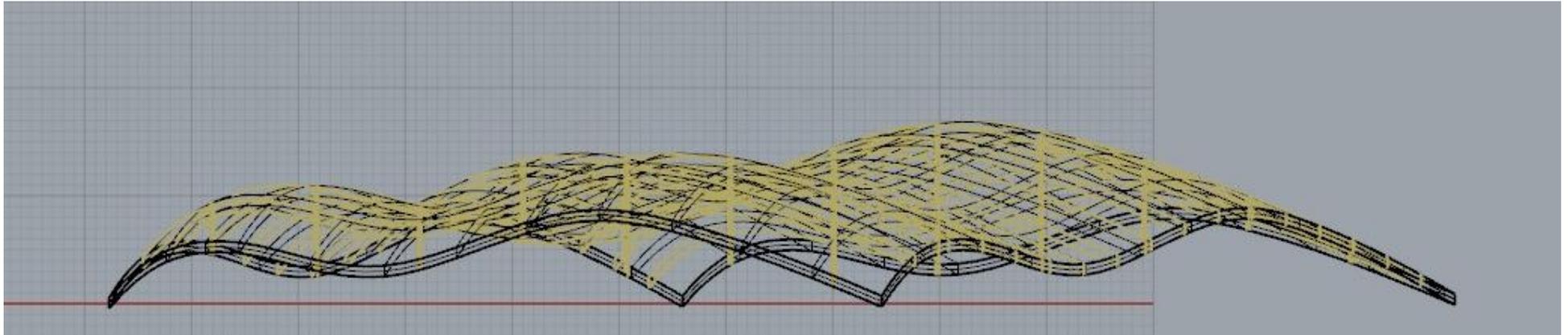


Figura 255: Interface do *Rhino* [forma] mostrando a superfície - após a atribuição da definição do *Grasshopper* [algoritmo] – com a malha reticulada. Fonte: Autora (2016).

Especificamente em relação a esta programação, é importante que exista espessura, na superfície modelada, para que o algoritmo do *Grasshopper*, possa ser atribuído ao modelo. Como a definição irá “transformar” a superfície em uma estrutura reticulada, a espessura da superfície é necessária para que exista material a ser “fatiado”.

A figura 255 ilustra o algoritmo já aplicado à geometria: a superfície foi transformada em uma estrutura reticulada. A dimensão vertical das vigas, neste primeiro momento, foi definida em função da espessura da superfície. Entretanto, como foi dito, esta medida está parametrizada na programação, portanto, poderá ser atribuído o valor desejado em função do material a ser utilizado. As características do material, também, definirão a espessura das peças e dimensões dos recortes para os encaixes perpendiculares entre as vigas; estes valores, também, estão parametrizados.

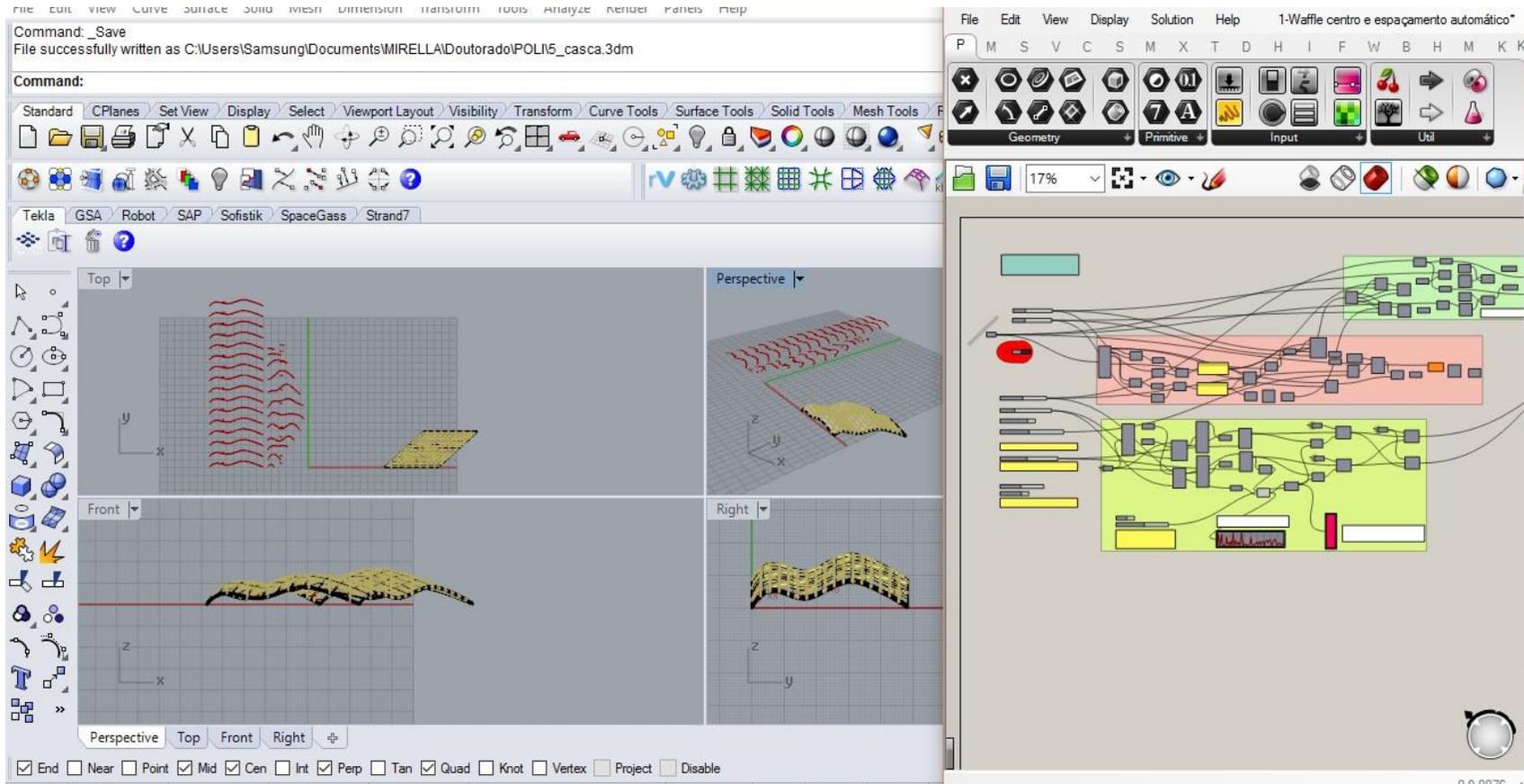


Figura 256: Interface do *Rhinoceros* [à esquerda] mostrando a superfície – e malha reticulada - após a atribuição do algoritmo do *Grasshopper* [à direita]. Fonte: Autora (2016).

A figura 256 apresenta, novamente, a interface de trabalho concomitante entre *Rhinoceros* e *Grasshopper*: do lado esquerdo, na área de trabalho do *Rhinoceros*, aparecem as imagens da superfície transformada em estrutura reticulada, pela aplicação do algoritmo, no *Grasshopper*, aberto no lado direito da tela. O modelo tridimensional, já reticulado, pode ser observado em perspectiva e vistas superior, frontal e lateral. Também, já é possível visualizar todas as peças – planificadas – prontas para corte na máquina CNC [desenhos em vermelho na imagem à esquerda].

Com o intuito de experimentar outras ferramentas digitais, fez-se a simulação – deste mesmo processo de reticular uma superfície, com o *software 123DMAKE*. Ao lado, algumas imagens dos resultados obtidos, com duas possibilidades de configuração disponibilizadas pelo programa.

Este *software*, também, gera as peças planificadas para corte.

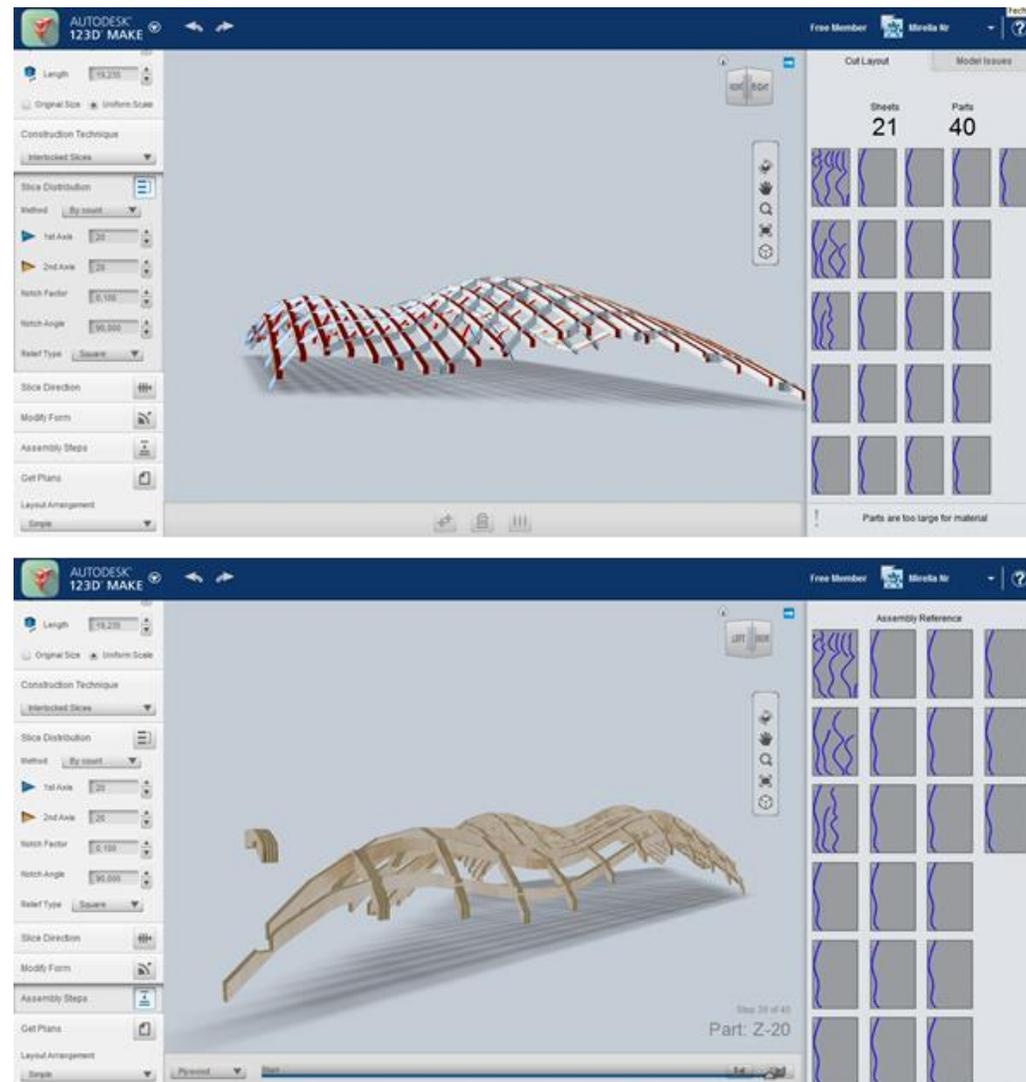


Figura 257: Interface do *software 123DMAKE* mostrando duas possibilidades de configuração da estrutura reticulada. À direita – em azul – são os desenhos das peças planificadas para corte, gerados pelo programa. Fonte: Autora (2016).

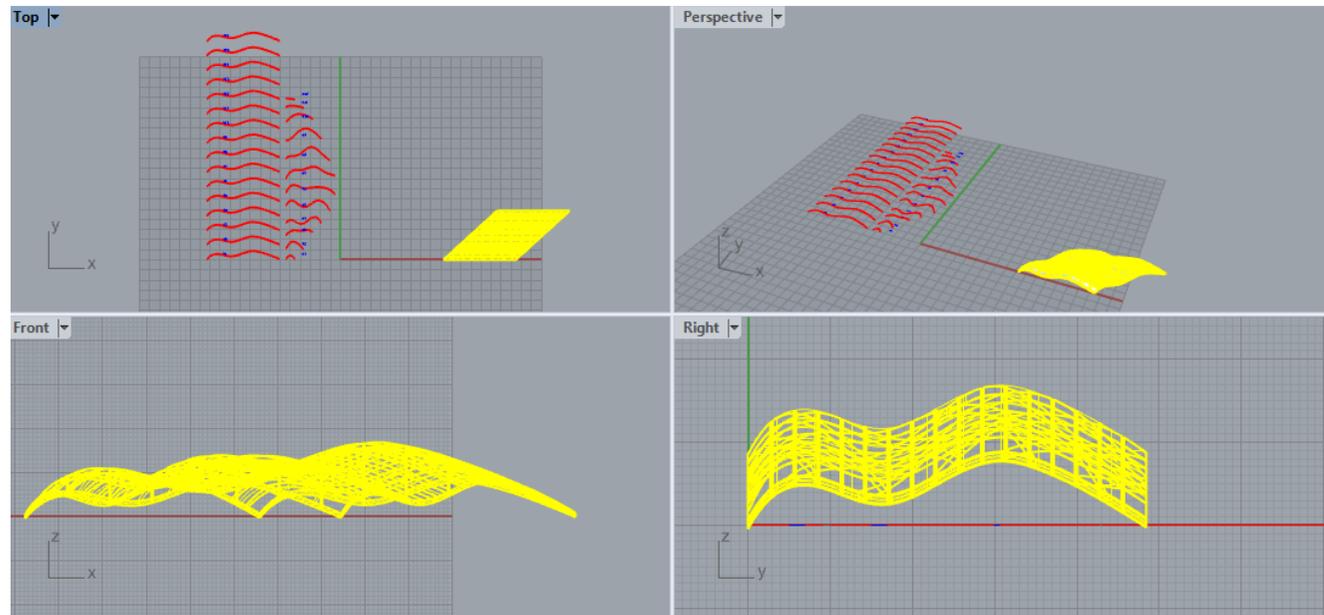


Figura 258: Interface do *Rhinoceros* mostrando a malha reticulada [em amarelo] após a atribuição do algoritmo do *Grasshopper*. Em vermelho, estão as peças planificadas para corte na *CNC laser*. Em azul, são as letras e números, que serão gravados nas peças, para auxiliar na montagem do modelo físico. Fonte: Autora (2016).

Optou-se por desenvolver as etapas de planificação e corte das peças, a partir da programação desenvolvida no *Grasshopper*, pelo fato desta ter mais possibilidades de ajustes de parâmetros do que as presentes no *software* mencionado anteriormente. Inclusive, posteriormente, foi acrescentada - neste algoritmo - a possibilidade de parametrização dos encaixes de prolongamentos das peças [tipo rabo de andorinha].

A figura 258 mostra a interface de trabalho do programa *Rhinoceros*; destacado em amarelo, está a estrutura reticulada, em quatro opções de visualização: vista superior, perspectiva, vista frontal e lateral. Em vermelho, estão as peças planificadas para corte.

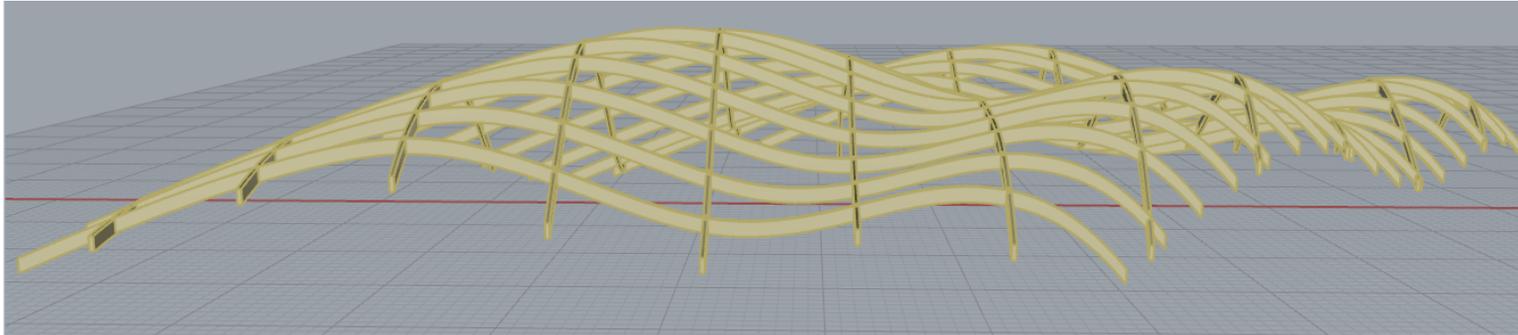


Figura 259: Modelo 3D, no *Rhinceros*, da estrutura reticulada. Fonte: Autora (2016).

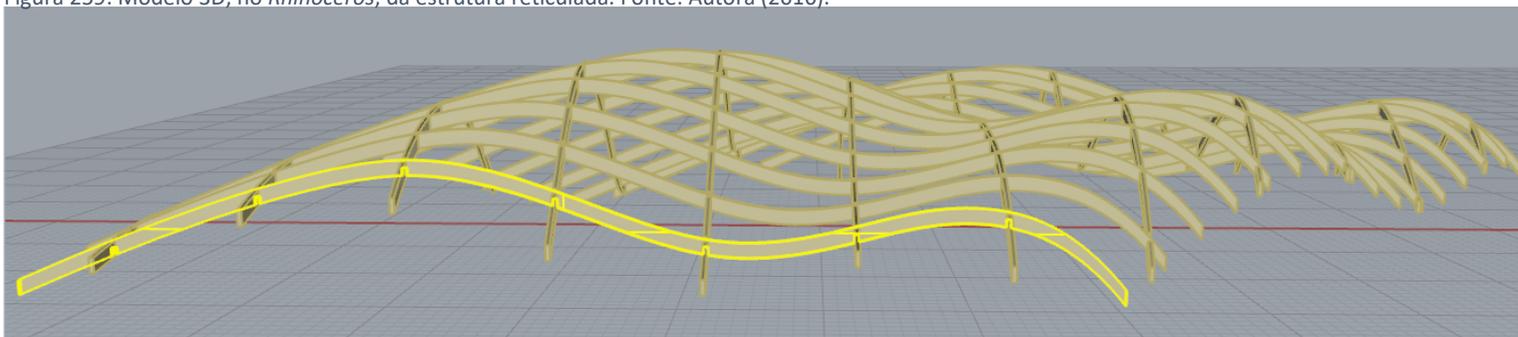


Figura 260: Modelo 3D, no *Rhinceros*, da estrutura reticulada. Em amarelo, uma das peças constituintes do eixo Y. Fonte: Autora (2016).

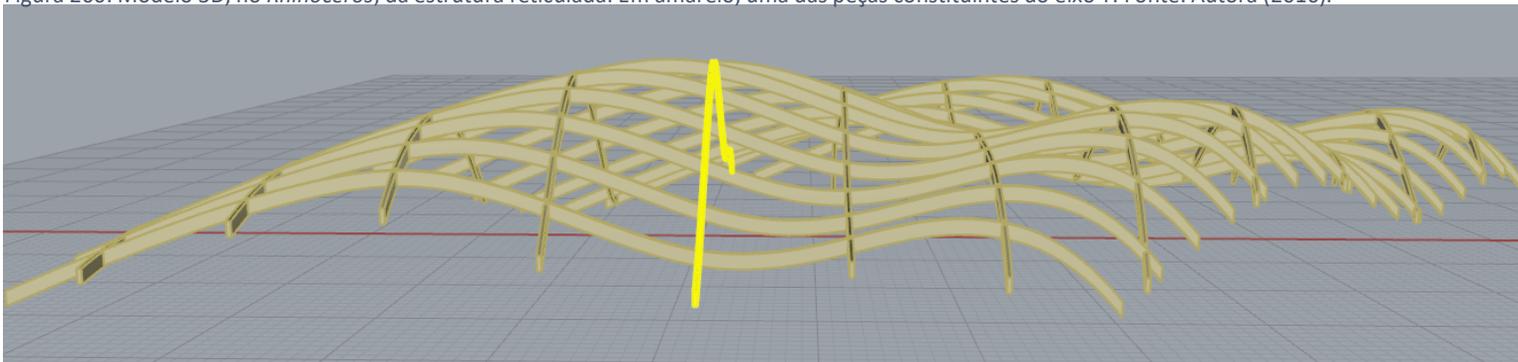


Figura 261: Modelo 3D, no *Rhinceros*, da estrutura reticulada. Em amarelo, uma das peças constituintes do eixo X. Fonte: Autora (2016).

A figura 259 mostra a estrutura reticulada: as peças com espessuras e dimensões finais. A figura 260 mostra uma das peças constituintes do eixo Y – destacada em amarelo. E, a figura 261, mostra – destacada em amarelo - uma das peças constituintes do eixo X.

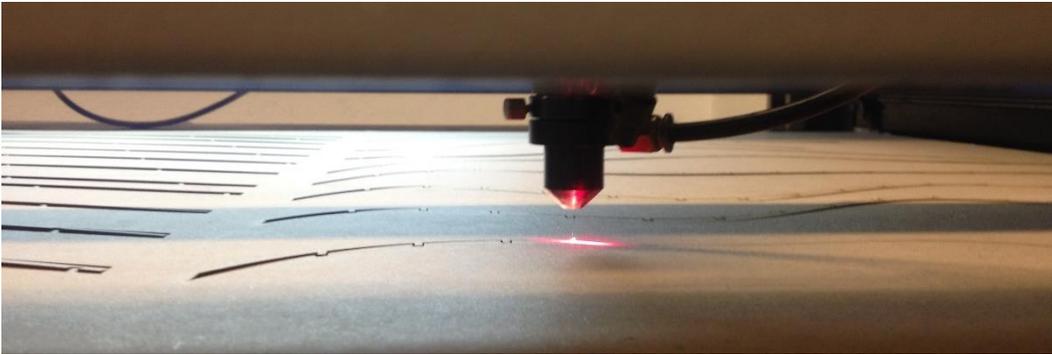


Figura 262: Processo de corte das peças na CNC *laser*. MDF 3 mm. Fonte: Autora (2016).

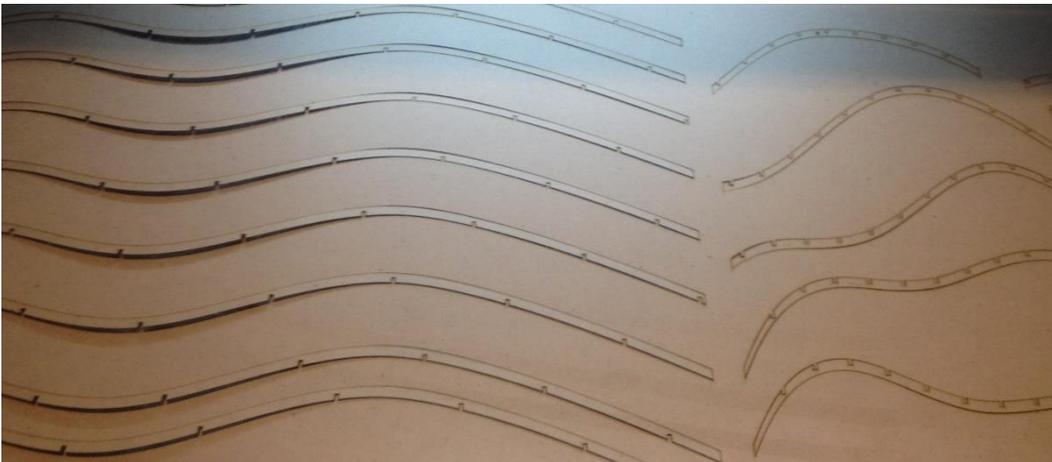


Figura 263: Etapa de corte - das peças na CNC *laser* – concluída. MDF 3 mm. Fonte: Autora (2016).

Os cortes das peças foram realizados na máquina CNC *laser*, no Laboratório da FAUUSP.

Foram utilizadas chapas de MDF, com espessura de 3 mm.

As nomenclaturas foram gravadas nas peças, pela CNC *laser*, para auxiliar no processo de montagem do modelo físico da estrutura.

Neste primeiro teste, as peças não apresentavam as ligações de prolongamento longitudinal.

A figura 262 mostra o momento do corte das peças, em MDF, CNC *laser*.

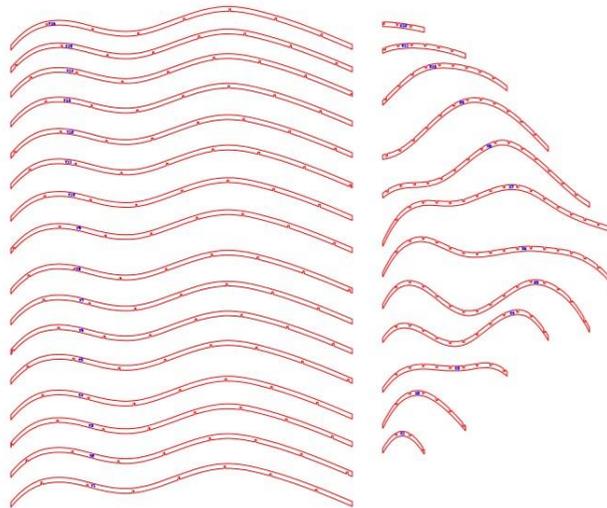


Figura 264: Desenhos das peças para corte na CNC *laser*. Em vermelho, linhas para corte. Em azul, linhas para gravação. Fonte: Autora (2016).

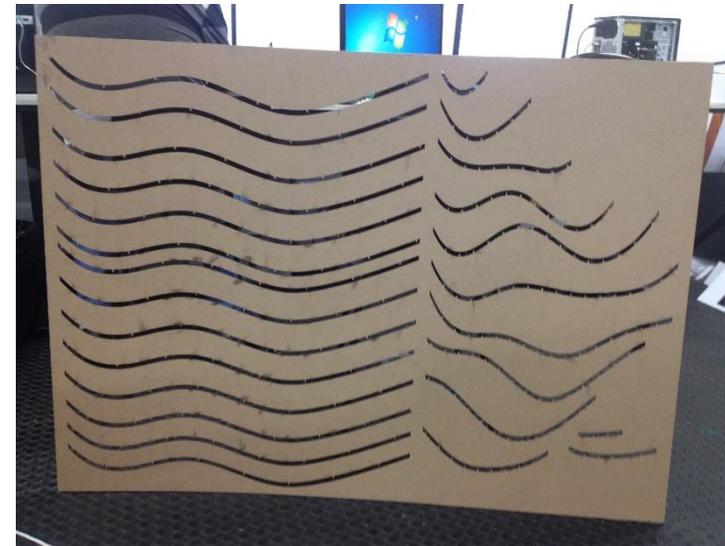


Figura 265: Chapa de MDF após a retirada das peças cortadas na CNC *laser*. Fonte: Autora (2016).

As peças planificadas foram numeradas de Y1 a Y16, para as peças longitudinais. E de X1 a X12 para as peças transversais. A figura 264 mostra as peças planificadas para corte. De acordo com a configuração da máquina CNC de corte, as linhas vermelhas indicam que será uma trajetória de corte: o feixe de *laser* passará com mais intensidade, se necessário mais de uma vez, até perfurar o material por completo e, portanto, cortar a peça desenhada; já as linhas em azul sinalizam que se trata de gravação na superfície do material [neste caso, apenas, letras e números para auxiliar no processo de montagem do modelo]. A figura 265 mostra a placa de MDF utilizada para corte das peças; pode-se observar que as peças da estrutura foram “destacadas” do material, com muita facilidade, sem danos às peças.



Figura 266: Modelo físico – escala reduzida – da estrutura reticulada. Peças cortadas na CNC *laser*. Montagem, apenas, por meio dos encaixes. Fonte: Autora (2016).



Figura 267: Detalhe do modelo físico – escala reduzida – da estrutura reticulada. Peças à esquerda apresentam as gravações realizadas pela CNC *laser*. Fonte: Autora (2016).

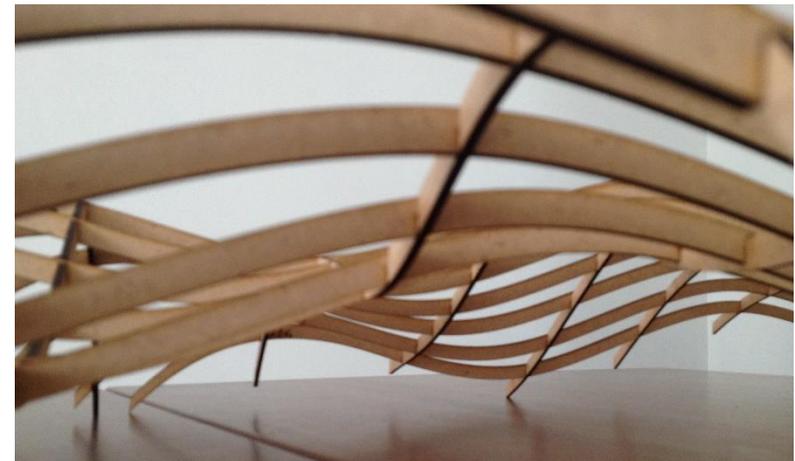


Figura 268: Detalhe do modelo físico – escala reduzida – da estrutura reticulada. Fonte: Autora (2016).

As peças cortadas à *laser*, têm como característica final, as bordas carbonificadas, em função da trajetória do *laser*, que queima o material, ocasionando o corte da peça, de acordo com o desenho.

Na figura 269, pode-se observar as partes mais escuras das peças, queimadas. As peças foram desenhadas para que a espessura do material utilizado para corte, fosse a espessura da peça; por isso, as partes superiores e inferiores das peças, tem o aspecto carbonizado.



Figura 269: Modelo físico – escala reduzida – da estrutura reticulada. Bordas das peças carbonizadas, em decorrência do processo de corte na CNC *laser*. Fonte: Autora (2016).



Figura 270: Faculdade de Arquitectura da Universidade de Coimbra. Fonte: Autora (2018).



Figura 271: Cartaz de divulgação do workshop elaborado. Fonte: Autora (2018).

Em outubro de 2018, contemplada com a Bolsa Mobilidade Santander Totta, foi possível realizar a pesquisa no Departamento de Arquitectura, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, sob orientação do Prof. Pedro Filipe Martins. O enfoque da investigação, neste momento, deu-se aos encaixes de prolongamento longitudinal das vigas.

Tratando-se de uma estrutura reticulada, as ligações entre as peças são de extrema importância. A característica desta tipologia, implica em dois tipos de ligações:

- ligações perpendiculares entre as peças;
- ligações de prolongamento das peças.

Para as ligações perpendiculares entre as peças, optou-se pelo encaixe de corte perpendicular – figuras 272 e 273. E, para as ligações de prolongamento das peças adotou-se o encaixe rabo de andorinha. A programação no *Grasshopper* permite parametrizar todos os encaixes. No caso do encaixe perpendicular, as figuras 272 e 273 mostram a opção de corte de 50% para cada peça. Mas, há a possibilidade de definir dimensões de corte distintas para as peças superiores e inferiores, por exemplo: 30 e 70%.

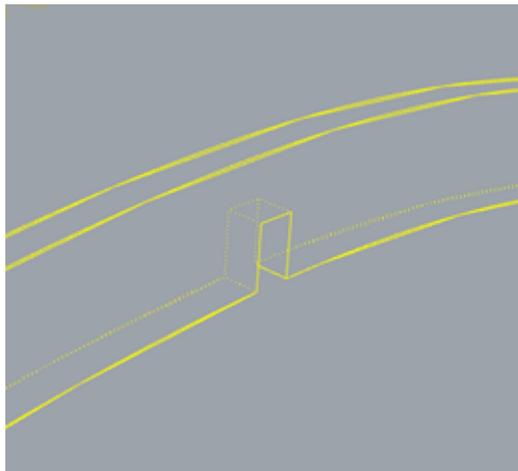


Figura 272: Encaixe de corte perpendicular. Peça superior. Corte definido: 50%. Fonte: Autora (2018).



Figura 273: Encaixe de corte perpendicular. Peça inferior. Corte definido: 50%. Fonte: Autora (2018).

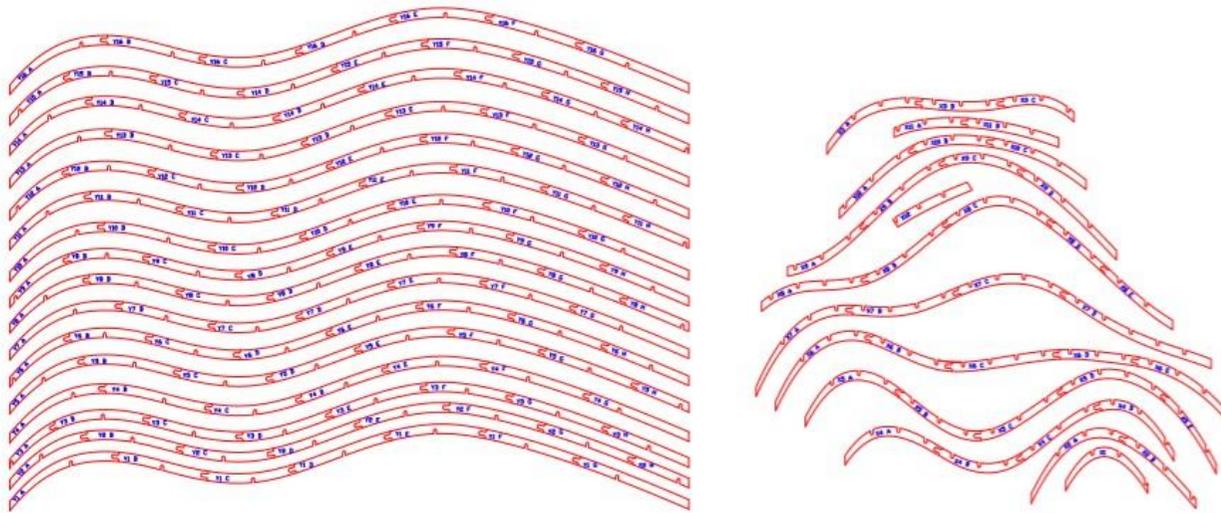


Figura 274: Desenhos das peças – com encaixes de prolongamento – para corte na CNC *laser*. Em vermelho, linhas para corte. Em azul, linhas para gravação. Fonte: Autora (2018).

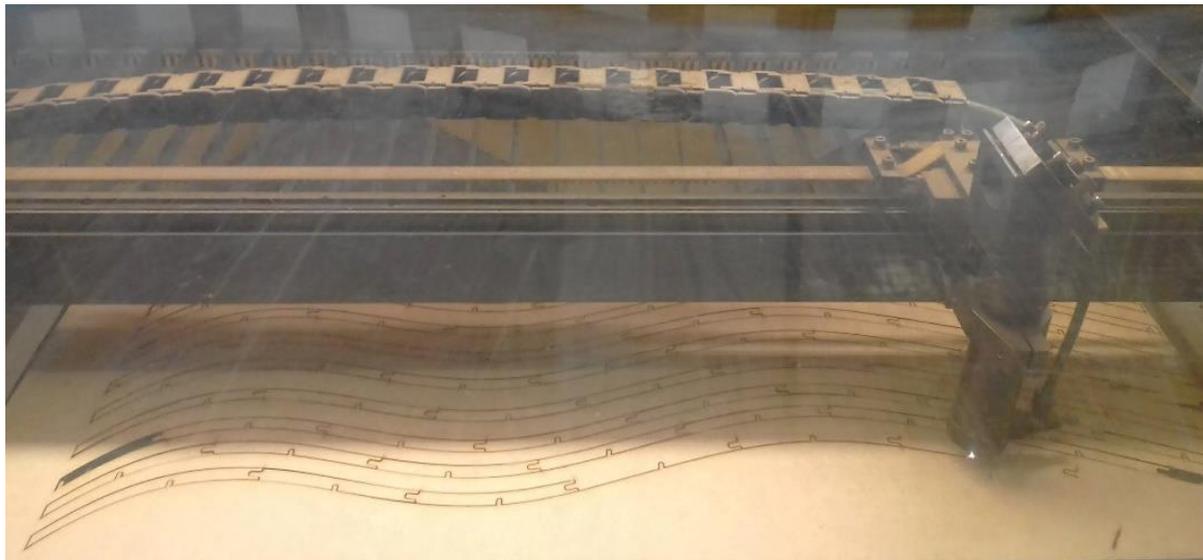


Figura 275: Processo de corte das peças – com encaixes de prolongamento – na CNC *laser*. MDF 3mm. Fonte: Autora (2018).

Pensando-se numa transposição para escala real, as peças precisam ter dimensões que se adequem ao tamanho das placas de bambu laminado. Portanto, houve a necessidade de desenhar encaixes de prolongamento das vigas, considerando-se as dimensões da placa de bambu laminado: 2440 x 1220 x 38 mm. Para otimizar o aproveitamento da placa, no processo de corte das peças, considerou-se 1200 mm – como comprimento máximo de cada peça, ou seja, os encaixes foram desenhados respeitando este limite.

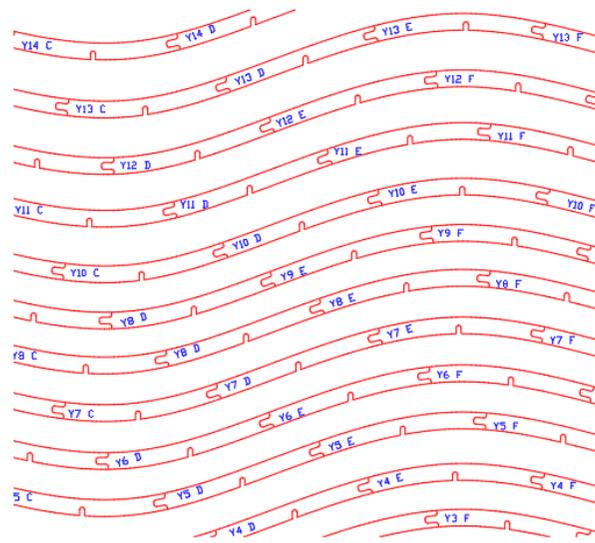


Figura 276: : Desenhos das peças – com encaixes de prolongamento – adaptados para CNC fresadora. Em vermelho, linhas para corte. Em azul, linhas para gravação. Fonte: Autora (2018).

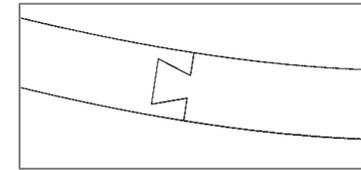


Figura 277: Encaixe de prolongamento: rabo de andorinha. Fonte: Autora (2018).

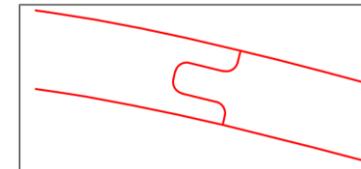


Figura 278: Encaixe de prolongamento: rabo de andorinha adaptado para CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).

Neste momento da pesquisa, os modelos físicos são realizados, em escala reduzida, utilizando-se MDF. Entretanto, como o objetivo é executar as peças em bambu laminado, será necessário utilizar a fresadora CNC, em função da espessura do material; as máquinas de corte à *laser*, disponíveis no laboratório da FAUUSP, não permitem espessuras superiores a 3 mm. Considerando-se a execução na fresadora, há ajustes necessários aos desenhos. Por exemplo, a trajetória da fresa não permite ângulos internos a 90 graus. Para as ligações de prolongamento das peças, optou-se pelo encaixe tipo rabo de andorinha [figura 277]. A figura 278, mostra o encaixe tipo rabo de andorinha - com adaptações - para corte na fresadora CNC: os ângulos foram arredondados, de acordo com o percurso da fresa. A figura 276 representa um trecho das vigas planificadas, para corte, já com os encaixes de prolongamento e as respectivas numerações das peças [em azul para gravação].

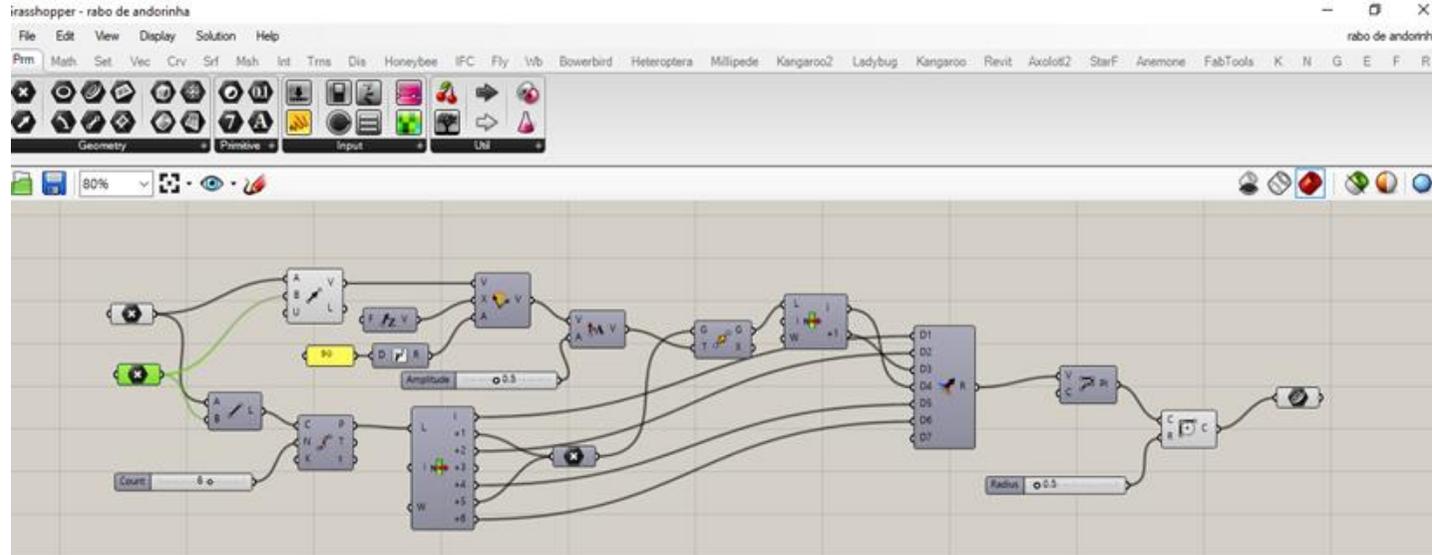


Figura 279: Programação no *Grasshopper* para parametrização do encaixe rabo de andorinha. Fonte: Autora (2018).

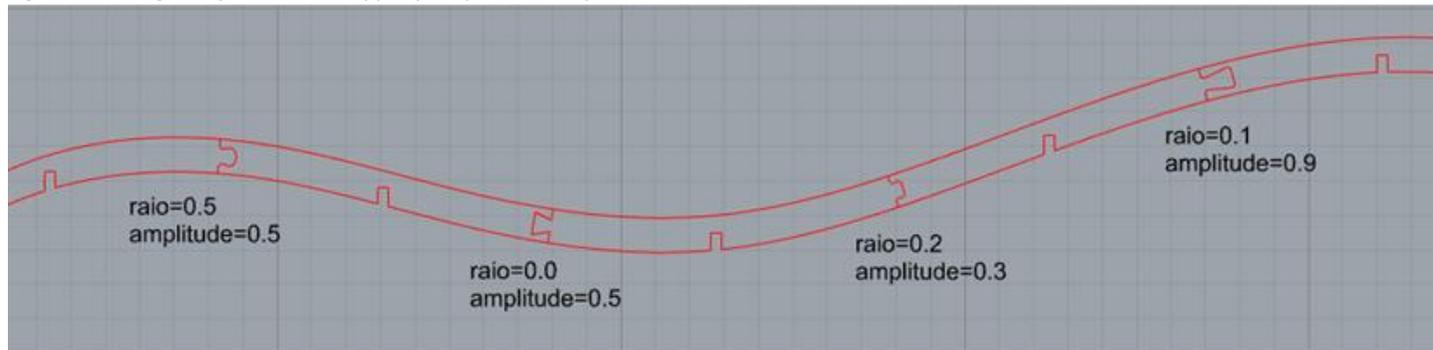
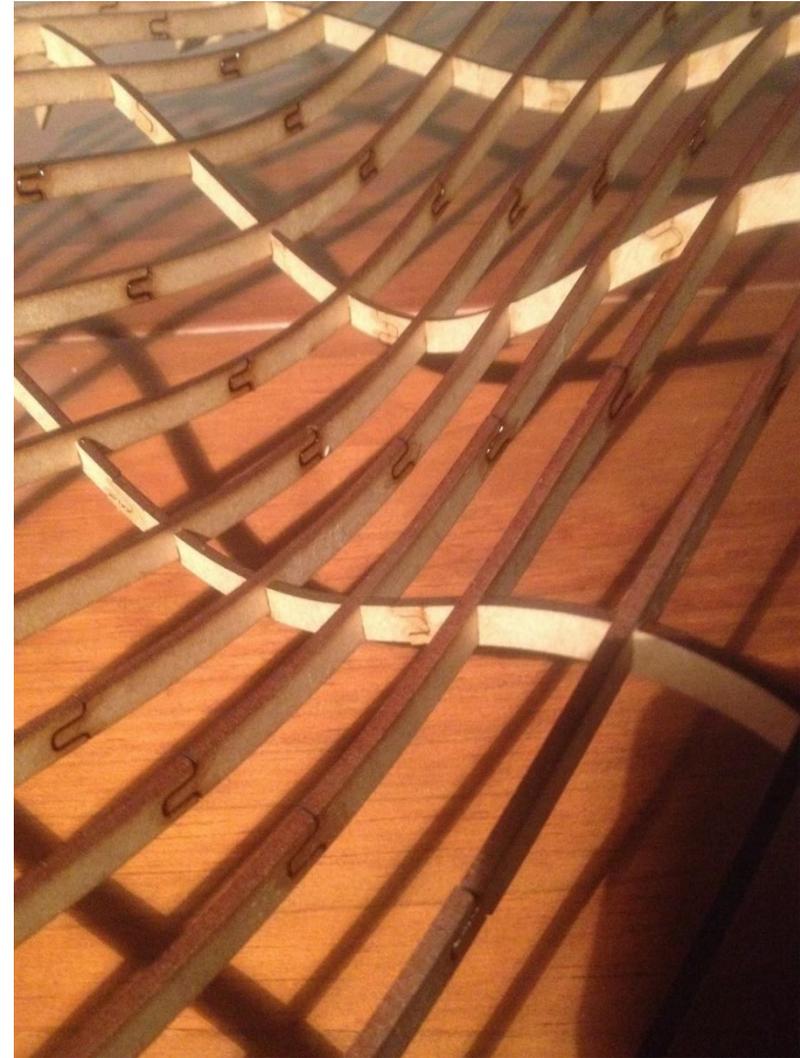


Figura 280: Opções do encaixe, rabo de andorinha, no *Rhinceros*, de acordo com os parâmetros estabelecidos no algoritmo. Fonte: Autora (2018).

A figura 279 mostra a interface do *Grasshopper*, com a programação para parametrização do encaixe rabo de andorinha. A figura 280 mostra algumas das configurações possíveis para o encaixe rabo de andorinha: o parâmetro denominado 'amplitude', se refere à dimensão do encaixe propriamente; e o parâmetro denominado 'raio' define os ângulos do encaixe.



Todas as peças da estrutura - em MDF [3 mm] - foram cortadas na CNC *laser*. Posteriormente, o modelo físico foi montado, seguindo as numerações gravadas nas peças. Como reforço à fixação dos encaixes, longitudinais, utilizou-se cola branca.



Figuras 281 a 283: Modelo físico – escala reduzida – da estrutura reticulada. Corte das peças na CNC *laser*. Desenhos dos encaixes de prolongamento – rabo de andorinha - adaptados para futura execução na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).

Na etapa seguinte, de investigação dos modelos físicos, as peças foram executadas na placa bambu de laminado. Entretanto, primeiramente as peças foram cortadas em placas de aglomerado de madeira, com espessura idêntica à placa de bambu laminado. Este primeiro teste teve o intuito de verificação do desenho, antes da execução no material objeto de estudo. Foram cortadas na CNC fresadora, no laboratório da FAUUSP. Nesta fase, as dimensões das peças foram aumentadas, em relação aos modelos anteriores em MDF. Para os desenhos, considerou-se o diâmetro da fresa utilizada [6 mm].

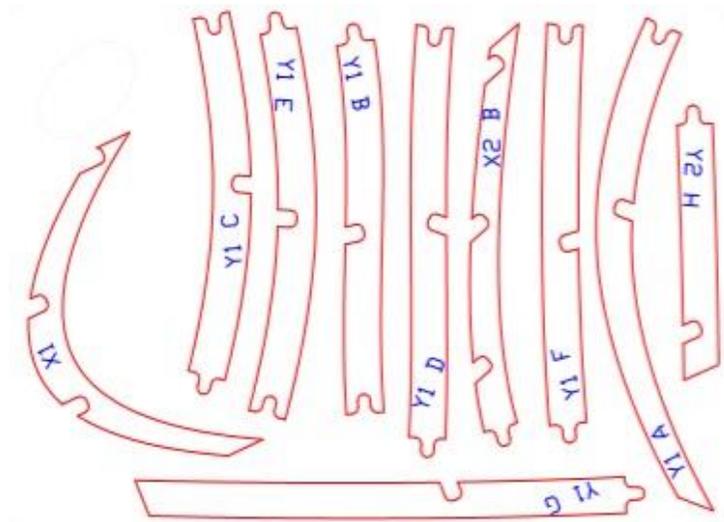


Figura 284: Desenhos das peças para execução na CNC fresadora, considerando diâmetro da fresa. Fonte: Autora (2018).



Figura 285: Retirada manual das peças – da placa de aglomerado – após execução na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).

A figura 284 mostra as peças planificadas para corte. Na figura 285, as peças já foram cortadas e estão sendo removidas da placa de aglomerado com auxílio de ferramentas manuais.



Figura 286: Placa de bambu laminado durante processo na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).



Figura 287: Retirada das peças – da placa de bambu laminado - após processo na CNC fresadora, utilizando serra de fita. Fonte: Autora (2018).



Figura 288: Acabamento das peças de bambu laminado, utilizando serra de fita, após processo na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).

As mesmas peças [figura 284], neste momento, foram cortadas na CNC fresadora utilizando-se a placa de bambu laminado. A figura 286 mostra o processo de corte das peças na CNC fresadora. Na figura 287 pode-se observar o procedimento de retirada das peças, da placa de bambu laminado, utilizando-se serra de fita. A figura 288 mostra a etapa de acabamento das peças, de bambu laminado, utilizando-se a serra de fita, para aparar as bordas das peças.



Figura 289: Peças de bambu laminado com encaixes longitudinais. Fonte: Autora (2018).



Figura 290: Peças de bambu laminado com encaixes perpendiculares. Fonte: Autora (2018).



Figura 291: Peças de bambu laminado: executadas na CNC fresadora. Fonte: Autora (2018).

Posteriormente, as peças de laminado de bambu foram lixadas manualmente, até que se conseguisse o acabamento desejado. Esta etapa é importante para remoção das aparas de fibras do bambu. Na figura 289 as peças superiores, acima na imagem, são moldes de papel, para orientar a montagem das peças de laminado de bambu [nas peças de bambu não foram feitas gravações com numerações]. Na figura 290 as peças correspondem às vigas Y1 e X1, da estrutura proposta [que fora toda montada em MDF, conforme imagens anteriores].

Contemplada com a bolsa da CAPES, refere à verba PROEX, em outubro de 2019, foi realizada investigação no DFL [*Digital Fabrication Laboratory*], da Faculdade de Arquitectura, da Universidade do Porto, sob orientação do Professor Dr. José Pedro Sousa, coordenador do DFL.

O trabalho desenvolvido no DFL abrange dois aspectos fundamentais à tese: embasamento teórico a partir de referências do próprio laboratório e acervo da biblioteca; experimentação prática, apropriando-se dos equipamentos e instalações do laboratório.



Figuras 292 e 293: Instalações e equipamentos do laboratório DFL. Fonte: Autora (2019).

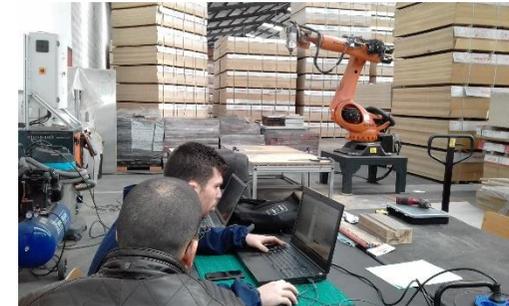


Figura 294: Braço robótico do laboratório DFL. Fonte: Autora (2019).

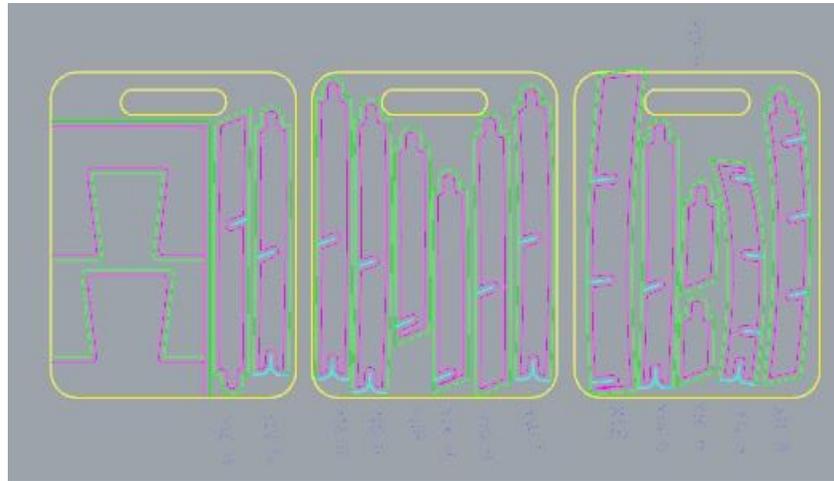


Figura 295: Desenhos das peças no *software Rhinoceros* para corte das placas de bambu laminado no braço robótico do laboratório DFL. Fonte: Autora (2019).

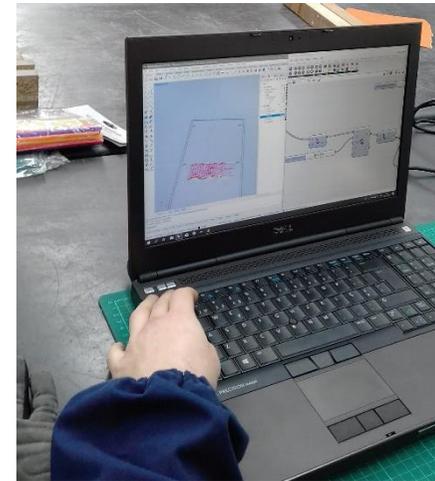


Figura 296: Algoritmo no *Grasshopper* para programar as etapas de corte no braço robótico do laboratório DFL. Fonte: Autora (2019).

O processo de desenho, programação e execução dos protótipos – para utilização do braço robótico – é bem diferente da CNC fresadora existente no laboratório da FAUUSP. Portanto, houve a necessidade de desenhar novamente as peças, de forma que a programação computacional do braço robótico, pudesse entender os parâmetros.

A figura 295 apresenta os desenhos das peças: as linhas amarelas são as dimensões da placa de bambu laminado e, portanto, o limite da área de corte; as linhas em magenta representam os desenhos, propriamente, das peças – ou seja, sua dimensão final; as linhas em verde, designam a trajetória da fresa, considerando-se o eixo da fresa.

A figura 296 mostra o *software Grasshopper* com a programação das etapas de corte no braço robótico.



Figura 297: Fixação das placas de laminado de bambu na mesa de corte do braço robótico KUKA do laboratório DFL. Fonte: Autora (2019).

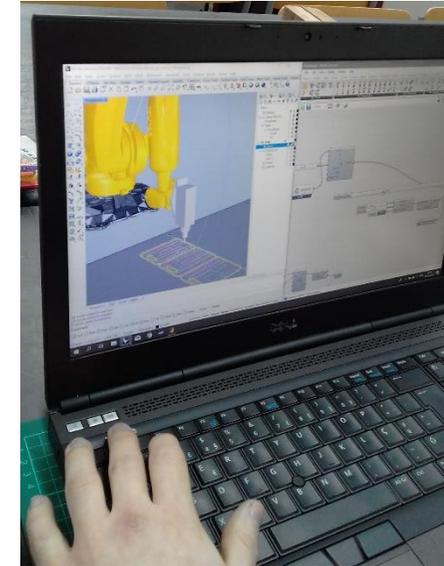


Figura 298: Programação no *software Grasshopper*, para instruções de corte das peças pelo braço robótico KUKA. Fonte: Autora (2019).

Assim como na fresadora CNC, antes da execução do braço robótico, é necessário fixar as placas de bambu laminado na mesa de corte, para que as placas permaneçam sem movimentação, mesmo sob impacto da fresa. A programação do *software Grasshopper*, comanda o processo de execução, definindo ponto de partida e percursos a serem adotados pelo braço robótico. Por exemplo, há a possibilidade de executar uma peça só, de cada vez; ou fazer o desbaste do material por camadas, ou seja, todas as peças vão sendo desbastadas, por camadas, de acordo com trajetória da fresa, até que não exista mais material entre as peças, originando o "corte" das peças. Neste protótipo, utilizou-se o desbaste, de todas as peças, simultaneamente, por camadas.



Figuras 299 e 300: Comandos por controle remoto para instruções de corte das peças pelo braço robótico KUKA. Fonte: Autora (2019).



Figura 301: Proteção para execução dos cortes das peças pelo braço robótico KUKA. Fonte: Autora (2019).

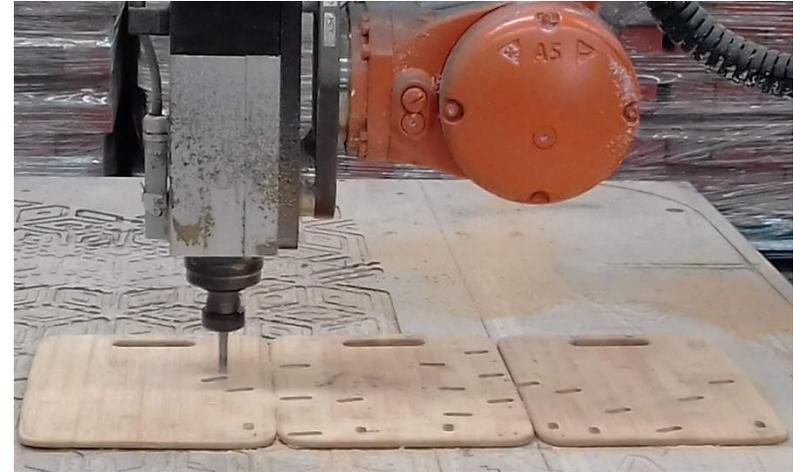
O braço robótico é comandado por um controle remoto – figuras 299 e 300. Por questões de segurança, coloca-se um anteparo [figura 301] para evitar que resíduos do material – durante o processo – atinjam as pessoas. A programação foi definida para executar, primeiramente, todos os furos que correspondem aos cortes para encaixe. Pode-se observar nas figuras 302 e 303, a qualidade do acabamento. Devido à resistência da placa de bambu laminado, foi necessário - fixar novamente - as placas à mesa de corte, após a execução dos primeiros desbastes [figura 304].



Figuras 302 e 303: Início dos cortes das peças - nas placas de bambu laminado - pelo braço robótico KUKA. Fonte: Autora (2019).



Figura 304: Repetição da etapa de fixação das placas de bambu laminado, na mesa de corte do braço robótico KUKA, após a realização dos primeiros cortes. Fonte: Autora (2019).



Figuras 305 a 308: Execução dos cortes das peças - nas placas de bambu laminado - pelo braço robótico KUKA. Fonte: Autora (2019).

As figuras acima mostram o processo de execução das peças, pelo braço robótico. Na figura 308 é possível observar o desbaste, por camadas, de todas as peças simultaneamente, conforme mencionado.

Para a execução das peças, levou-se – ao DFL - três placas de bambu laminado. Portanto, foi possível montar, apenas, um trecho da estrutura reticulada em estudo. Entretanto, foram realizados os dois tipos de encaixes propostos: longitudinais e perpendiculares.

O resultado dos cortes é significativamente mais preciso, não havendo necessidade de pós-acabamento, como houve para as peças cortadas na CNC fresadora.



Figura 309: Peças de bambu laminado – trecho da estrutura reticulada em estudo – escala reduzida. Fonte: Autora (2019).



Figura 310: Peças de bambu laminado – encaixe longitudinal – executadas no braço robótico KUKA, do DFL. Fonte: Autora (2019).



Figura 311: Peças de bambu laminado: encaixes perpendiculares e longitudinais. Fonte: Autora (2019).



Figura 312: Peças de bambu laminado: encaixe perpendicular. Fonte: Autora (2019).



Figura 313: Peças de bambu laminado: encaixe longitudinal. Fonte: Autora (2019).

As figuras acima correspondem a trechos da estrutura reticulada, vigas X e Y, executadas em bambu laminado, utilizando-se o braço robótico.

Na figura 312 é possível observar o encaixe de ligação perpendicular entre as peças, com corte de 50% para a viga superior e 50% para a viga inferior. E, na extremidade, o encaixe para prolongamento das peças, tipo rabo de andorinha, com adaptações nos ângulos. A figura 313 mostra o detalhe do encaixe, para prolongamento das peças, tipo rabo de andorinha, com adaptações nos ângulos.



No DFL, também, executou-se um encaixe de prolongamento das peças, tipo rabo de andorinha, numa escala um pouco maior, a fim de investigar-se uma peça com dimensões aproximadas à escala real, para construção da estrutura reticulada. As dimensões são aproximadas, pois para este protótipo não foi possível utilizar a placa de bambu laminado, com espessura de 38 mm, da empresa Moso, adequadas à construção civil; utilizou-se tábuas comercializadas com 8 mm de espessura. A finalidade foi testar as máquinas CNC para fabricação digital de peças de bambu laminado; os protótipos demonstraram que sua aplicação é possível, viável e eficiente.

Figuras 314 e 315: Peças de bambu laminado: encaixe longitudinal tipo rabo de andorinha Fonte: Autora (2019).

6.3 ANÁLISES DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL: SIMULAÇÕES DIGITAIS

A definição no *plug-in Grasshopper* foi desenvolvida pelo arquiteto Henrique Lattes Borçato. Este algoritmo permite a simulação de diferentes configurações da estrutura reticulada a partir da concepção de superfícies. Também possibilita, por meio do *plug-in Karamba 3D*⁸⁶, que sejam realizadas análises do comportamento da estrutura considerando-se como material o bambu laminado. A definição foi concebida de forma a parametrizar dados, tanto em relação às características da estrutura – como dimensões das peças e posicionamento de encaixes e pontos de suporte – quanto em relação às propriedades do material⁸⁷.

⁸⁶ *Karamba3D* é uma ferramenta paramétrica de engenharia estrutural que fornece análises precisas de treliças espaciais, estruturas e cascas. Está totalmente integrado no ambiente de design paramétrico do *Grasshopper*, um *plug-in* para a ferramenta de modelagem 3d *Rhinoceros*. Isso torna mais fácil combinar modelos geométricos parametrizados, cálculos de elementos finitos e algoritmos de otimização como *Galapagos.now*. Fonte: karamba3d.com (2021).

A parametrização possibilita a realização de inúmeras simulações – ajustando valores referentes aos diferentes atributos do modelo – permitindo a comparação de resultados e, por fim, ajustes necessários ao projeto.

As superfícies foram geradas a partir da interpolação de curvas senoidais, nas quais alteraram-se suas frequências e amplitudes. Posteriormente, estas superfícies foram subdivididas em malhas perpendiculares, com densidades variadas, dentre as quais, escolheu-se a subdivisão 14 x 18, conforme figura 316.

⁸⁷ Para a inserção dos dados, referentes ao material, e fórmulas necessárias às análises a serem calculadas no *plug-in Karamba 3D*, houve a colaboração do arquiteto Caio Castriotto.

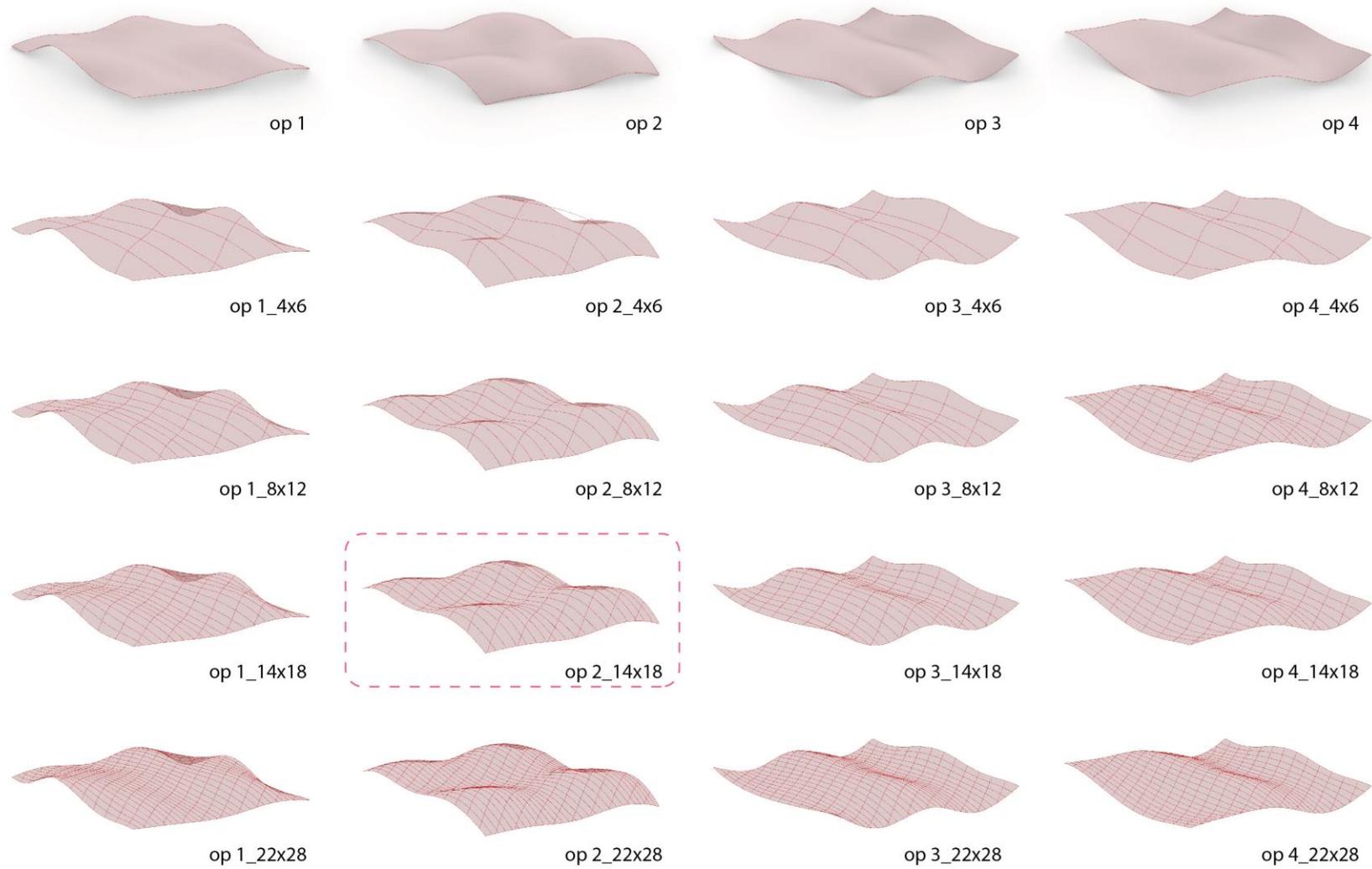


Figura 316: Superfícies geradas a partir da interpolação de curvas senoidais. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

Durante o processo de elaboração do algoritmo, no *Karamba 3D*, uma das dificuldades, foi encontrar na literatura dados referentes ao bambu laminado, como fórmulas adequadas aos cálculos e, também, alguns valores específicos. A maioria dos ensaios de laboratórios, descritos na literatura recente, pautaram-se nas normas de madeira ou de madeira laminada colada. Possivelmente, estudos futuros poderão utilizar como referências as normas – considerando produtos de bambu processado – uma vez que houve atualizações recentes, na ASTM e na ISO, conforme mencionado no capítulo 2.

No presente trabalho, para a análise realizada por meio do *Karamba 3D*, a premissa foi utilizar somente valores e fórmulas atribuídos ao bambu laminado. Para tanto, utilizou-se a norma ASTM D5456 – 21 e o artigo publicado pela Prof^a. Dra. Bhavna Sharma⁸⁸, com valores referentes às características mecânicas do bambu laminado. A tabela 13 apresenta os valores, indicados no referido estudo, os quais foram utilizados na definição.

⁸⁸ Sharma, B, Bauer, H, Schickhofer, G & Ramage, MH 2017, 'Mechanical characterisation of structural laminated bamboo', Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, vol. 170, no. 4, pp. 250-264. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00061>

BAMBU LAMINADO	DENSIDADE	COMPRESSÃO		TRAÇÃO		CISALHAMENTO	FLEXÃO	
ESPÉCIE		Tensão de compressão paralela às fibras	Módulo de compressão paralela às fibras	Tensão de tração paralela às fibras	Módulo de tração paralela às fibras	Tensão de cisalhamento paralelo às fibras	Módulo de ruptura_MOR	Módulo de elasticidade_MOE
	Kg/m³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	GPa
<i>Phyllostachis pubescens</i>	666	34.4	8166	32	8062	5	49	8612

Tabela 13: Propriedades mecânicas do bambu laminado. Fonte: Sharma et al. (2017) adaptado pela autora (2021).

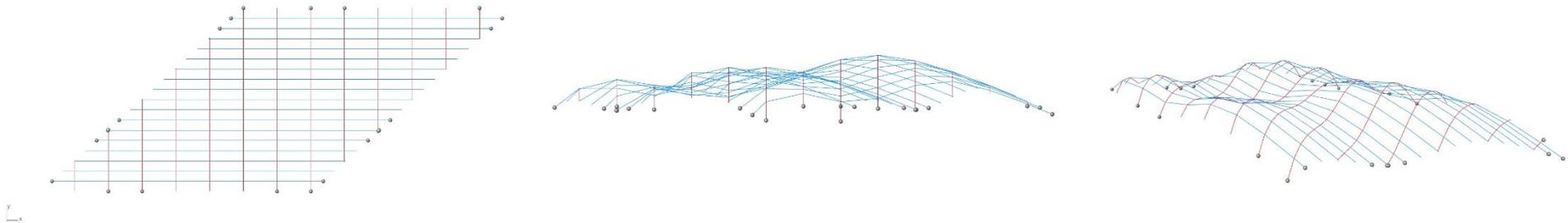


Figura 317: Estrutura reticulada representada de forma unifilar para análise do *Karamba 3D*. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

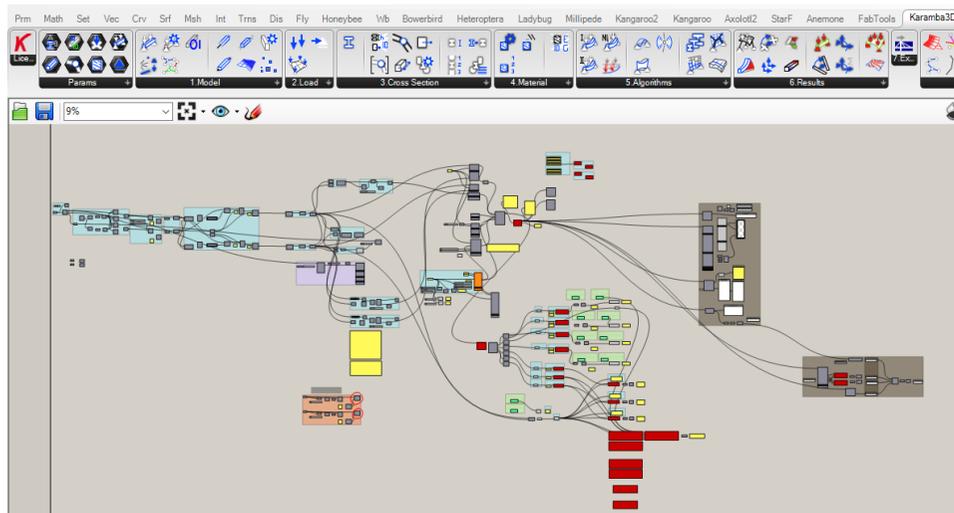


Figura 318: Algoritmo desenvolvido no *Grasshopper*. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

Embora a definição no *grasshopper* permita a parametrização da geometria, atribuindo valores aos elementos constituintes da estrutura, para que o *Karamba 3D* realize as análises é necessário que a geometria seja representada de maneira unifilar e que as curvas sejam convertidas em segmentos de retas; portanto, foram desenhadas linhas considerando-se os eixos das vigas. A figura 317 mostra esta representação unifilar da estrutura – cada direção com uma cor atribuída – e, os pontos de apoio da estrutura. A figura 318 mostra o algoritmo desenvolvido no *grasshopper*, já com os comandos do *Karamba 3D*.

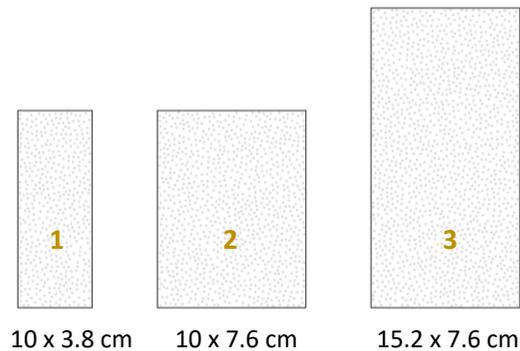


Figura 319: Dimensões das secções adotadas para análise comparativa entre as três estruturas. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

Parametrizando os dados referentes à geometria, estabeleceu-se três dimensões de secções das peças, conforme demonstra a figura 319: na opção 1, a secção tem dimensões de 10 cm de altura e 3.8 cm de espessura [valor referente à espessura da placa de bambu laminado comercializado]. Na opção 2, mantém-se a altura da secção – 10 cm – mas, o valor referente à espessura, é duplicado – 7.6 cm – [considerando-se a utilização de duas placas de bambu laminado]. A opção 3, mantém a espessura referente às duas placas – 7.6 cm – mas, a altura da secção é elevada para 15.2 cm.

Para as simulações, adotou-se o valor de 400 Kg/m² referente à carga acidental.



Figura 320: Configurações da estrutura reticulada considerando as três opções de secções. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

A figura 320 mostra as configurações da estrutura reticulada considerando as três opções de secções: 10x3.8cm, 10x7.6cm e 15x7.6cm. Adotou-se estas três tipologias, para realização de uma análise comparativa de desempenho da estrutura, considerando-se as dimensões das peças. Esta estratégia foi utilizada com intuito de explorar a característica do *plug-in Karamba 3D*, de ser um complemento ao processo de projeto, permitindo a realização de avaliações e considerações, referentes ao comportamento estrutural, que possibilitam ajustes na concepção do projeto e, conseqüentemente, otimizações da forma em função do material analisado.

A seguir serão apresentadas imagens demonstrando os resultados das análises referentes ao comportamento estrutural, considerando-se as três opções de estrutura reticulada, de acordo com as dimensões das secções mencionadas.

Para cada uma das opções - da estrutura reticulada - foram realizadas duas análises, referentes aos esforços de tração e compressão: a primeira [posicionada do lado esquerdo da página] demonstra as regiões de concentração dos esforços; e, a segunda análise [posicionada do lado direito da página], considera uma porcentagem extra de deformação da estrutura, fazendo uma simulação mais exagerada do comportamento estrutural.

Os esforços de compressão são representados pela cor vermelha; e a cor azul é atribuída aos esforços de tração. Ambos são representados por uma graduação, onde o tom mais

saturado demonstra maior concentração de esforços; e o tom mais suave, menor concentração.

A legenda [figura 321] gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, demonstra a gradação cromática, referente à concentração de esforços de tração e compressão, na estrutura; bem como os valores referentes a cada tipo de esforço, nas regiões correspondentes. A visualização do comportamento da estrutura é facilitada pela atribuição das cores ao modelo tridimensional, conforme demonstram as imagens a seguir.

Nas próximas páginas, serão apresentadas as seguintes imagens do modelo, para cada uma das simulações realizadas: vista superior, vista frontal e perspectiva.

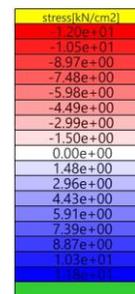


Figura 321: Modelo da legenda – para tração e compressão - gerada pelo *plug-in Karamba 3D*. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

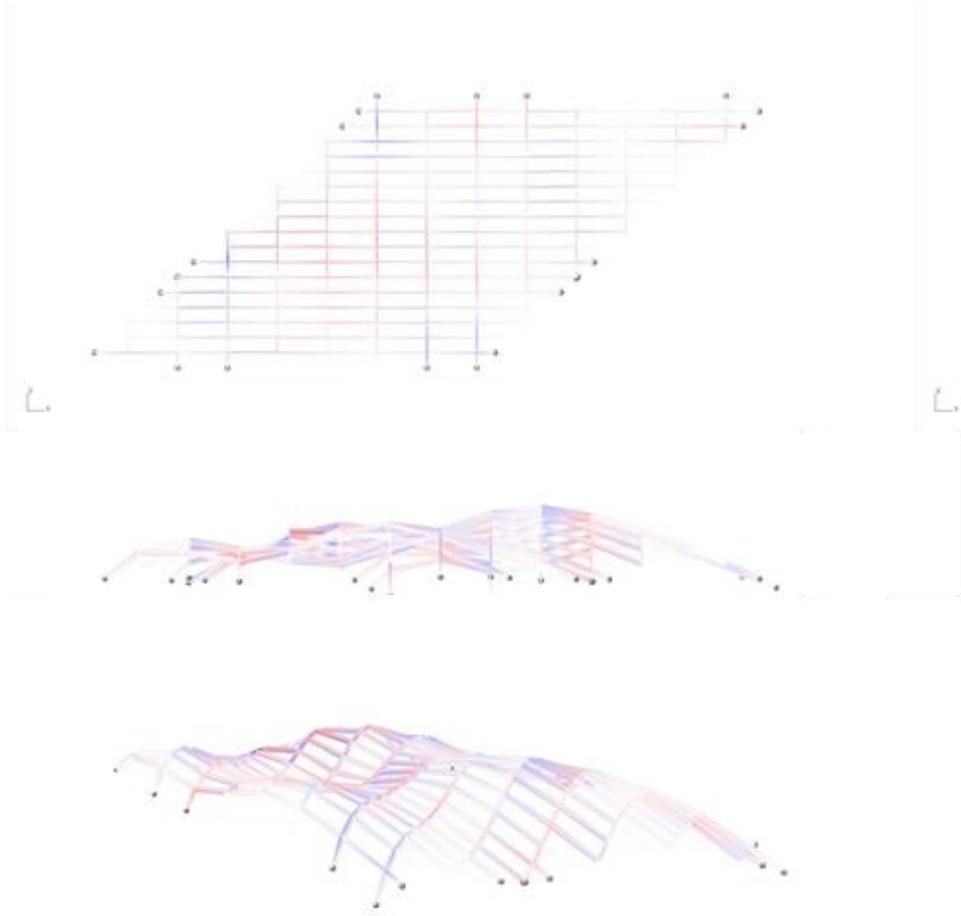


Figura 322: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 1. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

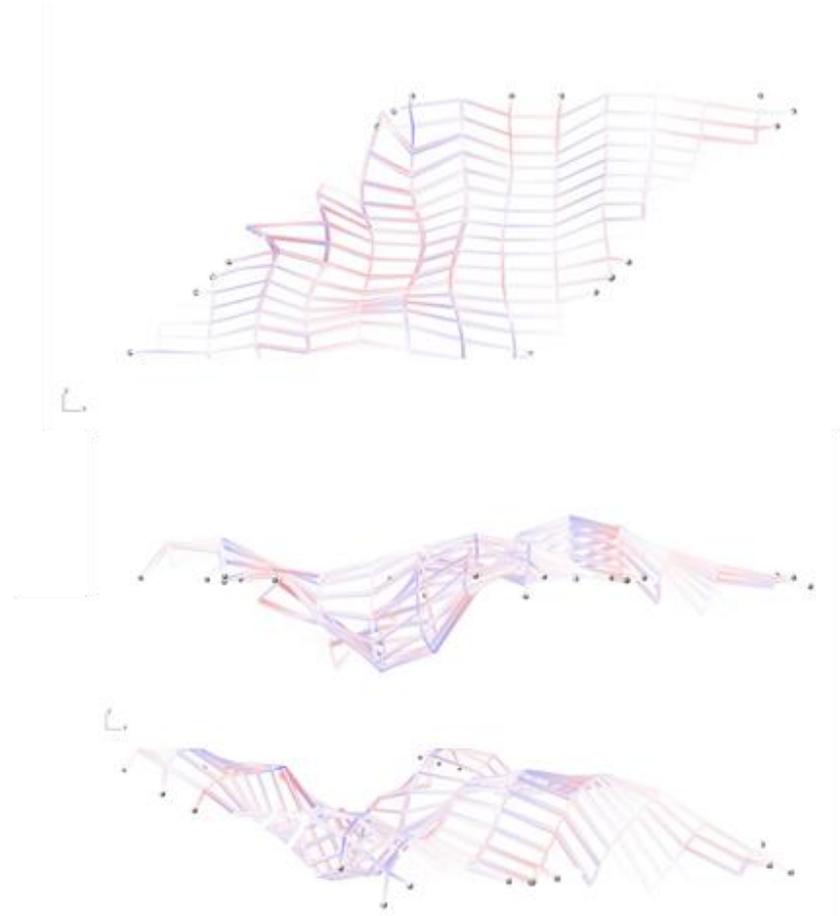


Figura 323: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 1: simulação com deformação de 15%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).



A figura 322 apresenta o comportamento estrutural - da opção 1 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando os esforços de tração e compressão. A figura 323 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 15%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 322.

6_Construção representativa: estrutura reticulada de bambu laminado

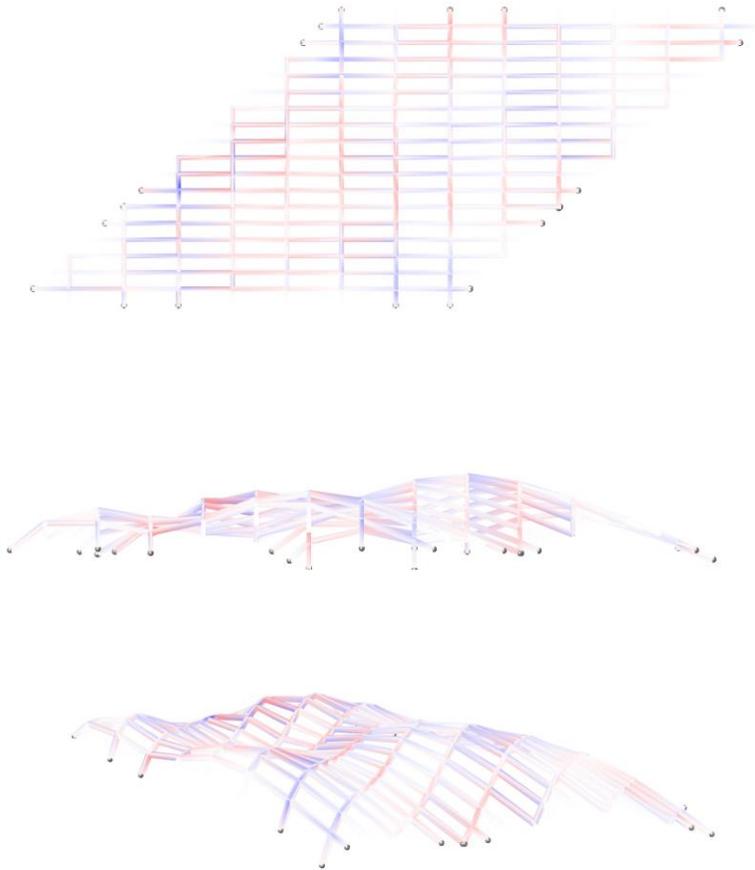


Figura 324: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 2. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

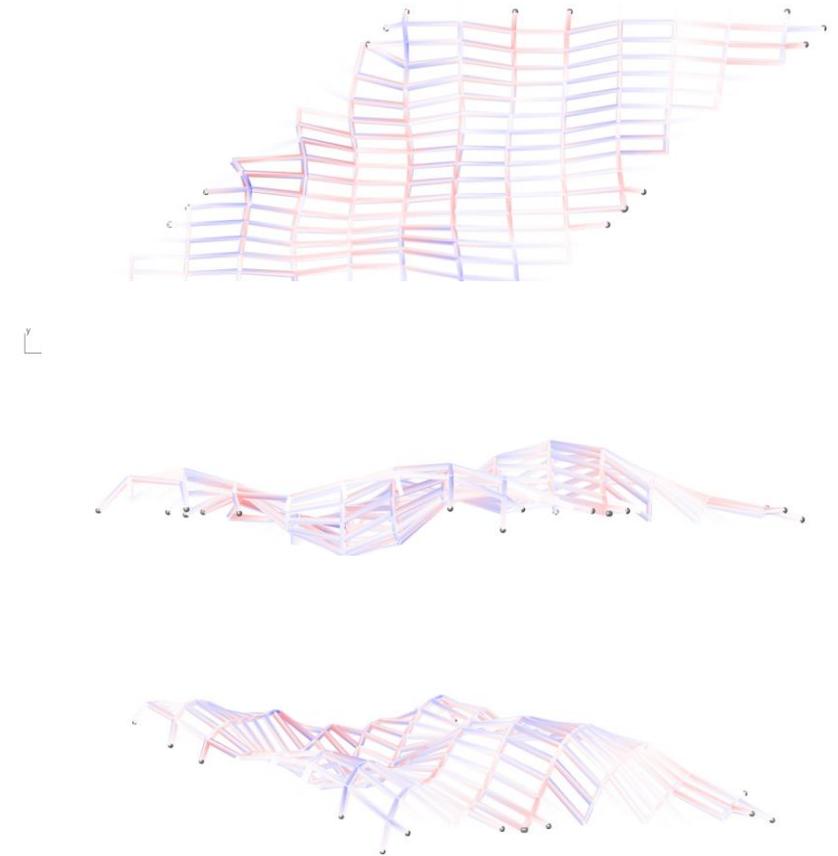


Figura 325: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 2: simulação com deformação de 30%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).



A figura 324 apresenta o comportamento estrutural - da opção 2 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando os esforços de tração e compressão. A figura 325 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 30%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 324.

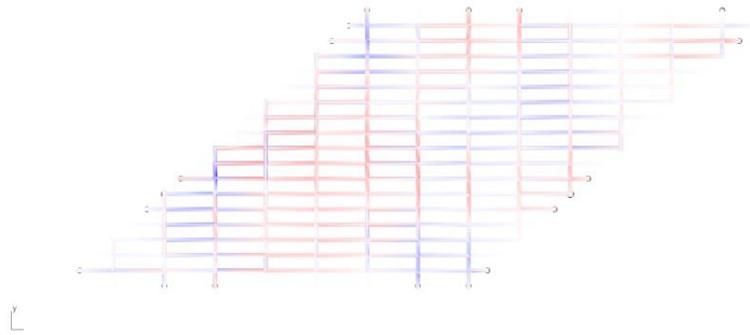


Figura 326: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 3. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

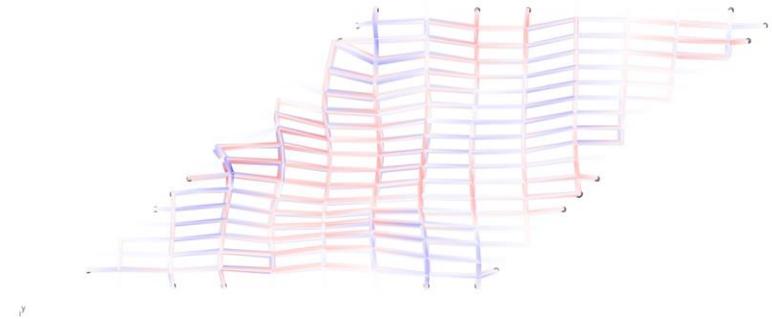
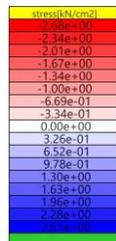


Figura 327: Esforços de tração e compressão na estrutura reticulada opção 3: simulação com deformação de 60%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).



A figura 326 apresenta o comportamento estrutural - da opção 3 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando os esforços de tração e compressão. A figura 327 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 60%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 326.

Além das análises referentes aos esforços de compressão e tração, o plug-in *Karamba 3D*, também, analisa o comportamento da estrutura em relação ao deslocamento. Para esta simulação é atribuída a cor magenta; a gradação cromática indica maior ou menor concentração: quanto mais escuro o tom de magenta, maiores são os valores atribuídos; e quanto mais claro o tom de magenta, menores são os valores. Da mesma forma, é gerada uma legenda com a gradação cromática e valores correspondentes; assim como, ao modelo são atribuídas as tonalidades de magenta, de acordo com as concentrações.

Seguiu-se a mesma metodologia de análise adotada anteriormente: para cada opção de estrutura, em função das dimensões das secções, foram realizadas duas simulações: a primeira considera os valores da estrutura [imagens posicionadas à esquerda da página] e a segunda, aplica uma porcentagem extra [15%, 30% e 60% respectivamente em cada uma das três opções] provocando uma deformação exagerada da estrutura [imagens posicionadas à direita da página].

Nas próximas páginas, serão apresentadas as seguintes imagens do modelo, para cada uma das simulações realizadas: vista superior, vista frontal e perspectiva.

desloc (cm)
0.00e+00
8.71e-01
1.74e+00
2.61e+00
3.49e+00
4.36e+00
5.23e+00
6.10e+00
6.97e+00
7.84e+00
8.71e+00
9.59e+00
1.05e+01
1.13e+01
1.22e+01
1.31e+01
1.39e+01

Figura 328: Modelo da legenda – para deslocamento - gerada pelo plug-in *Karamba 3D*. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

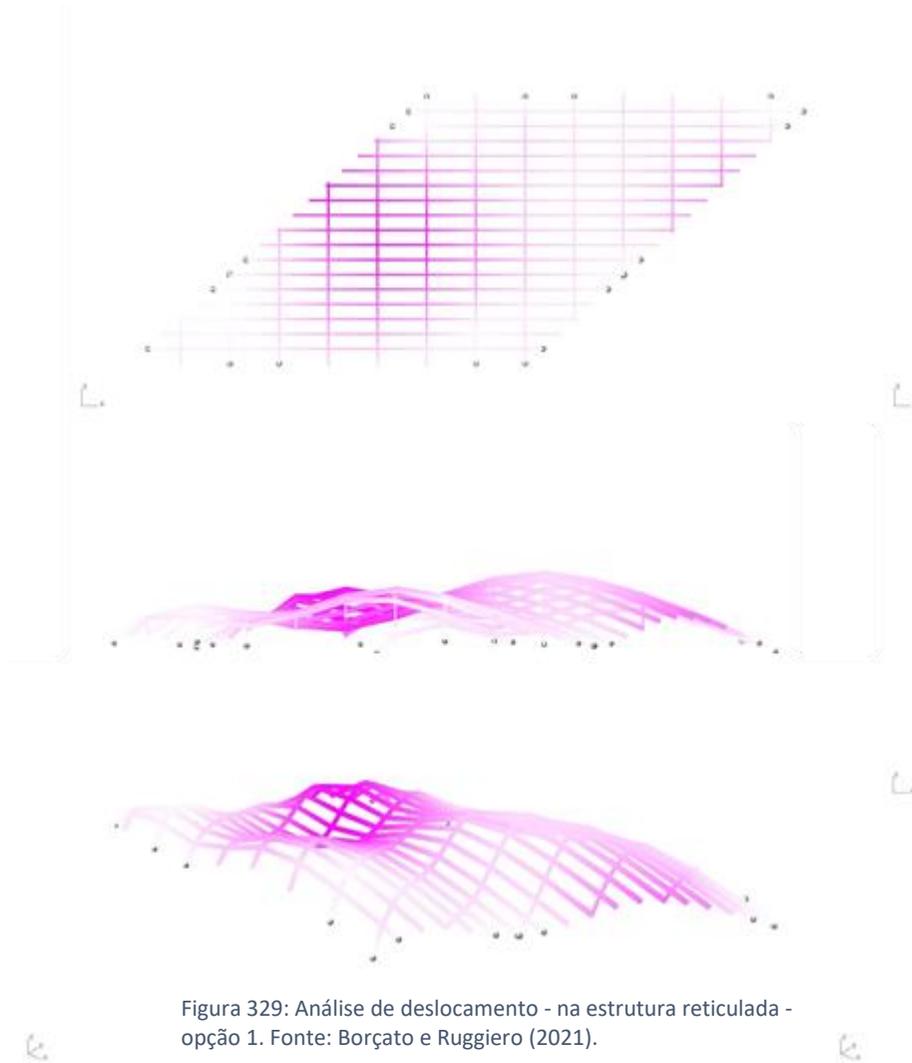


Figura 329: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 1. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

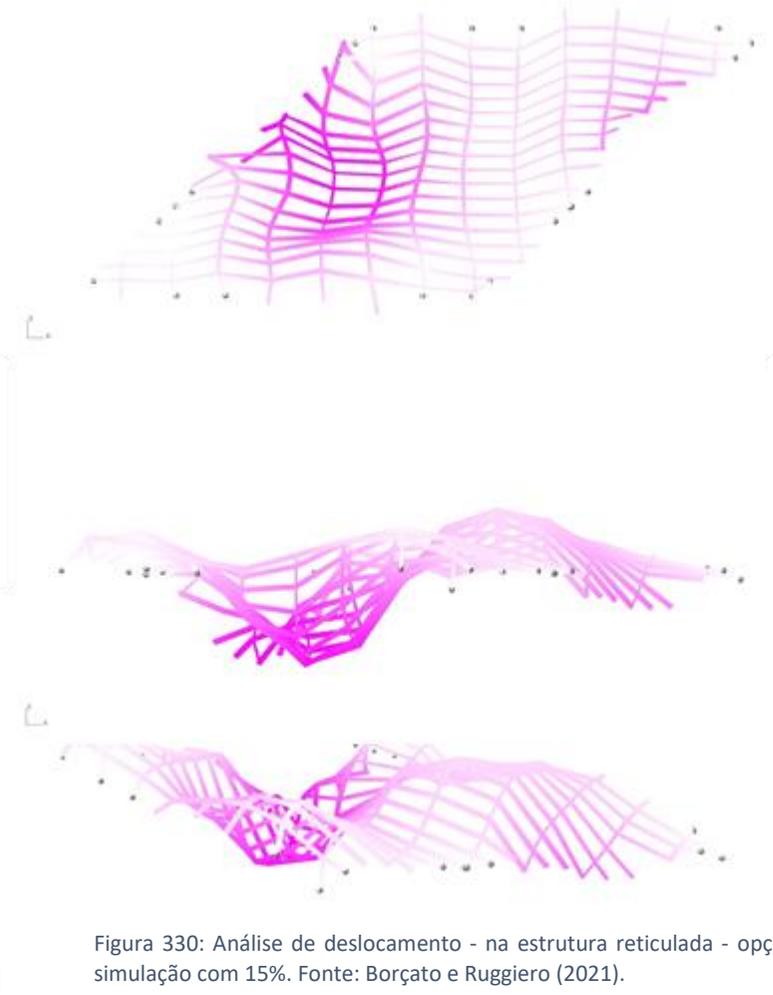


Figura 330: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 1: simulação com 15%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

res. disp. (cm)
0.00e+00
8.71e-01
1.74e+00
2.61e+00
3.49e+00
4.36e+00
5.23e+00
6.10e+00
6.97e+00
7.84e+00
8.71e+00
9.59e+00
1.05e+01
1.13e+01
1.22e+01
1.31e+01
1.39e+01

A figura 329 apresenta o comportamento estrutural - da opção 1 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando o deslocamento. A figura 330 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 15%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 329.

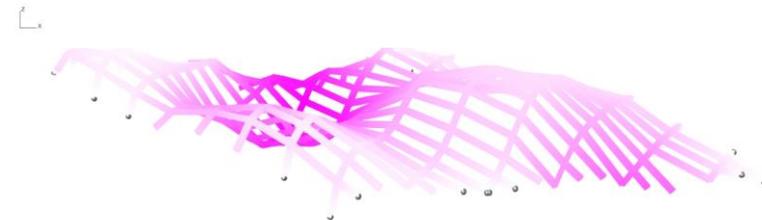
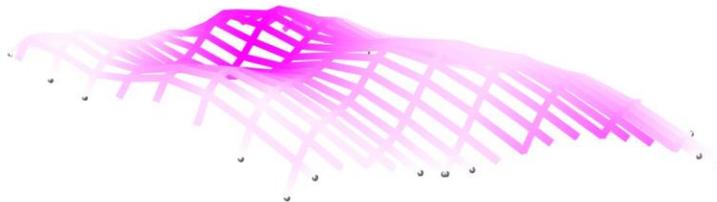
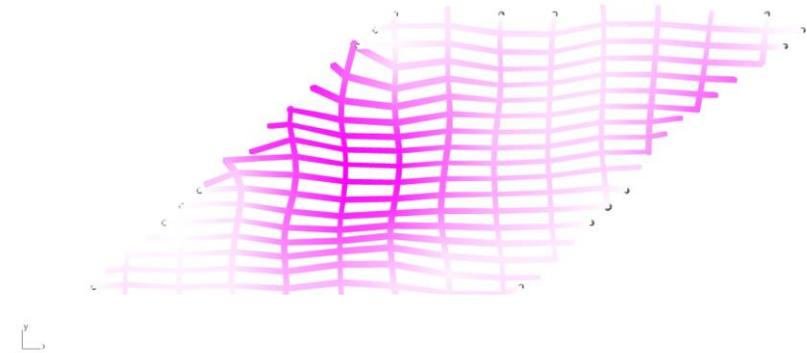
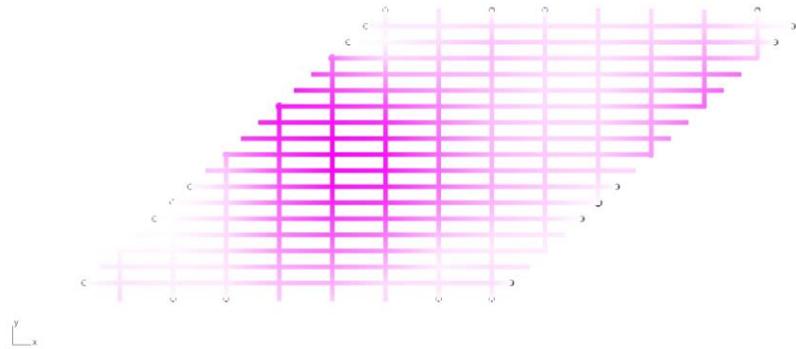


Figura 331: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 2. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

Figura 332: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 2: simulação com 30%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).



res. disp. (cm)
0.00e+00
2.35e-01
4.71e-01
7.06e-01
9.41e-01
1.18e+00
1.41e+00
1.65e+00
1.88e+00
2.12e+00
2.35e+00
2.59e+00
2.82e+00
3.05e+00
3.29e+00
3.53e+00
3.77e+00

A figura 331 apresenta o comportamento estrutural - da opção 2 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando o deslocamento. A figura 332 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 30%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 331.

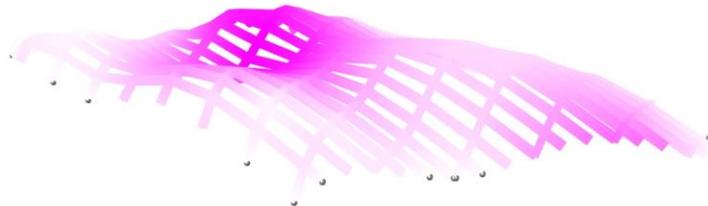
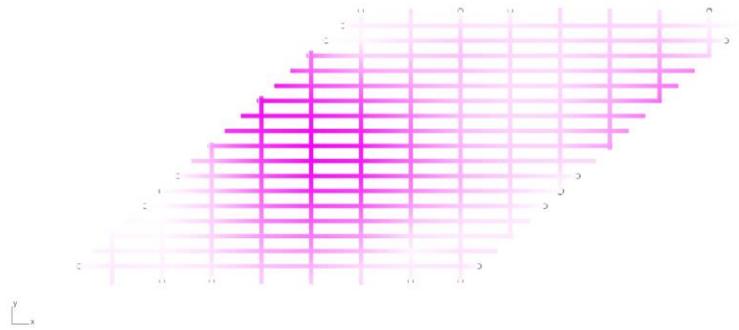


Figura 333: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 3. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

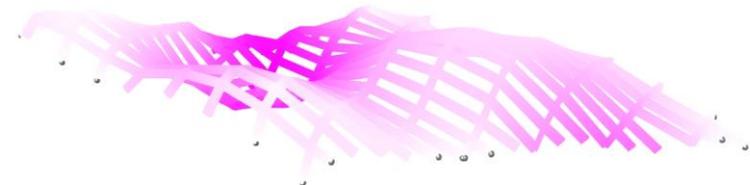
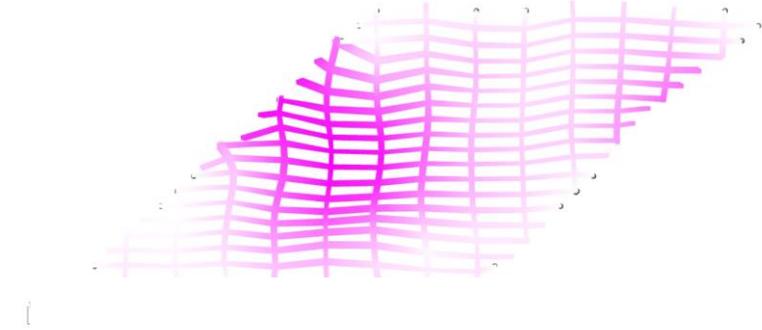


Figura 334: Análise de deslocamento - na estrutura reticulada - opção 3: simulação com 60%. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

1e+00e+00
0.00e+00
1.07e-01
2.15e-01
3.22e-01
4.30e-01
5.37e-01
6.44e-01
7.52e-01
8.59e-01
9.67e-01
1.07e+00
1.18e+00
1.29e+00
1.40e+00
1.50e+00
1.61e+00
1.72e+00

A figura 333 apresenta o comportamento estrutural - da opção 3 - da estrutura reticulada de bambu laminado, demonstrando o deslocamento. A figura 334 mostra o comportamento da estrutura, considerando-se uma deformação extra de 60%. Ao lado, a legenda gerada pelo *plug-in Karamba 3D*, com os valores atribuídos aos esforços, na análise referente à figura 333.

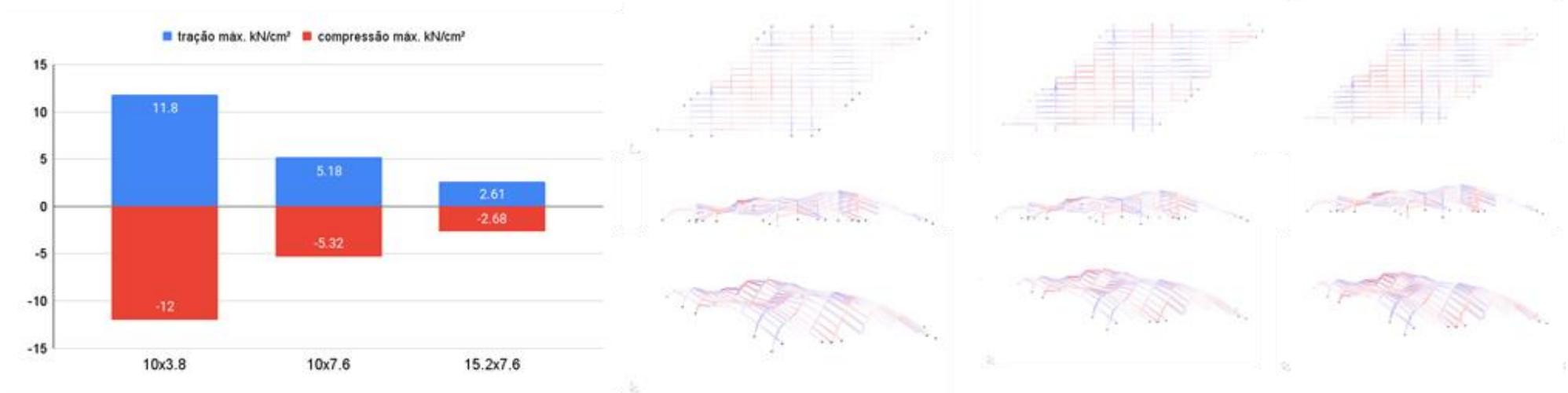


Figura 335: Gráfico comparativo – entre as três opções de estrutura reticulada – considerando-se a análise de tração e compressão. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

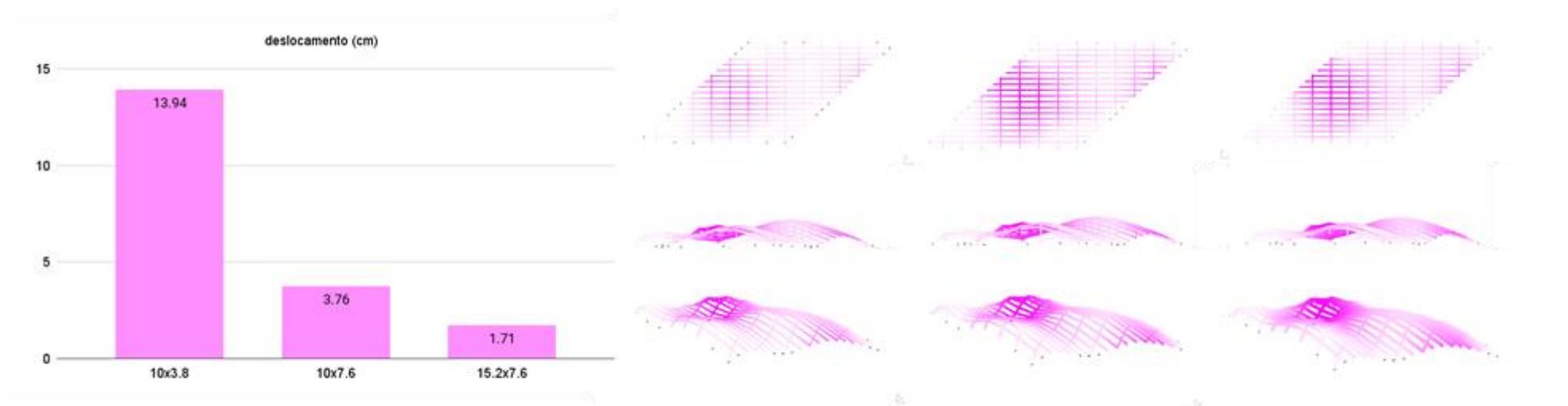


Figura 336: Gráfico comparativo – entre as três opções de estrutura reticulada – considerando-se a análise de deslocamento. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

As imagens apresentadas nas figuras 335 e 336 ilustram os comportamentos das três opções de estruturas reticuladas analisadas.

As simulações permitem visualizar como a estrutura deformaria. Indicam, também, quais são as regiões com maior concentração de esforços e, portanto, mais vulneráveis.

É importante observar que não necessariamente nas regiões onde há maior concentração de esforços – de tração ou compressão – serão os pontos de colapso da estrutura. As imagens apresentadas – com os resultados das análises de tração, compressão e deslocamento – permitem esta visualização.

Os gráficos comparativos apresentados foram gerados a partir dos valores obtidos pelas análises do *plug-in Karamba 3D*.



RESULTADOS OBTIDOS	SECÇÃO: 10 x 3.8 cm	SECÇÃO: 10 x 7.6 cm	SECÇÃO: 15.2 x 7.6 cm
Massa total_kg	445	892	1355
Deslocamento máximo_cm	13.94	3.76	1.71
Tração máxima (Ft)_kN/cm ²	1.17	0.15	0.13
Compressão máxima (Fc)_kN/cm ²	1.42	0.60	0.39
Cisalhamento (Fv) Z_kN/cm ²	0.65	0.23	0.12
Cisalhamento (Fv) Y_kN/cm ²	0.76	0.20	0.10
Flexão (Fb) T_kNm	0.75	0.80	0.69
Flexão (Fb) Y_kNm	4.42	3.00	3.42
Flexão (Fb) Z_kNm	1.89	2.89	2.29

Tabela 14: Resultados obtidos em relação ao comportamento da estrutura reticulada considerando as três opções de secções. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

A tabela 14 mostra os valores obtidos a partir da análise desenvolvida no *plug-in Karamba 3D*. Os resultados apresentados, em relação aos esforços na estrutura, são calculados tendo como parâmetro comparativo os dados referentes às propriedades mecânicas do material – bambu laminado. Nota-se que as três opções de configurações da estrutura reticulada – considerando-se as variações das secções - respondem adequadamente aos esforços. Em nenhum dos casos houve colapso da estrutura, mesmo com valores atribuídos à carga accidental. Entretanto, nestas simulações não foram consideradas forças de vento e tampouco foram utilizados fatores de majoração de forças ou minoração da capacidade dos materiais, como o k_{mod} . Para trabalhos futuros, seriam importantes aprofundamentos nas simulações, como a verificação de esforços de flexo-compressão e flexo-tração, que não foram contemplados nestas simulações, pois o propósito desta tese, é a verificação da eficiência de uma estrutura reticulada de bambu laminado.

Análise estrutural comparativa entre diferentes secções

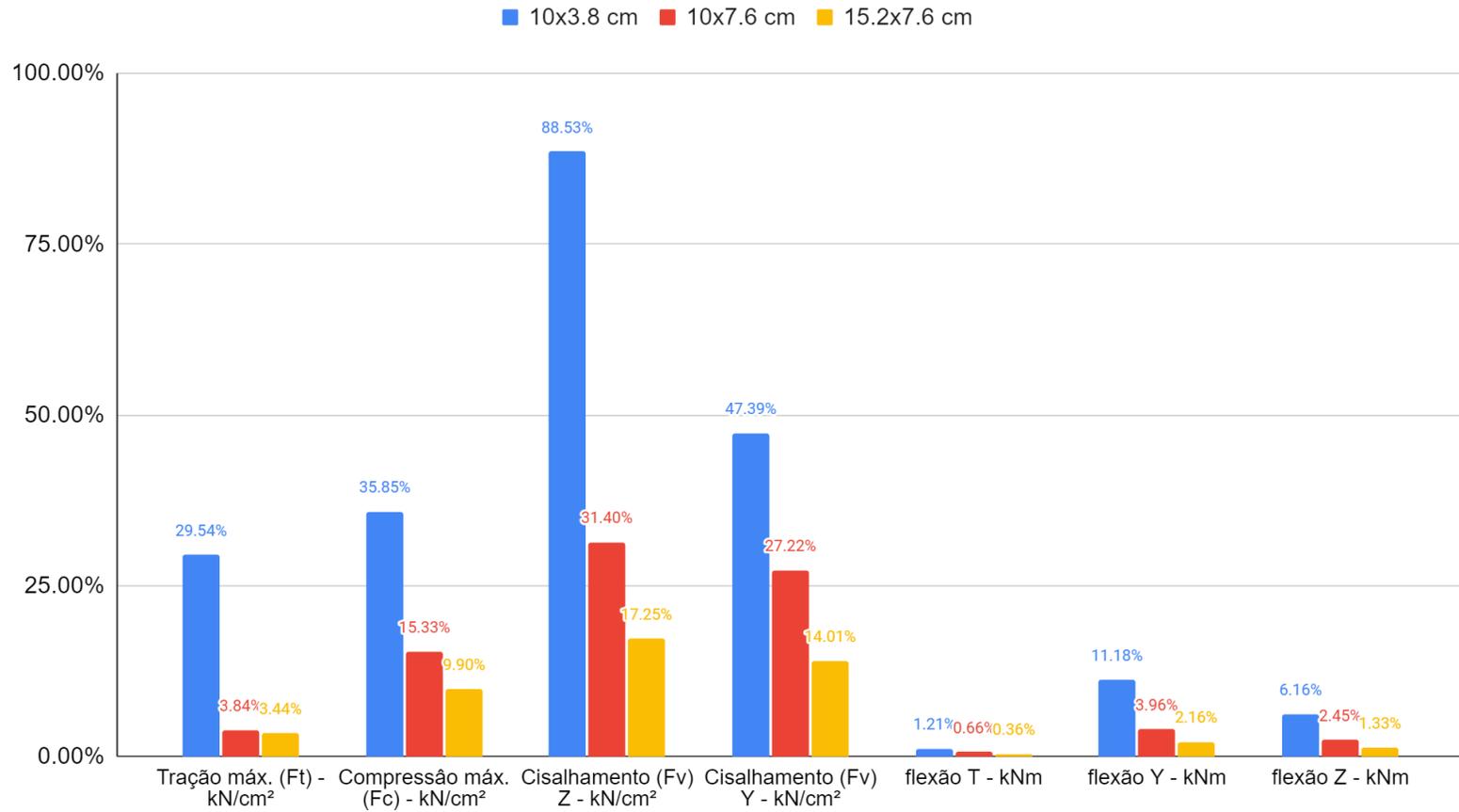


Figura 337: Gráfico comparativo – entre as três opções de estrutura reticulada – considerando-se a análise de tração, compressão, cisalhamento e flexão. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

A figura 337 traz o gráfico referente ao comportamento estrutural da estrutura reticulada de bambu laminado, comparando-se as três opções de secções analisadas nas simulações.

Os valores referem-se às análises resultantes considerando-se os dados atribuídos às propriedades mecânicas do bambu laminado [os quais foram extraídos da literatura], e à análise do comportamento da estrutura em si, levando-se em consideração a carga atribuída.

Pode-se verificar que o melhor desempenho se refere à flexão, sendo que a tração, também, apresenta valores bem próximos. Os demais resultados mostram-se satisfatórios, pois não houve colapso da estrutura.

Entretanto, na opção 1, o valor referente ao cisalhamento (88,53%) está bem próximo do limite da estrutura; provavelmente, se adotássemos uma margem de segurança, a leitura dos dados indicaria que o mais

aconselhável seria ajustar as dimensões das peças para secções maiores.

Os resultados obtidos nestas simulações, coincidem com os resultados encontrados em estudo semelhante, publicados pelo Omar Elnagar, cujos valores foram mencionados no capítulo 2. Não são numericamente equivalentes, visto que cada trabalho analisou uma configuração específica de estrutura reticulada; entretanto, os resultados referentes ao comportamento estrutural, são validados, uma vez que os melhores desempenhos, também, foram em relação à flexão e tração, respectivamente. Comprovando-se, desta forma, a característica do material. Portanto, confirma-se a viabilidade da utilização do bambu laminado, como elemento estrutural, para estruturas reticuladas.

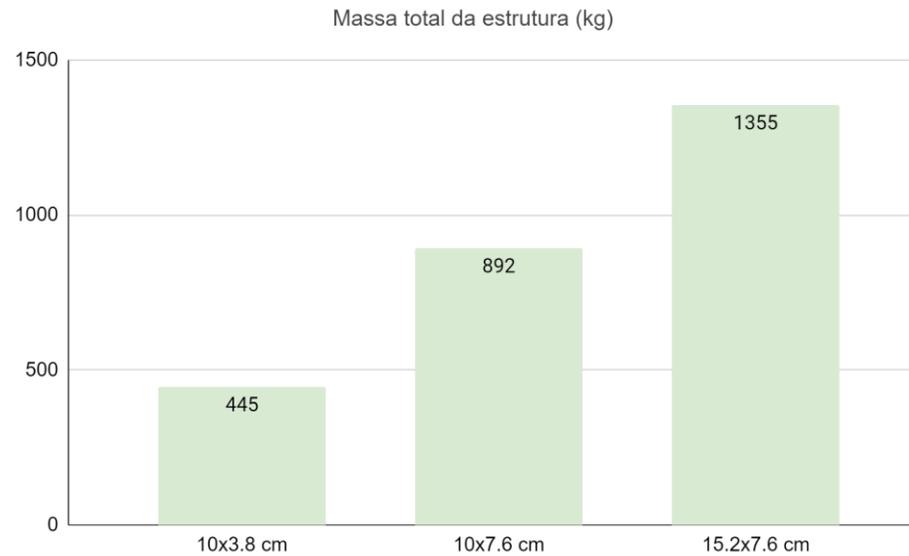


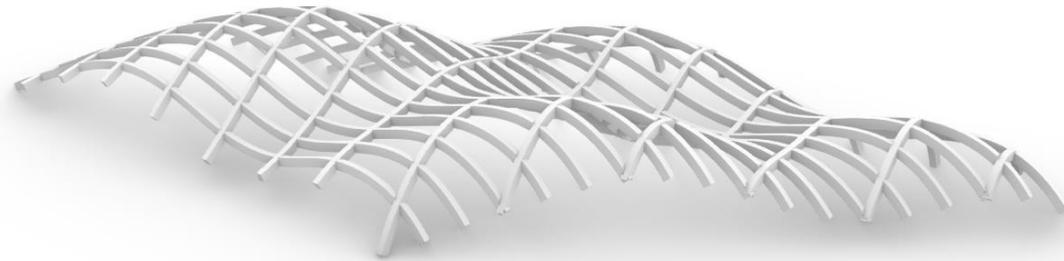
Figura 338: Gráfico comparativo – entre as três opções de estrutura reticulada – considerando-se a massa total. Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

O gráfico [figura 337] referente à análise do comportamento estrutural – das três opções de estrutura reticulada – pode indicar, num primeiro momento, que a opção 3 seria a mais eficiente e, portanto, a mais adequada para a execução. Entretanto, ao analisarmos o gráfico referente à massa total de cada estrutura [figura 338], observa-se que a quantidade de material empregado nesta opção é muito maior, em relação às demais.

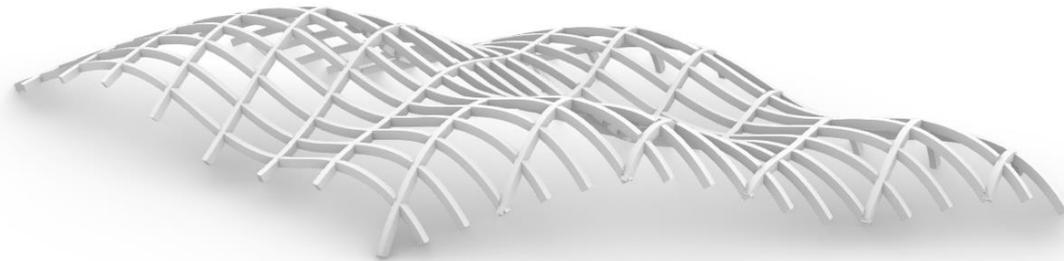
Os resultados demonstram a viabilidade técnica, do ponto de vista do comportamento estrutural, das três opções apresentadas. Há inúmeras vantagens de trabalhar-se com simulações digitais paramétricas, uma delas é a possibilidade de investigação de geometrias que explorem as características do material, trabalhando a favor do melhor aproveitamento de suas propriedades; outra, se dá em relação à possibilidade de trabalhar-se com peças únicas, tanto em relação ao desenho, quanto em relação às suas dimensões; possibilitando o ajuste das dimensões de peças específicas de forma a otimizar os esforços em determinadas regiões da estrutura.

Por exemplo, se elegêssemos a opção 1 como mais adequada à execução, levando em consideração que utiliza quantidade mínima de material, para atender às solicitações de

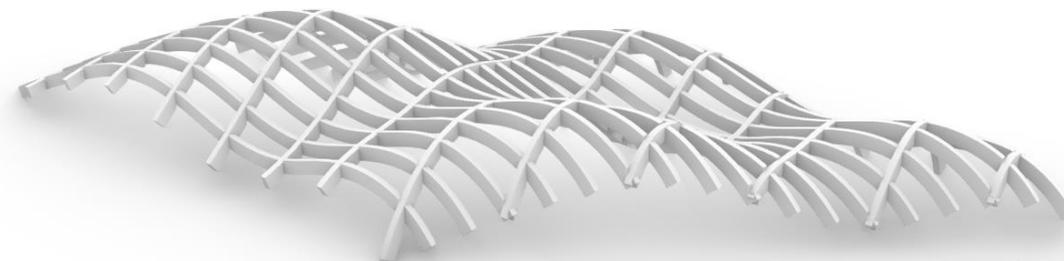
esforços, seria possível ajustar as dimensões de determinadas peças, através do uso de seções variáveis, tornando-as mais ou menos robustas de acordo com as regiões identificadas pela simulação de comportamento estrutural, realizada pelo *plug-in Karamba 3D*, como sendo as regiões mais vulneráveis a determinados esforços. Para esta aplicação, seria aconselhável a utilização de algoritmos evolutivos, tal como o *Galapagos*, que poderia analisar e trazer a solução de peças com seções transversais diferentes em resposta aos esforços que são submetidas. Como a definição desenvolvida possibilita a parametrização de vários atributos, referentes à geometria, seria possível realizar estas alterações nas peças específicas, inclusive, gerando todos os desenhos das peças planificadas, para fabricação digital.



OPÇÃO 1_
SECÇÃO: 10 x 3.8 cm



OPÇÃO 2_
SECÇÃO: 10 x 7.6 cm



OPÇÃO 3_
SECÇÃO: 15.2 x 7.6 cm

Figura 339: Perspectivas mostrando as 3 opções da estrutura reticulada de bambu laminado.
Fonte: Borçato e Ruggiero (2021).

7_ Conclusão

7_CONCLUSÃO



Figura 340: Relação entre os temas abordados na pesquisa. Fonte: Autora (2021).

À medida em que mais projetos forem executados, servirão de exemplo, para mudar o paradigma em relação ao bambu como material construtivo. Assim como, mais pesquisas e testes serão necessários para que suas características e potencialidades sejam comprovadas e disseminadas.

O caráter de urgência, para revermos os sistemas e processos construtivos, bem como os materiais utilizados na construção civil, requer que haja uma apropriação, por parte dos projetistas, das potencialidades destes materiais, para que consequentemente a produção em larga escala de produtos de bambu processado, para construção civil, seja implementada de modo a suprir a demanda destes materiais, possibilitando sua utilização de forma significativa nas novas construções. É, portanto, preciso pensar quais serão os possíveis desdobramentos futuros do emprego do bambu laminado na arquitetura. Alguns dos caminhos apontam para a utilização de painéis, como forma de vedação às edificações; bem como, a

utilização de vigas e pilares, de bambu densificado. Assim como, o emprego de placas de bambu laminado, explorando sua flexibilidade, adotando-as em configurações curvas, como mostraram as referências em mobiliários⁸⁹; técnica esta, que poderia ser transposta à arquitetura; uma vez que a flexibilidade do bambu é uma característica inegável e que deve, portanto, ser explorada. E, por que não, projetos com estruturas reticuladas, para distintas finalidades, inclusive moradias? Afinal, trata-se de um sistema construtivo cujo processo é limpo, utilizando-se pouco material, com facilidade de execução, dentre outros aspectos percorridos ao longo desta pesquisa.

O intuito deste trabalho, é lançar um novo olhar ao material – natural - tradicional, que pode também ser manufaturado, apropriando-se de suas características e fomentando seu emprego em proposições arquitetônicas que o utilizam na forma de elementos processados, amparadas

⁸⁹ no capítulo dois, página 41

pelas tecnologias e ferramentas digitais. Suscitar o diálogo entre o tradicional e o novo, buscando respostas e soluções às questões inerentes e arraigadas à arquitetura; e que, atualmente, se faz crucial a tentativa de mitigar os impactos ambientais, e tentar regenerar a salubridade do planeta, dos seres vivos, das pessoas, dos ambientes construídos.

Definiu-se a tipologia de estruturas reticuladas - como validação do emprego do bambu laminado - na arquitetura contemporânea, por meio das ferramentas e tecnologias digitais.

Como os materiais de bambu processado ainda são, de certa forma, novidade em se tratando da sua utilização na construção civil, viu-se a importância da necessidade de padronização das nomenclaturas destes produtos. Importante, também, salientar a necessidade das normas técnicas, como forma de garantir a segurança e, conseqüentemente, difundir

as possibilidades de utilização do bambu como material construtivo. Cabe destacar, que a norma brasileira, ainda não contempla a utilização do bambu processado na construção civil. O capítulo dois, demonstrou uma das possibilidades de processamento do bambu e produção do bambu laminado. O exemplo apresentado referiu-se à produção das placas de bambu laminado para execução de mobiliários; entretanto, o processo em si, é o mesmo para a produção de placas para utilização na construção civil. Apenas, há algumas etapas que podem ocorrer em sequências distintas, como o tratamento, conforme mencionado. Outro aspecto importante, já citado, mas que deve ser salientado, refere-se à utilização dos adesivos para colagem das camadas de bambu laminado. Como foi demonstrado o exemplo de produto especificado⁹⁰, garante quantidade mínima de formaldeído, de acordo com as normas europeias, inclusive de certificações ambientais; bem como atende às normas europeias referentes à segurança ao fogo.

⁹⁰ da referida empresa Moso

Mas, no Brasil, há trabalhos que demonstram a viabilidade de utilização de uma resina extraída da mamona e que, portanto, é atóxica. Cerchiari (2019) demonstra a aplicação em madeira laminada colada; mas, possivelmente poderia ser utilizada para a produção de bambu laminado. De fato, seria muito importante que mais trabalhos fossem desenvolvidos e respectivos resultados, divulgados a fim de que este tipo de adesivo pudesse ter utilização em larga escala, também, na produção de produtos de bambu processado. Desta forma, a característica de material natural, tornar-se-ia imaculada, devido à atoxidade do adesivo, corroborando com a proposta de material sustentável. Por fim, o referido capítulo apresenta as propriedades mecânicas do bambu laminado, e as normas técnicas atualizadas, validando sua utilização como elemento construtivo.

E, justamente, estruturas reticuladas é o elemento aglutinador, escolhido, para interligar os temas centrais da pesquisa. Então, o capítulo três apresentou exemplos de

construções significativas, que se valeram desta tipologia construtiva. Os exemplos escolhidos têm escalas, usos e linguagem distintos; e, todos apresentaram contribuições importantes, tanto em relação às soluções adotadas às ligações entre as peças de madeira, cujos desenhos podem ser transpostos para a utilização nas placas de bambu laminado; quanto à utilização das tecnologias e ferramentas digitais. Considerando-se as propriedades mecânicas [demonstradas no capítulo anterior], conclui-se que as estruturas reticuladas, apresentadas neste capítulo, poderiam ser executadas utilizando-se placas de bambu laminado, ao invés de madeira laminada colada.

Abordando o tema tecnologias e ferramentas digitais, o capítulo quatro percorreu sobre desenho paramétrico e fabricação digital, com enfoque na arquitetura. Traçando um panorama atual acerca do tema, propondo reflexões. Apresentou os laboratórios e grupos de pesquisas, especializados no assunto, com intuito de demonstrar a

aplicabilidade destas tecnologias e ferramentas, e a importância de suas atuações fomentando a investigação e promovendo a formação e disseminação do conhecimento adquirido, por meio das experiências realizadas. Este capítulo, também, demonstrou os tipos de técnicas de fabricação digital e apontou exemplos de aplicação à arquitetura.

Seguindo o mote da importância do processo investigativo para apropriação e emprego das novas tecnologias na arquitetura, o quinto capítulo representou a etapa de construção empírica, adotada como procedimento metodológico. Houve a apropriação das linguagens e características dos *softwares* utilizados para projetos paramétricos, bem como, para a fabricação digital, na execução dos modelos físicos. O caráter investigativo deste capítulo é demonstrado nos diferentes materiais e técnicas utilizados para confecção dos modelos físicos. Procurou-se explorar os diferentes processos, a fim de compreender e avaliar suas possibilidades de aplicação, bem como suas características e

especificidades. Com enfoque na transposição dos encaixes, utilizados convencionalmente em madeira, para uso nas placas de bambu laminado, foram realizados os experimentos apresentados ao longo do capítulo. Entretanto, algumas das investigações iniciadas, como as peças para ligações articuladas ou a proposta de malha reticulada [propondo a repetição de elementos idênticos para compor a estrutura] não evoluíram, no sentido de aprofundamento de suas soluções, devido à decisão de utilizar-se apenas um exemplo de estrutura reticulada, como processo de reflexão dos temas pesquisados.

É sobre este exemplo, que discorreu o sexto capítulo: o processo de construção representativa, de uma estrutura reticulada, demonstrando todas as etapas, desde a concepção da forma, parametrização do projeto, planificação das peças, fabricação digital dos modelos físicos – em escala reduzida – nas CNC laser e fresadora, culminando na execução dos protótipos em bambu laminado, utilizando-se o braço robótico, do DFL. Etapa importante foi a validação da eficiência da

estrutura reticulada de bambu laminado, por meio da análise de comportamento estrutural desenvolvida utilizando-se os *plug-in Grasshopper e Karamba 3D*. O algoritmo permitiu a simulação de três opções de estrutura, variando as secções das peças; desta forma, foi possível fazer uma análise comparativa de desempenho da estrutura.

Descortinam-se desdobramentos futuros, advindos da tese, visando aprofundar alguns aspectos suscitados no decorrer da pesquisa; dentre os quais, a fabricação digital de protótipos – na escala real – empregando bambu laminado. Seria importante que os experimentos fossem realizados utilizando bambu laminado – com características adequadas à construção civil. Inclusive, esta investigação poderá ser aprofundada estudando as possibilidades de encaixes tridimensionais entre as peças, explorando as características da fresadora CNC e do braço robótico, que possibilitam, com precisão, a execução de soluções mais complexas às ligações – longitudinais e perpendiculares - entre as peças.

Durante o processo de coleta de informações para inserção dos dados – referentes às propriedades mecânicas do bambu laminado - na definição paramétrica do *Karamba 3D*, observou-se que não há padronização dos tipos de dados e informações disponibilizados nos artigos científicos; bem como não há padronização acerca das simbologias e unidades de medidas adotadas. Algumas das publicações mais recentes já estão pautadas nas normas técnicas que contemplam especificamente os produtos de bambu processado. Entretanto, a maioria dos estudos ainda tem como base as normas para madeira; e, em menor número, adotam os parâmetros para madeira laminada colada.

Diante da dificuldade para encontrar os dados necessários, obtidos por meio de ensaios de laboratório, vislumbra-se como possível solução a implementação de um banco de dados, universal: uma plataforma *on-line* onde pesquisadores pudessem inserir os valores encontrados [de forma padronizada, em relação às unidades de medida e

simbologia] explicitando as normas utilizadas como referências aos ensaios e especificando claramente espécie de bambu, tipo de adesivo, tratamento empregado, método de processamento, dimensões das peças, dentre outras informações relevantes. Além de inserir os dados – de acordo com o *template* sugerido pela plataforma – o autor disponibilizaria o artigo científico com os embasamentos e justificativas detalhadas acerca das informações obtidas.

Desta forma, com os dados organizados, de maneira segura, mas com facilidade e rapidez de acesso, os pesquisadores poderiam valer-se destas informações para as modelagens digitais, simulações e análises paramétricas, afim de complementar os estudos e ensaios físicos realizados em laboratório. Justamente as diferenças de resultados, referentes às características mecânicas dos materiais de bambu processado, decorrentes das variações de espécies, tipos de adesivo e métodos de processamento, poderiam ser exploradas de forma consistente nas análises paramétricas. Os ensaios físicos seriam validados e complementados pelos modelos

digitais. Inclusive, colaborando na definição dos desenhos de encaixes mais adequados às peças, bem como no dimensionamento compatível dos elementos, além de melhor aproveitamento de material, minimizando perdas.

Tecnologias despontam e propiciam o surgimento de novos materiais, sistemas e métodos construtivos. Há uma ruptura dos paradigmas estabelecidos até então. A consolidação de novos processos e sistemas proporciona o surgimento de demandas inéditas e, conseqüentemente, tarefas e funções inovadoras. Neste panorama crescente de inovações, quais serão as novas profissões? Qual será o papel do arquiteto?

Inúmeras possibilidades de atuação profissional estão surgindo e, para tanto, há que se fazer uma análise do contexto atual e quais serão as premissas futuras a fim de delinear um caminho possível, de estudos e aperfeiçoamentos, que possam embasar os conhecimentos que serão necessários para a atuação do arquiteto, amparada e proporcionada pelas novas tecnologias.

A concepção de um projeto e suas etapas não são estanques; estão interligadas e inter-relacionadas a diversos aspectos, que vão desde a individualidade do projetista - e seus repertórios e referências - passando pelas ferramentas empregadas, e envolvendo os aspectos específicos relacionados ao projeto - abrangendo desde o sítio e suas características e condicionantes, ao anseio do cliente – culminando nas definições tectônicas⁹¹ e semânticas.

Este grande número de variáveis permeiam a concepção do projeto do início ao fim; estão sempre presentes, embora em alguns momentos algumas nuances estejam mais evidentes do que outras. Mas todas estão ali, intrínsecas e interligadas. E justamente pela multiplicidade de questões envolvidas, é que se justifica a transdisciplinaridade dos integrantes na concepção do projeto. Vivemos tempos complexos, que exigem respostas e soluções complexas, a complementaridade de especificidades é uma estratégia a ser adotada. Ainda há uma lacuna entre a concepção do projeto arquitetônico e sua concretização.

⁹¹ “A definição da palavra ‘tectônica’ no dicionário, como ‘pertinente à edificação ou à construção em geral; construtivo, construtor, usado especialmente para referir-se à arquitetura e às artes da mesma família’, é um tanto redutiva para nossos fins, porque estamos pensando não só no componente estrutural em si, mas também na sua amplificação formal relativamente ao conjunto de que faz parte. A palavra ‘tectônica’, desde que começou a ser usada em meados do século XIX, nos escritos de Karl Bötticher e Gottfried Semper, indica não só a probidade material e estrutural de uma obra, mas também uma poética do construir subjacente à prática da arquitetura e das artes afins.” (FAMPTON, 1995, p. 560).

Se por um lado, os avanços dos *softwares* possibilitam a criação de geometrias complexas, com muita facilidade e precisão; por outro lado, o passo seguinte – que é a construção efetivamente daquele projeto – ainda esbarra em dois aspectos técnicos: o primeiro é a qualificação de executores que estejam adaptados aos novos formatos de construção e aos novos materiais. E, novos materiais, justamente, é o segundo entrave. Ainda, na construção civil, a utilização de novos materiais – se compararmos, por exemplo, com as indústrias naval e aeronáutica – é incipiente; principalmente materiais compósitos derivados de fibras naturais. Há que se estreitar o diálogo e pesquisas envolvendo arquitetos e engenheiros, a fim de ampliar as possibilidades de aplicação de materiais compósitos, e demais materiais, à construção civil. É necessário que haja produção, em larga escala, de materiais sustentáveis; também, é preciso que existam opções de materiais que possam atender às demandas de projetos paramétricos, onde,

por exemplo, existam geometrias complexas, que requerem materiais que se adaptem à plasticidade pretendida.

Outro aspecto, trata da questão da customização dos materiais, tanto em relação aos atributos estéticos – como cor e textura, por exemplo – como também, à possibilidade de elementos que possam adaptar-se aos projetos; a viabilidade de trabalhar-se com peças distintas, sem que isso onere o valor do produto, é um grande diferencial que pode propiciar excelentes soluções – tanto tectônicas, quanto semânticas.

A fabricação digital descortinou um novo modo de conceber e executar os projetos. Possibilita uma liberdade, que até então não fora experimentada. Infinitas são as possibilidades de aplicação desta nova tecnologia. Inúmeras são as combinações possíveis entre materiais. Pensar que uma estrutura de bambu laminado, por exemplo, pode ser concebida com peças totalmente diferentes umas das outras – de forma rápida, controlada e eficaz – possibilita a

implementação de inúmeros projetos autênticos, sem que haja um grande impacto sobre o valor final da edificação, além de propiciar uma mudança de paradigma em relação à sua aplicação – como elemento construtivo – bem como, contribuir para a disseminação da utilização do bambu na arquitetura contemporânea.

Mas, há que se falar sobre as dificuldades de métodos e processos construtivos derivados da fabricação digital na construção civil. Nas indústrias naval, automobilística e aeronáutica os processos são comandados e controlados por computadores, mas seus produtos têm em comum a característica de serem ‘móveis’, serão transportados e utilizados em outros locais, diferentes dos quais lhes deram origem; ou seja, são produzidos em espaços adequados para instalação dos equipamentos e armazenamento dos produtos. Já no caso da construção civil, as edificações têm a característica de serem executadas *in loco*, sendo difícil o processo de prévia montagem e posterior transporte, para implantação de projetos de grandes dimensões.

E, por isso, o processo e sistema construtivo, de uma estrutura reticulada, pode ser um caminho para a utilização do bambu laminado e das tecnologias e ferramentas digitais, para concepção e execução do projeto. Uma vez que, também, há a possibilidade de montagem, desmontagem e remontagem deste tipo de estrutura, podendo validar seu uso para construções temporárias, ou mesmo de caráter emergencial.

A característica de ser uma estrutura, que vence grandes vãos, mas é executada a partir de peças de dimensões reduzidas, facilita o processo de transporte das peças ao sítio escolhido para montagem.

Para execução das peças de bambu laminado, na escala da construção civil, deverão ser utilizadas a fresadora CNC ou braço robótico, devido às dimensões das peças, bem como, espessura das placas.

Os modelos físicos realizados, nas máquinas CNC, com bambu laminado; bem como os ensaios digitais para análise de comportamento da estrutura, comprovam que a hipótese inicial

de utilização do bambu laminado, como elemento construtivo – de uma estrutura reticulada - fora validada.

A definição paramétrica desenvolvida *no plug-in Karamba 3D* demonstrou que as propriedades mecânicas do bambu laminado permitem sua aplicação como fora proposto. Os resultados demonstram a viabilidade técnica, do ponto de vista do comportamento estrutural, das três opções de secções apresentadas.

Os resultados apresentados, em relação aos esforços na estrutura, foram calculados tendo como parâmetro comparativo os dados referentes às propriedades mecânicas do material – bambu laminado. Nota-se que as três opções de configurações da estrutura reticulada – considerando-se as variações das secções - respondem adequadamente aos esforços. Em nenhum dos casos houve colapso da estrutura, mesmo com valores atribuídos à carga accidental. Entretanto, nestas simulações não foram consideradas forças de vento e tampouco foram utilizados fatores de majoração de forças ou minoração da capacidade dos materiais, como o k_{mod} . Para

trabalhos futuros, seriam importantes aprofundamentos nas simulações, como a verificação de esforços de flexo-compressão e flexo-tração, que não foram contemplados nestas simulações, pois o propósito desta tese, é a verificação da eficiência de uma estrutura reticulada de bambu laminado. Pode-se verificar que o melhor desempenho se refere à flexão, sendo que a tração, também, apresenta valores bem próximos. Os demais resultados mostram-se satisfatórios, pois não houve colapso da estrutura.

As simulações digitais paramétricas possibilitam que as características dos materiais sejam potencializadas pela definição da geometria; permitem, também, a utilização de peças com desenhos e dimensões únicas, inclusive em função da otimização do comportamento estrutural.

A presente pesquisa pautou-se em propor e disseminar a utilização do bambu laminado como elemento construtivo, estrutural; para tanto, valeu-se de um tipo de estrutura – malha reticulada – para articular o diálogo entre as tecnologias e

ferramentas digitais e o material escolhido. A proposição da estrutura reticulada tem o papel de elemento aglutinador entre os dois temas centrais do trabalho: material e técnica; por meio da exploração do processo e sistema construtivo da estrutura reticulada, procurou-se discutir e demonstrar as possibilidades de aplicação dos temas centrais. Conforme dito anteriormente, o enfoque se dá suscitando o diálogo entre tectônica e semântica, técnica e linguagem, interpolando o material – bambu – às tecnologias e ferramentas digitais e suas possíveis linguagens.

Ainda estamos em um momento de transição e de apropriação de tecnologias e materiais que despontam e se aperfeiçoam. Provavelmente, novos métodos construtivos serão desenvolvidos de acordo, e em função, de futuros materiais. Assim como, os processos de concepção e desenvolvimento de projetos arquitetônicos já vêm sofrendo transformações significativas nos últimos anos. Ainda não há parâmetros que possam provar ou definir como se darão os processos construtivos nos próximos anos. Muitos avanços têm

ocorrido em todos os campos e aspectos inerentes à arquitetura contemporânea. Mas, inevitavelmente estas novas respostas deverão atender à sustentabilidade. E neste aspecto, o bambu – como elemento construtivo – é uma solução inegável. Suas características atendem às especificações técnicas, rigorosas, já normatizadas. Seu caráter sustentável é uma qualidade que aponta como uma possível resposta aos problemas ambientais – tão graves – que estamos enfrentando. A derrubada de florestas nativas poderá ser evitada se a implementação do emprego do bambu for disseminada. Trata-se de uma escolha que poderá contribuir significativamente para reverter a crise climática e, conseqüentemente, restaurar a saúde do Planeta Terra e de seus habitantes.

As experimentações desenvolvidas, no decorrer do presente trabalho, não se propõem a encontrar um sistema de aplicação prática imediata, mas servem como inspiração para uma reflexão acerca do uso da fabricação digital na arquitetura contemporânea, bem como para incentivar a implementação

de materiais, que embora ainda não tenham seu emprego difundido, têm características que denotam grande potencial para sua aplicação como elementos construtivos, dentre eles, o bambu processado, que nesta tese fora estudado na forma de placas laminadas.

Uma das contribuições desta pesquisa é fomentar a reflexão sobre possíveis avanços e empregos futuros destes tipos de edificações – concebidas, produzidas e construídas – a partir da junção de elementos de dimensões e desenhos variados. O projeto do Serpentine Gallery 2005, apresentado no terceiro capítulo, retrata e valida esta vertente da arquitetura contemporânea. E, além deste enfoque mencionado, outra reflexão suscitada, se dá no âmbito das tecnologias de novos materiais, como o bambu processado, cujas características e propriedades demonstram seu potencial para uso na fabricação digital.

Um novo panorama da arquitetura se descortina, pautado na revolução 4.0 e amparado pelas ferramentas e tecnologias que dela derivam. As atuais pesquisas caminham para o aprimoramento no desenvolvimento de novos materiais, que se adequem aos equipamentos, que também estão em constante atualização. As premissas estão direcionadas à sustentabilidade dos materiais, diminuição de desperdício, facilidade na execução e manutenção, redução de custos, qualidade, resistência, durabilidade, beleza, dentre tantos outros aspectos. Ao mesmo tempo, os arquitetos estão se adaptando, experimentando diferentes modos de concepção dos projetos; e diferentes fluxos de trabalho. O diálogo entre as distintas fases de projeto está sendo revisto; a fabricação digital trouxe, novamente, à tona a experimentação. Os modelos em escala reduzida, os protótipos, são ferramentas projetuais importantes, e têm a oportunidade de confirmar sua relevância, dada a facilidade que agora podem ser confeccionados. O caráter investigativo, experimental do arquiteto - em busca possibilidades inovadoras - atualmente, tem despontado como

resposta às questões complexas da sociedade contemporânea, e, também, pela possibilidade de fazê-lo amparado pelas tecnologias digitais.

Vivemos tempos complexos. Mas o papel do arquiteto é projetar espaços para as pessoas. Lugares para viver. A arquitetura é cenário, moldura, palco para a vida cotidiana acontecer. E por que não preencher o cotidiano com beleza e poesia? Aplicar “o conceito heideggeriano de habitar como estar em paz num lugar protegido.”⁹²

Tendo, muito claro, que todas as escolhas têm consequências. Descaso, irresponsabilidade, atitudes levianas, ganância e egoísmo, dentre tantos outros, tiveram repercussões devastadoras sobre o meio ao qual vivemos; estamos inseridos numa trama que se articula e tem interferência entre os diferentes níveis e espectros aos quais torna-se dependente e

provedora, simultaneamente; em distintas instâncias há elos unindo todos os seres; é inegável que haja esta estreita conexão e correlação entre os entes vivos deste planeta e do universo. Atualmente, enfrentamos graves questões climáticas, ambientais, sociais, que propiciaram e culminaram neste trágico momento de pandemia da COVID-19. Ainda estamos longe do término deste desastre humanitário. E, há sinais de que outras pandemias virão. Muitas questões foram suscitadas no decorrer destes longos meses de enfrentamento; algumas respostas foram encontradas, demonstrando nossa capacidade de adaptação. Mas, se faz necessário que inúmeros aspectos de nossas condutas e rotinas cotidianas sejam revistos; ajustados; suprimidos; renovados. É fundamental que seja revisto o modo como lidamos com a natureza; respostas já foram encontradas, soluções que podem reverter os estragos causados até então. Mas, falta conscientização; educação; noção de comunidade; solidariedade. Conceitos que já se tornaram clichês; já estão

⁹² NESBITT, Kate. Nova agenda para a arquitetura: antologia teórica 1965-1995. São Paulo: Cosac Naify, 2006, p. 32

desgastados; passam despercebidos. Entretanto, se medidas assertivas não forem tomadas, na direção correta, haverá pontos irreversíveis. O modo como pensamos arquitetura, como pensamos e organizamos nossas cidades, nossas habitações, como nos deslocamos; foi colocado em xeque pelo inimigo invisível do coronavírus. Fomos obrigados a parar; a desacelerar; a reduzir. Alguns hábitos poderão ser substituídos; outros serão incorporados. Contudo, há que se refletir; ponderar os erros e acertos; direcionar as condutas e atitudes, visando o impacto no futuro.

Quais são as atitudes necessárias, imediatas, a fim de proteger e beneficiar as gerações futuras? É chegado o momento de não mais pensar nos benefícios e anseios individuais, posto que já se percebeu quão desastroso foi – e está sendo – este *modus operandi*. Se continuarmos nesta toada, o que restará? Um sopro de esperança acena com as novas gerações, mas há que ter terreno fértil para que elas se desenvolvam. Nosso papel é garantir, minimamente, que consigamos reverter os estragos e desastres causados até o

momento, a fim de que haja perspectivas e possibilidades de que novas formas de sociedades se desenvolvam. Atuar para que os recursos naturais sejam o mais preservados possível, é o mínimo que podemos deixar como legado para as futuras gerações. Repensar o modo como projetamos, como construímos; repensar nossas escolhas e proposições são o início para que, de fato, haja uma mudança no sentido de melhorar o todo.

Precisamos reconhecer que todo acontecimento e manifestação da natureza é “projeto”, que viver de acordo com as leis da natureza significa exprimir nossas intenções humanas como uma espécie interdependente, de modo consciente e agradecido ao fato de estarmos à mercê de forças sagradas maiores do que nós, e que obedecemos a essas leis a fim de honrar o sagrado que está em cada uma e em todas as coisas. Temos de fazer as pazes e aceitar nosso lugar no mundo natural. (MCDONOUGH, 1994)⁹³.



Figura 341: Ilustração: bambu.
Fonte: Marcello Nass Ruggiero (2015).

⁹³ Design, Ecology, Ethics, and the Making of Things. Willian McDonough, 1994.

— Anexos

ANEXO I_ EXERCÍCIO PROJETUAL

A disciplina⁹⁴ 'Estandarização Virtual: da linha de montagem à fábrica digital', ministrada pelos professores Paulo Eduardo Fonseca de Campos e André Leme Fleury, possibilitou a apropriação da utilização das ferramentas CNC e descortinou as inúmeras possibilidades de aplicação das ferramentas e tecnologias digitais.

Um dos trabalhos desenvolvidos nesta disciplina – juntamente com a aluna Juliana Croffi - foi a proposição de um projeto de apropriação do espaço urbano, através da implementação de *parklets*, desenvolvidos com fabricação digital, com possibilidade de execução em qualquer FABLAB da cidade de São Paulo.

⁹⁴ Oferecida no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

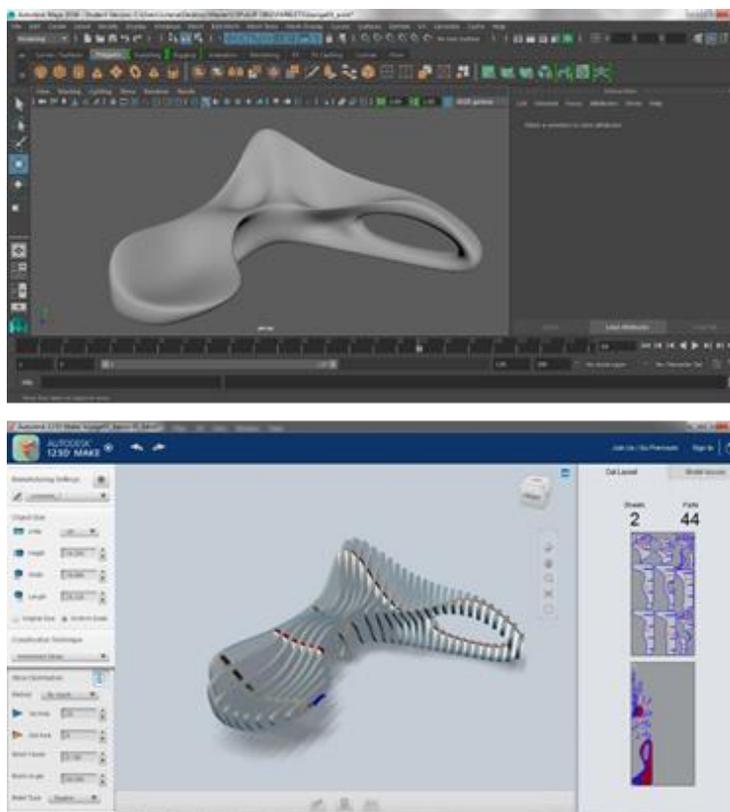


Figura 342: Modelagem 3D no software Maya. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

Por meio de uma plataforma digital, projetistas poderiam disponibilizar seus projetos, para que usuários escolhessem modelo de *parklet* a ser produzido no FABLAB. A premissa de projeto foi a criação de módulos – com dimensões de 2,20 x 2 metros – que pudessem ser acoplados, utilizando o espaço designado para uma ou duas vagas de carros. Cada módulo possibilita uma experiência de convivência distinta: *lounge*, *kids*, horta, estação de trabalho, *skate*...

O processo de desenvolvimento deste projeto e sua aplicação, na execução dos modelos, em escala reduzida, propiciou a apropriação da utilização das ferramentas CNC .

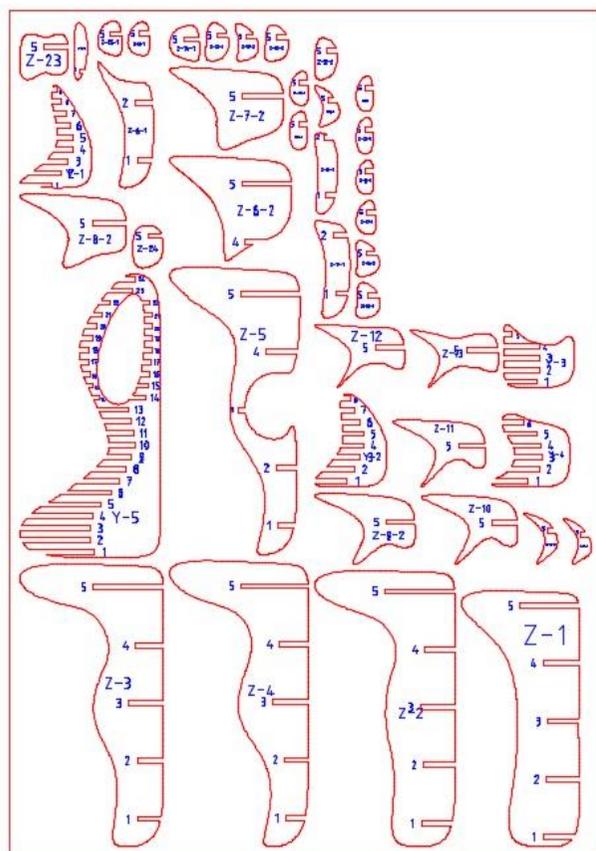


Figura 343: Peças planificadas para corte na CNC laser.
Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

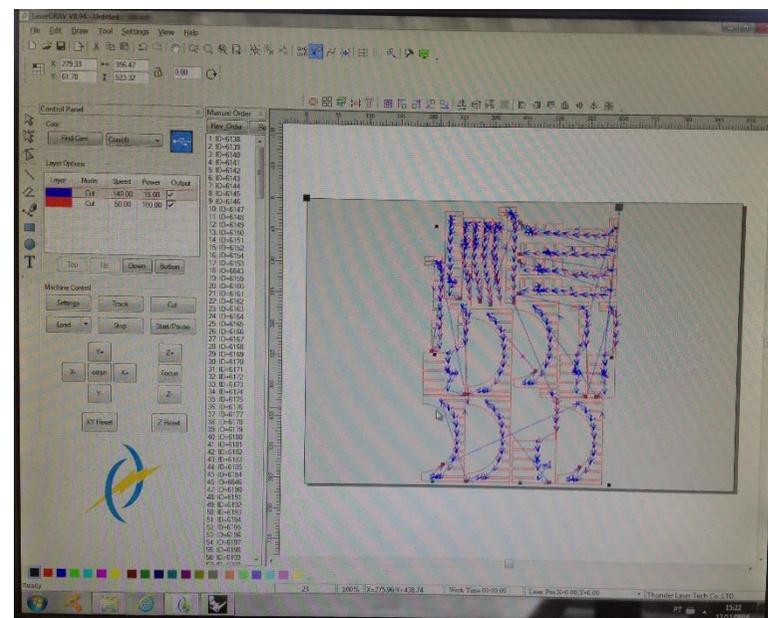


Figura 344: Visualização das peças planificadas para corte na CNC laser.
Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

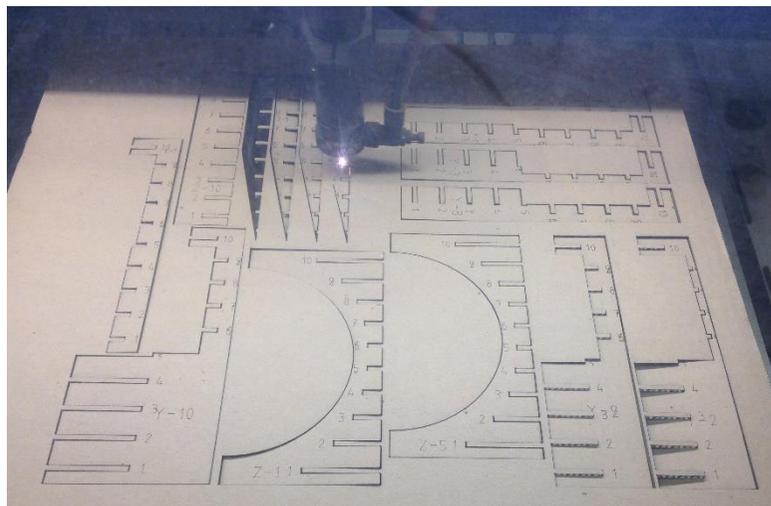


Figura 345: Processo de corte na CNC laser. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).



Figura 346: Montagem do modelo físico – em papelão - após corte na CNC laser. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).



Figura 347: Montagem do modelo físico – em MDF - após corte na CNC laser. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

A prototipagem também contribuiu para que questões técnicas, de desenho, que interferem diretamente na execução da peça, fossem diagnosticadas [como, por exemplo, o fato de haver sobreposição de linhas no desenho, faz com que o laser percorra duas vezes a mesma trajetória, ocasionando um desgaste maior do material, e prejudicando o encaixe perfeito entre duas peças].



Figura 348: Imagem renderizada apresentando uma composição com os 4 módulos distintos. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).



Figura 349: Protótipos – escala reduzida – em MDF. Peças cortadas na CNC *laser*. Composição com os 4 módulos distintos. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

Protótipos – escala reduzida – MDF: corte à laser.

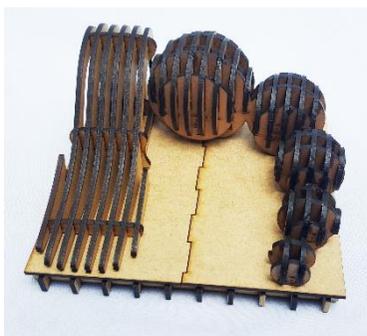


Figura 350: Módulo: *kids*. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

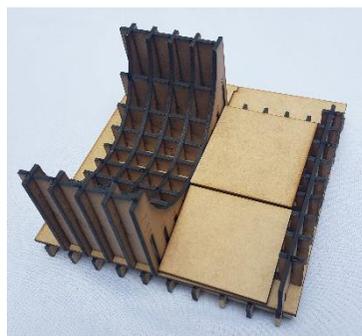


Figura 351: Módulo: *skate*. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).



Figura 352: Módulo: *lounge*. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).



Figura 353: Módulo: *cobertura*. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

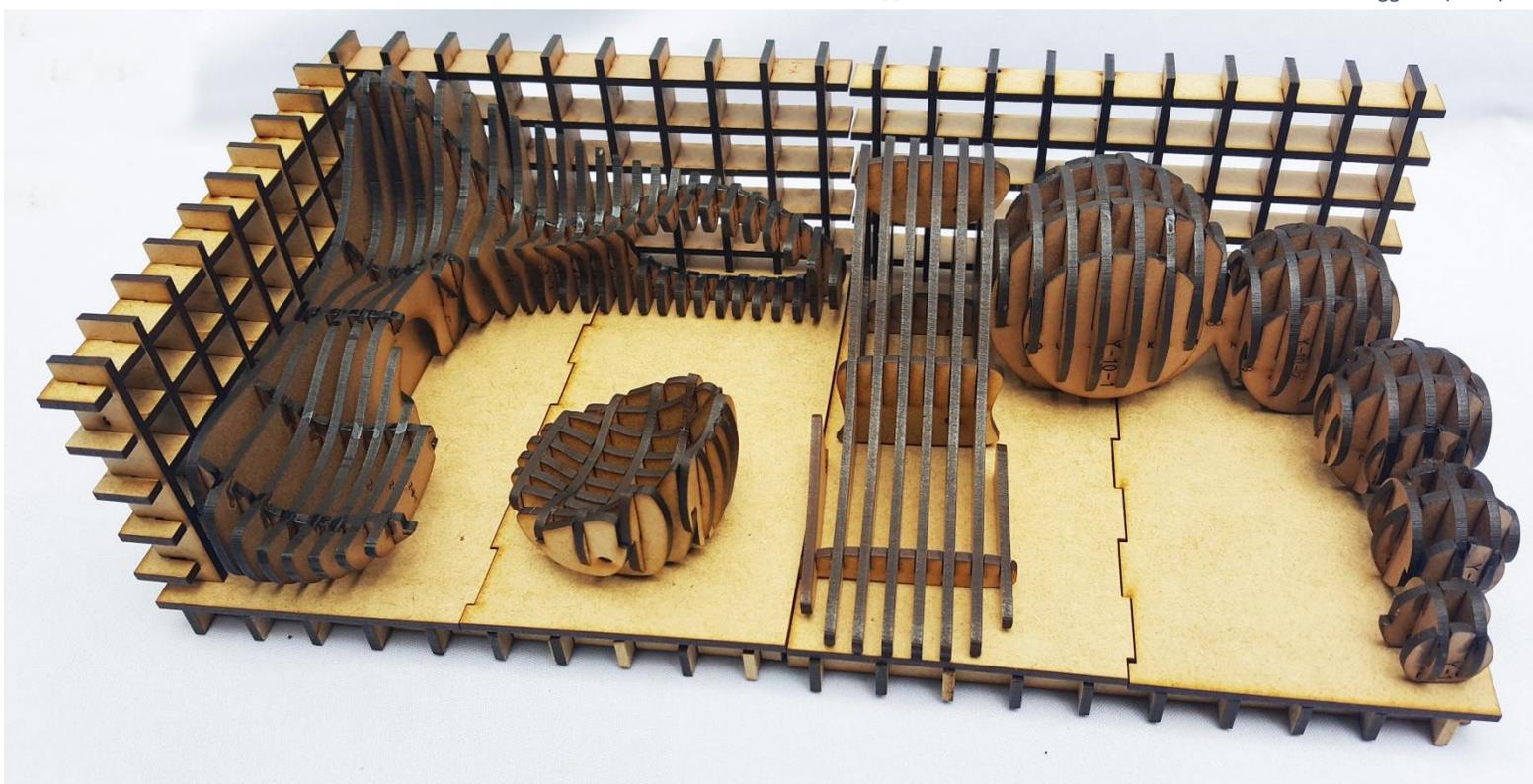


Figura 354: Protótipos – escala reduzida – em MDF. Peças cortadas na CNC *laser*. Composição com 2 módulos distintos. Fonte: Croffi e Ruggiero (2016).

ANEXO II_ EXPERIÊNCIAS DESENVOLVIDAS COM ALUNOS DE GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

A seguir serão apresentadas duas experiências projetuais realizadas, em 2018, com alunos de graduação em Arquitetura e Urbanismo. Cada uma das turmas pertence à uma Instituição de Ensino Superior Privada; ambos os cursos noturnos.

As proposições destes exercícios tiveram como objetivo aproximar os alunos das ferramentas e tecnologias digitais, instigando-os à apropriação das técnicas de fabricação digital, bem como à utilização da rede FABLAB, disponível na cidade de São Paulo. Para cada turma, fora proposto um exercício, cujas diretrizes são semelhantes, mas abordam temas distintos.

Aos alunos ensinou-se a utilização do *software* AutoCAD, para realização dos desenhos. Foram transmitidas as informações necessárias acerca da metodologia de desenho para execução de cortes na CNC *laser*. Fora proposto a utilização de papelão, como material de execução dos protótipos, em função de redução de custos.

Proposta 1:

Repetição de **único elemento** construtivo na **composição** de volumetria a partir de **encaixes**.

Etapa 1:

Concepção

Modelo escala reduzida

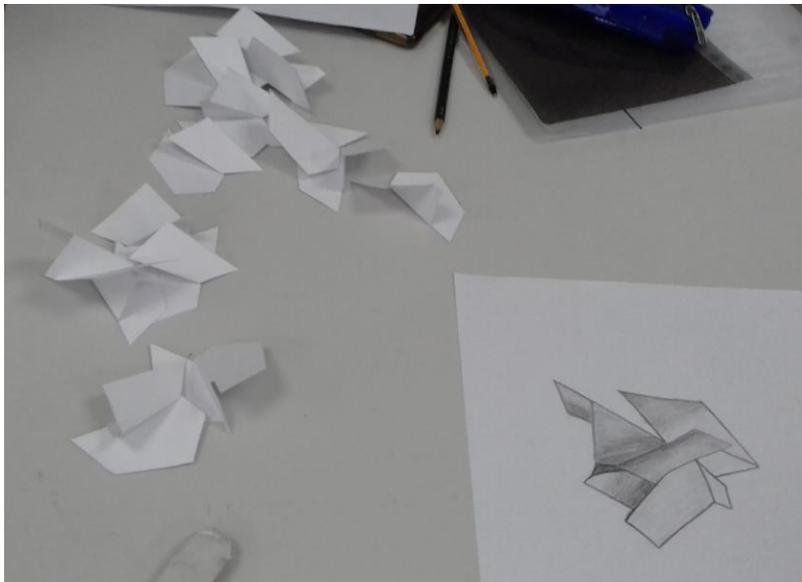


Figura 355: *Croquis* e modelos em escala reduzida – elaborados pelos alunos. Fonte: Autora (2018).

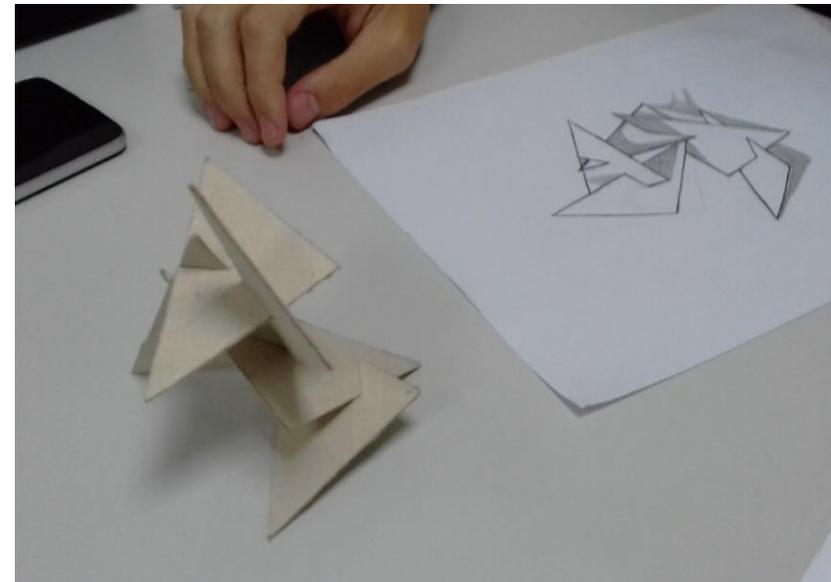


Figura 356: *Croquis* e modelos em escala reduzida – elaborados pelos alunos. Fonte: Autora (2018).

Etapa 2:
Desenho no AutoCAD



Figura 357: Aulas de AutoCAD para elaboração dos desenhos. Fonte: Autora (2018).

Etapa 3:
Corte na CNC *laser*

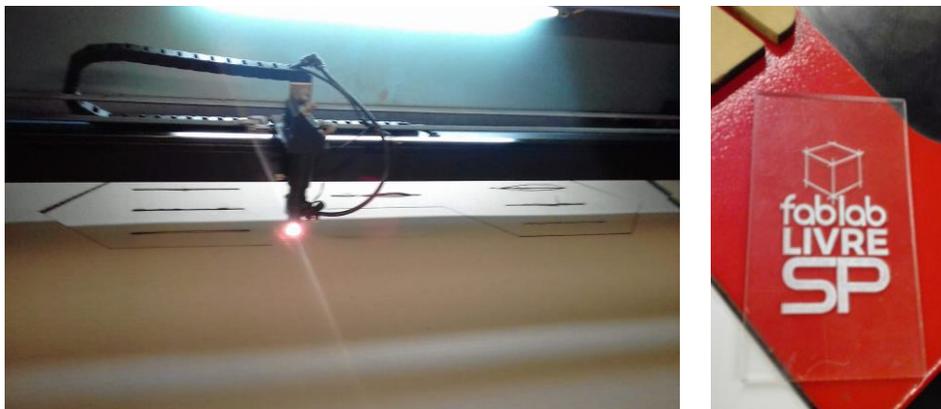


Figura 358: Corte das peças de papelão na CNC *laser* do FABLAB Centro Cultural São Paulo. Visita técnica com todos os alunos da turma para apresentar os equipamentos e técnicas disponíveis. Fonte: Autora (2018).

Etapa 4:
Montagem



Figura 359: Montagem das peças- de papelão – cortadas na CNC *laser*. Fonte: Autora (2018).

Etapa 5:
Peças finalizadas

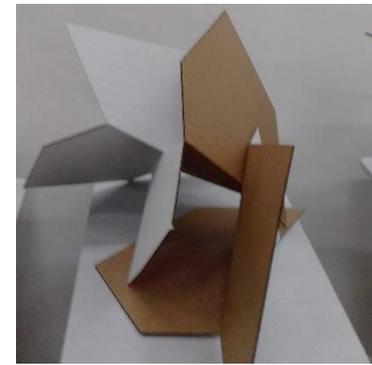
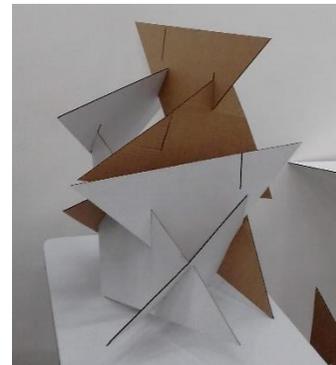


Figura 360: Exposição das esculturas - de papelão – cortadas na CNC *laser* e montadas de acordo com a concepção inicial de projeto. Fonte: Autora (2018).

Proposta 2:
Mobiliário executado
a partir de **encaixes**.

Etapa 1:
Concepção
Modelo escala reduzida

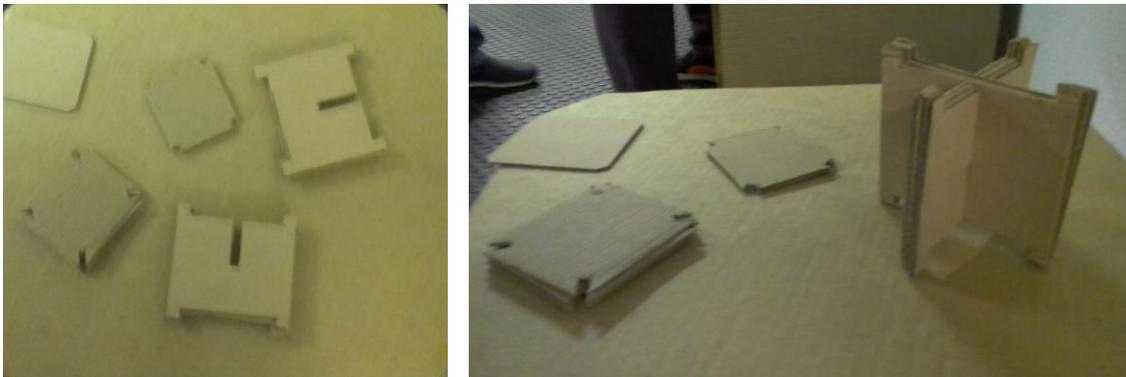


Figura 361: Modelos - em escala reduzida – para estudo da proposição de mobiliário. Fonte: Autora (2018).

Etapa 2:
Desenho no AutoCAD



Figura 362: Aulas de AutoCAD para elaboração dos desenhos. Fonte: Autora (2018).

Etapa 3:
Corte na CNC laser

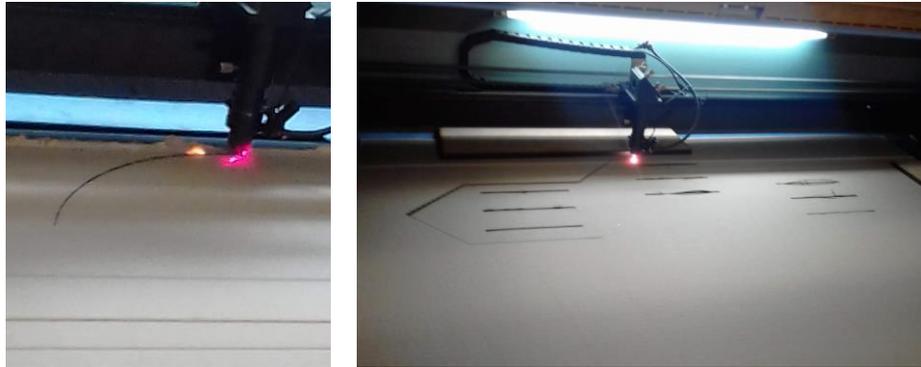


Figura 363: Corte das peças de papelão na CNC *laser*. Fonte: Autora (2018).

Etapa 4:
Montagem



Figura 364: Montagem das peças - de papelão – cortadas na CNC *laser*. Fonte: Autora (2018).

Etapa 4:
Montagem



Figura 365: Montagem das peças - de papelão – cortadas na CNC *laser*.
Fonte: Autora (2018).

Etapa 5:
Peças finalizadas



Figura 366: Exposição dos mobiliários - de papelão – cortados na CNC *laser*.
Fonte: Autora (2018).

As questões intrínsecas à elaboração de projeto foram abordadas, trazendo à reflexão a importância de implementação de modelos físicos como ferramentas do processo de projeto, desde a fase de concepção; enfatizando a relevância do desenho à mão livre, como gesto de expressão da intenção por trás da proposta de projeto.

O intuito foi suscitar a noção de integração do pensamento e suas diferentes formas de expressão, envolvendo as etapas de um projeto. Quais são os aspectos inerentes à cada etapa do processo. Quais são as formas de representação e apresentação do projeto. Quais são as ferramentas e tecnologias disponíveis para elaboração do projeto.

Instigar o diálogo entre desenho à mão, modelagem digital, fabricação digital e a experimentação prática. Ferramentas e processos que se complementam e que investigam diferentes aspectos relacionados ao projeto em si e à etapa em desenvolvimento, contribuindo para o aprimoramento das proposições e respectivos resultados.

Em outubro de 2019, ocorreu em Barcelona, Espanha, mais uma edição do simpósio anual organizado pela *International Association for Shell and Spacial Structures* [IASS]. Contemplando mais de 600 apresentações técnicas, distribuídas em 100 sessões paralelas. A estrutura do evento é subdividida por grupos temáticos, dentre os quais o WG 21 foi responsável pela organização da exibição e competição de inovação de estruturas leves, constituída por 30 participantes.

Os grupos temáticos abordam os seguintes assuntos:

- *Structural systems [shell structures, tension and membrane structures, inflatable structures, tensegrity systems, origami and folded systems, elastic gridshells and bending-active systems, deployable and adaptive systems];*
- *Material-based structures [metal special structures, timber and bio-based structures, glass structures];*
- *Design projects and realizations;*

- *Computation, form-finding and optimization;*
- *Historical structures and memorial sessions;*
- *Environmental compatibility and lifecycle of structures;*
- *Teaching of special structures;*
- *Advanced manufacturing and non-conventional materials.*

Vale ressaltar que dentre as palestras proferidas, algumas abordaram a utilização do bambu como elemento construtivo estrutural; inclusive, valendo-se de ferramentas digitais para concepção e análise dos projetos. Entretanto, não houve nenhum trabalho demonstrando a utilização de produtos de bambu processado. Mas, há indícios de que, possivelmente, serão contemplados nas próximas edições, uma vez que há pesquisadores trabalhando com o tema.

Nesta edição, destacamos alguns dos projetos apresentados na exposição da competição mencionada. Pode-se notar a importância dos modelos físicos – em escala reduzida – para aprimoramento da aplicação de materiais e técnicas, nos projetos. Muitas das propostas valeram-se da fabricação digital para execução dos protótipos.



Figura 367: Alguns dos projetos participantes da exposição referente à competição anual do IASS-2019. Fonte: Autora (2019).



Figura 368: Projeto executado com técnicas de fabricação digital, participante da competição anual do IASS-2019. Fonte: Autora (2019).

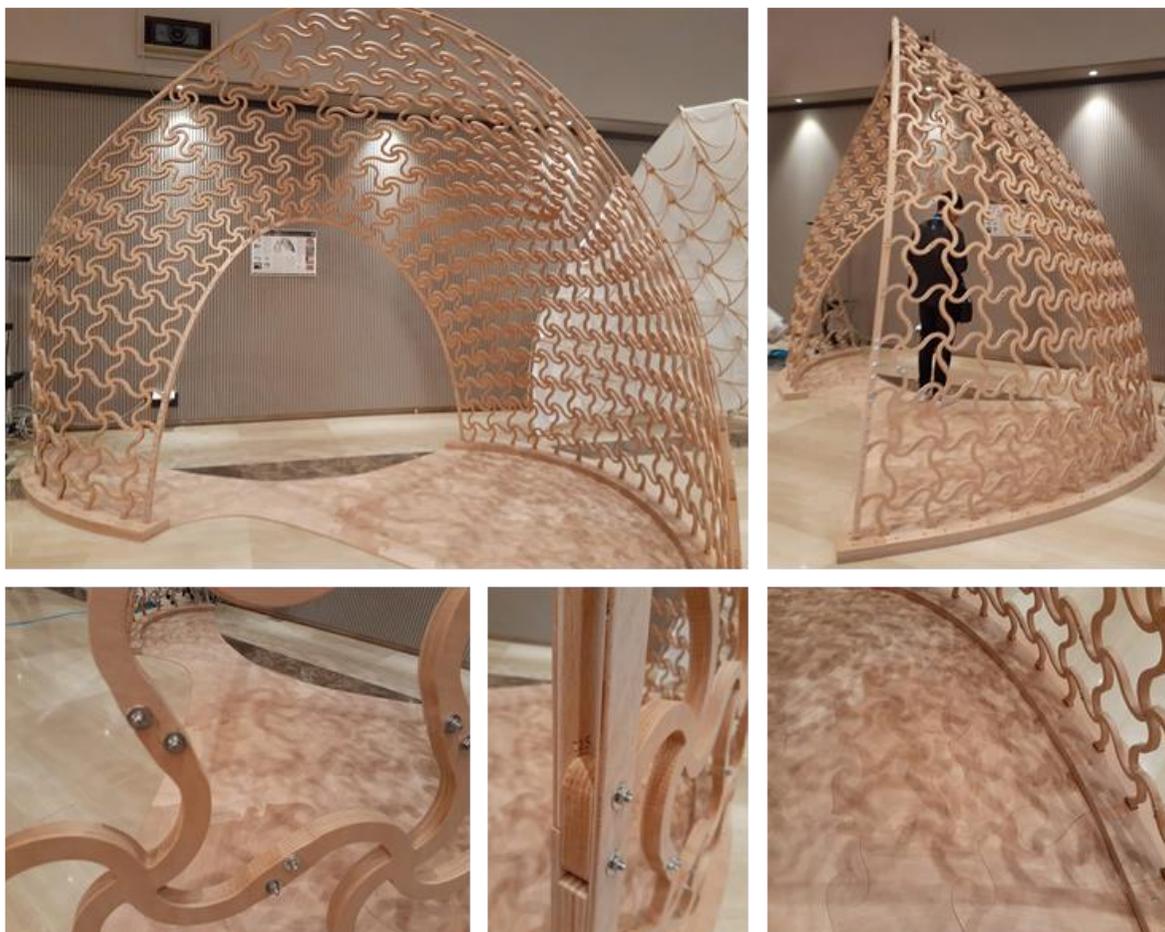


Figura 369: Projeto executado com técnicas de fabricação digital, participante da competição anual do IASS-2019. Fonte: Autora (2019).

— Referências Bibliográficas

_REFERÊNCIAS

ADRIAENSSENS S.; A., PAULY M. GRAMAZIO F., KOHLER M., MENGES. **Advances in Architectural Geometry**. Herausgeber: CH, 2016.

ADRIAENSSENS, Sigrid; BLOCK, Philippe; VEENENDAAL, Diederik; WILLIAMS, Chris. [org.] **Shell Structures for Architecture - Form Finding and Optimization**. Routledge: New York, 2014. [SCHUMACHER, Patrik - p. 271-273]

AFACONSULT. **Pavilhão da Serpentine Gallery 2005**. Disponível em <http://www.afaconsult.com/portfolio/24211/92/pavilhao-da-serpentine-gallery-2005>>. Acesso: 17.ago.2019.

ALMEIDA, Daniel Lima. **Tradição e Inovação: as tecnologias digitais no processo de projeto do pavilhão Serpentine Gallery 2005**. Dissertação (Mestrado em Arquitectura) – Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, 2015.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Manual for Engineered Wood Construction**. 2018 Edition. Leesburg: 2018.

AMBHIBIA GROUP. **Site Oficial**. Disponível em: <https://www.amphibiagroup.com/>>. Acesso em: 27.jul.2020.

APUAMA. **Site Oficial**. Disponível em: <http://apuama.org/>>. Acesso em: 27.jul.2020.

ARCE-VILLALOBOS, Oscar A. **Fundamentals of the design of bamboo structures**. 1993. 261 f. Thesis (Doctor of Technical Sciences) – Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1993.

ARCHDAILY. **Metropol Parasol / Jürgen Mayer H. Architects**. Disponível em <https://www.archdaily.com.br/br/01-27417/metropol-parasol-jurgen-mayer-h-architects>>. Acesso: 25.nov.2019.

ARCHDAILY_1. **O que acontece com os pavilhões da serpentine gallery quando são desmontados**. Disponível em <https://www.archdaily.com.br/br/904239/o-que-acontece-com-os-pavilhoes-da-serpentine-gallery-quando-sao-desmontados> >. Acesso: 20.jul.2019.

ARCHDAILY_1a. **Metropol Parasol**. Disponível em <https://www.archdaily.com/201961/metropol-parasol-j-mayer-h-arup>>. Acesso: 20.jul.2019.

ARCHDAILY_1b. **Jürgen Mayer H. Architects**. Disponível em <https://www.archdaily.com/122621/j-mayer-h-architects-metropol-parasol-opening-this-sunday> >. Acesso: 10.jul.2019.

ARCHDAILY_2. **O Serpentine Pavilion ao Longo dos Anos.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/790840/arquivo-serpentine-pavilion-ao-longo-dos-anos>>. Acesso: 17.nov.2019.

ARCHDAILY_3. **Campus Swatch and Omega – Shigeru Ban Architects.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/928480/campus-swatch-and-omega-shigeru-ban-architects>>. Acesso: 10.dez.2019.

ARCHDAILY_4. **Felix Candela.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/tag/felix-candela>>. Acesso: 15.mai.21

ARCHDAILY_5. **Clássicos da Arquitetura: Pavilhão Alemão Expo 67.** Disponível em: <http://www.archdaily.com.br/br/794650/classicos-da-arquitetura-pavilhao-alemao-da-expo-67-frei-otto-e-rolf-gutbrod>. >. Acesso: 15.mai.21

ARCHDAILY_6. **ETH-Zurich desenvolve novo método de impressão 3D para colunas de concreto.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/921744/eth-zurich-desenvolve-novo-metodo-de-impressao-3d-para-colunas-de-concreto>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_7. **Pylos a impressora 3D que imprime com terra.** Disponível em:

<<https://www.archdaily.com.br/br/776401/pylos-a-impressora-3d-que-imprime-com-terra>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_8. **An overview of digital fabrication in architecture.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com/940530/an-overview-of-digital-fabrication-in-architecture>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_9. **Best articles about wood.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com/930967/archdailys-best-articles-about-wood>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_10. **MX3D Bridge - Joris Laarman Lab and Arup.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com/965339/mx3d-bridge-joris-laarman-lab-plus-mx3d-plus-arup>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_11. **Beyond the geometry the world's largest modified plastic 3D printing.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com/960939/beyond-the-geometry-the-worlds-largest-modified-plastic-3d-printing-architecture-archi-union-architects>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHDAILY_12. **Quão eficiente é o bambu para aplicações estruturais.** Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/934550/quao-eficiente-e-o-bambu-para-aplicacoes-estruturais>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ARCHITIZER. **Serpentine Gallery Pavilion 2005**. Disponível em <<https://architizer.com/projects/serpentine-gallery-pavilion-by-alvaro-siza-and-eduardo-souto-de-moura/>>. Acesso: 17.abr.2020.

ARCHITONIC. **SWATCH HEADQUARTERS, SWATCH AND OMEGA CAMPUS Biel, Switzerland, 2019**. Disponível em <<https://www.architonic.com/en/project/shigeru-ban-architects-swatch-headquarters-swatch-and-omega-campus/20126395>>. Acesso: 17.set.2020.

ARUP. **Site Oficial**. Disponível em <<https://www.arup.com/projects/metropol-parasol>>. Acesso: 20.jul.2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16828-1. Estruturas de bambu Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro: 2020. 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16828-2. Estruturas de bambu Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu**. Rio de Janeiro: 2020. 17p.

ASTM INTERNATIONAL. Designation: **D5456-21. Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products**. Pennsylvania, United States: 2021.

ASTM INTERNATIONAL. Designation: **D5457-21a. Standard Specification for Computing Reference Resistance of Wood-Based Materials and Structural Connections for Load and Resistance Factor Design**. Pennsylvania, United States: 2021.

AWAID, M., KHALIL, H.P.S.A., NADIRAH, W.O.W., SUHAILY, S.S. (2013). **Bamboo Based Biocomposites Material, Design and Applications**. Materials Science - Advanced Topics, capítulo 19, p. 389-417.

BAN, Shigeru. **Site oficial**. Disponível em: <http://www.shigerubanarchitects.com/works/2019_SO51/index.html>. Acesso: 17.dez.2019.

BARELLI, B. G. P.; PEREIRA, M. A. R.; LANDIM, P. C. **A Tecnologia na confecção de protótipos em bambu laminado colado desenvolvido na Unesp-Bauru**. Design, arte e tecnologia. São Paulo: Rosari, Universidade Anhembi Morumbi, PUC-Rio e Unesp-Bauru, 2008.

BECHTHOLD, Martin. **Innovative Surface Structures Technologies and Applications**. Taylor & Francis: New York, 2008.

BEER, Ferdinand P.; JR. JOHNSTON, E. Russel. **Resistência dos Materiais**. Makron Books. 3ª edição.

BELAS ARTES. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.belasartes.br>>. Acesso em: 27.jul.2021.

BERALDO, A. L.; RIVERO, L. A. **Bambu Laminado Colado (BLC)**. Floresta e Ambiente, v. 10, 2003.

BERNDSSEN, R. S. **Caracterização Anatômica, Física e Mecânica de Lâminas de Bambu (*Phyllostachys pubescens*)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Campus Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BONNEMAISON, S.; BEESLEY, P. (Org.), **On Growth and Form: organic architecture and beyond**. Halifax: Tuns Press. Canada. 2008. ISBN 978-0-929112-5-1.

BONSIEPE, Gui. **Design, do material ao digital**. Florianópolis: FIESC/ IEL, 1997.

BOLCHOVER, Joshua – **Vitamin Green**. New York: Phaidon Press, 2012.

BOOTH, Pete. **Complex Geometries, Different Technologies. Digital Technologies in Architecture: Principles and Applications** – IAAC, Catalonia, 2017.

BORÇATO, Henrique Lattes. **Fabricação Digital**. Pós-Graduação em Arquitetura e Projeto na Era Digital. São Paulo: Unyleya, 2020.

_____. **Algoritmos Genéticos**. Pós-Graduação em Arquitetura e Projeto na Era Digital. São Paulo: Unyleya, 2020.

_____. **Modelos Físicos e Modelos Digitais**. Pós-Graduação em Arquitetura e Projeto na Era Digital. São Paulo: Unyleya, 2020.

BRAYER, M.-A.; VERNANT A. et al. **Architectures Experimentales 1950-2012: collection du FRAC**. Orléans:FRAC Centre, FR, 2013. ISBN-10:291038571X.

CARDOSO, Rafael. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: COSAC & Naify, 2012.

CELANI, Gabriela. **Mitos sobre detalhamento que estão mudando na era digital**. 2018. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/886854/7-mitos-sobre-detalhamento-que-estao-mudando-na-era-digital>. Acesso em 2020.

CELANI, M. G. C. **Digital Fabrication Laboratories: Pedagogy and Impacts on Architectural Education**, Campinas, 2012.

CERCHIARI, Aline Maria Faria. **Produção sustentável de poliuretano à base de óleo de mamona e potenciais aplicações na colagem e impermeabilização de madeiras de reflorestamento** - Tese - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Piracicaba, 2019.

CHEN, Guo; YU, Yunfei; LI, Xiang; HE, Bin. **Mechanical behavior of laminated bamboo lumber for structural application: an experimental investigation**. European Journal of Wood and Wood Products (2020) 78:53–63
<https://doi.org/10.1007/s00107-019-01486-9>.

CLOUSTON, P; LAM, F; BARRET, JD. **Incorporating size effects in the Tasi-Wu strength theory for Douglas-fir laminated veneer**. Wood Sci Technol. 1998.

CORSER, R. (Ed.). **Fabricating Architecture. Selected readings in Digital Design and Manufacturing**. New York, Princeton Architectural Press, 2010.

CROUZET, YVES – **Bambuparque: Catálogo Geral**. Portugal.

CUSSACK, V. **Bamboo world: the growing and use of clumping bamboos**. Sydney: Kangaroo Press, 1999.

DANTAS, A. B.; MILITO, C. M.; LUSTOSA, M. C. J.; TONHOLO, J. **O uso do bambu na construção do desenvolvimento sustentável**. Maceió: Instituto do Bambu, 2005.

DANTAS, I. **O Potencial Transformador do Efêmero: A Propósito do Pavilhão Serpentine em Londres**. Artcapital – Arquitetura e Design, abr.2010 Disponível em <http://www.artcapital.net/arq_des-58-o-potencial-transformador-do-efemero-a-proposito-do-pavilhao-serpentine-em-londres>. Acesso: 21.nov.2019.

DE VOS, V. **Bamboo for exterior joinery: a research in material properties and market perspectives**. Thesis: Larenstein University, Leeuwarden, Netherlands, 2010.

DEAMER, P. & BERNSTEIN, P.G. (eds). **Building (in) The Future. Recasting Labour in Architecture**. New York, Princeton Architectural Press, 2010.

DFL. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://dfl.arq.up.pt/>>. Acesso em: 27.ago.2020.

DIVISARE. **Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura, Cecil Balmond: Serpentine Pavilion 2005**. Disponível em <<https://divisare.com/projects/288650-alvaro-siza-eduardo-souto-de-moura-cecil-balmond-duccio-malagamba-serpentine-pavilion-2005>>. Acesso: 17.nov.2019.

DUNN Nick. **Digital Fabrication in Architecture**. Laurence King Publishing Ltd, UK, London: 2012.

DUNKELBERG, K. et al. **Bamboo as a building material**. Institute for Lightweight structures (IL) Karl Krömer Verlag

Stuttgart. ISBN 3-7828-2031-2 NR. 31. Stuttgart: University of Stuttgart, 1996.

DOLLENS, Dennis. **De lo digital a lo analógico**. Editorial Gustavo Gili, SA, Barcelona: 2002.

EASTMAN, Charles M. et al. **Um Guia para Modelagem de Informações da Construção para Proprietários, Gerentes, Designers, Engenheiros e Empreiteiros**. John Wiley & Sons, 2008.

ELNAGAR, Omar. **Gridshell structures in laminated bamboo**. 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.14388.55688

ENGEL, H. **Sistemas estruturais**. Barcelona: Gustavo Gili. Espanha, 2001.

EPOCHTIMES. **Metropol Parasol, um marco da arquitetura moderna na Espanha**. Disponível em <<https://www.epochtimes.com.br/metropol-parasol-marco-arquitetura-moderna-espanha/>>. Acesso: 29.ago.2019.

FAB FOUNDATION. **Site Oficial**. Disponível em: <https://fabfoundation.org/>. Acesso em 07.mai.2021.

FABLAB. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.fablabs.io/>>. Acesso em 27.ago.2020.

FABLAB GREEN. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://fablab.green/wp/en/>>. Acesso em: 27.jul.2020.

FABLAB HOUSE. **Site Oficial**. Disponível em: <<http://www.fablabhouse.com/>>. Acesso em: 27.jul.2020.

FADU. **Eladio Dieste**. Disponível em <<http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/>> . Acesso: 29.mai.2020.

FARRELLY, DAVID. **The book of bamboo**. San Francisco: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1938.

FAUUSP. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.fau.usp.br/fau/secoes/lame/fablab1.html>>. Acesso em: 27.jul.2021.

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José A. **Prefabricación; teoría y práctica**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1973.

FERREIRA. N. S. S. CALLIL JR. C. **Estruturas Lamelares de Madeira para Coberturas**. Madeira: Arquitetura e Engenharia. Ano 1, n. 2, p. 7 – 12, quadrimestral mai/ago, 2000 – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

FOSTER. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/>>. Acesso em: 27.ago.2020.

FRAMPTON, Kenneth (org.). **Tadao Ando: Buildings Projects Writings**. Nova York: Rizzoli, 1984.

FRANKEN. **Site Oficial**. Disponível em: <<http://www.franken-architekten.de/>>. Acesso em: 27.ago.2020.

FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Coord.) **Tecnologias e materiais alternativos de construção. [Capítulo 9]** Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

GARZON, J ; DIAZ, F. **Optimizacion de estructuras em guadua. Trabajo estructural de uniones a traccion**. Colombia: Universidad Nacional de Colombia,1996.

GEHL, Jan. **Cidades para pessoas**. São Paulo: Editora Perspectiva S.A., 2015.

GHAVAMI, K; MARINHO, AB. **Determinição das propriedades mecânicas dos bambus das especies: moso, matake, Guadua angustifolia, guadua tagoara e Dendrocalamus giganteus, para utilização na engenharia**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Publicação RMNC-1 Bambu 01/2001.

GHAVAMI, K. **Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**. In: SYMPOSIUM MATERIALS FOR LOW INCOME HOUSING 3, Mexico City. **Proceedings...** Mexico: CIB/RILEM, 1989.

GISE. **Site Oficial**. Disponível em: <<http://gise.poli.usp.br>>. Acesso em: 27.jul.2020.

GOUW, H. **The Serpentine Pavillion 2005 – Case Study**. Contemporary Digital Practice. Disponível em <https://issuu.com/hizkiagouw/docs/serpentine_pavillion_2005>. Acesso: 23.nov.2019.

HEBEL, Dirk E.; HEISEL, Felix; JAVADIAN, Alireza; WIELOPOLSKI, Mateusz; SCHLESIER, Karsten. **Constructing Bamboo: Introducing an alternative for the construction industry**. 2015. DOI: 10.3929/ethz-a-010636880.

HEBEL, Dirk E.; HEISEL, Felix; JAVADIAN, Alireza. **Engineering Bamboo: The new composite reinforcement**. Future Cities Laboratory, Singapore ETH Center. Singapore:2013. DOI: 10.5176/2301-394X_ACE13.26.

HENRIQUES, Gonçalo; ESTEVES, Luís. **Novos processos de construção em arquitetura**. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Goncalo_Henriques/publication/274387816_Novos_processos_de_construcao_Revista_ArquitecturaVida_n58>. Acesso em: 2020.

HIDALGO-LÓPEZ, O. **Manual de construcción con bambú**. Estudios Técnicos Colombianos Ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Centro de Investigación de Bambu y Madera – CIBAM, 1974.

_____. **Bamboo the gifts of the gods**. Colômbia, Bogota: D'vinni Ltda, 2003.

_____. **Bambú: Su Cultivo Aplicaciones**. Estudos Técnicos Colombianos Limitada. Cali, Colômbia, 1974.

HOLANDA, Marina de. **Metropol Parasol / Jürgen Mayer H. Architects**. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/27417/metropol-parasol-jurgen-mayer-harchitects>>. Acesso: 25.nov.2019.

HUERTA, Santiago. **Arcos, Bóvedas y Cúpulas – Geometria y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica**. Instituto Juan de Herrera – Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 2004.

IAAC. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://iaac.net/project/digital-adobe/>>. Acesso em: 27.jul.2021.

IASS. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://iass-structures.org/>>. Acesso em: 27.jul.2021.

ICBO EVALUATION SERVICE, Inc. **Acceptance Criteria for Structural Bamboo**. AC 162. California: 2000.

ICON. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.iconbuild.com/>> Acesso em: 27.jul.2021.

INBAR. The International Network on Bamboo and Rattan. **International model building code for bamboo**. Jan. 1999.

ITS BRASIL. **Site Oficial – FABLAB Livre SP**. Disponível em: <<http://itsbrasil.org.br/>>. Acesso em: 27.jul.2021.

JABI W. **Parametric Design for Architecture**. London: Laurence King Publishing Ltd, UK, 2013. ISBN 978-17067-314-1.

JANSEN, Jules. **Building with bamboo – A handbook**. Warwickshire: Intermediate Technology Publications, 1995.

_____. **Determination of physical and mechanical properties of bamboo**. INBAR, 2000.

JODIDIO, P. **Serpentine Gallery Pavilions**. Londres: Taschen, 2011.

JR. JIMENEZ, Juanito P.; NATIVIDAD, Robert A. **Development of Arc-Laminated Bamboo Lumber**. Philippine Journal of Science 148 (1): 21-31, 2019.

KAMEGASAWA, A. M. Y. **Aplicações do bambu como material construtivo, com ênfase na fabricação de pisos**. 2004. 124f. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2004.

KHOSHBAKHT, N.; CLOUSTON, P. L.; ARWADE, S. R.; SCHREYER, A. C. **Evaluation of ASTM D5764 Dowel Connection Tests for Laminated Veneer Bamboo (LVB)**. Journal of Testing and Evaluation 47, no. 4 (July/August 2019): 2717–2736. <https://doi.org/10.1520/JTE20180385>

KIRIAN, S. & TIMBERLAKE, J. **Refabricating Architecture. How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction**. New York: MacGraw-Hill, USA, 2004.

KLEINE, HANS. **Bambu: tecnologia da durabilidade**. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina: 2010.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in the digital Age. Design and manufacturing**. New York and London, Taylor & Francis, 2003.

_____. **Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age**. 2001.

KOLAREVIC, B. & MALKAWI, A.M. (Eds.). **Performative Architecture. Beyond Instrumentality**. New York, Spon Press, 2005.

KRETSCHMANN, DE. **Mechanical Properties of Wood**. In Wood Handbook, General Technical Report FPL-GTR-190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 2010.

KRETSCHMANN, DE; MOODY, RC; PELLERIN, RF; et al. **Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber**. Technical Report FPL-RP-521. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 1993.

LARENA, A. B. **Estrategias de Diseño Estructural en la Arquitectura Contemporánea – El Trabajo de Cecil Balmond**. Madri. 476 p. Tese (Doutoramento em Engenharia de Caminhos, Canais e Portos) – Departamento de Estructuras de Edificación – Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

LARNER. M. **Serpentine Gallery Pavilion 2005 Designed by Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura with Cecil Balmond – Arup**. Londres: M. Larner Editor, 2005.

LAVERS, GM. **The strength properties of timber**, 3rd edition. Building Research Establishment (BRE) Report Series, London, UK, 2002.

LEHMANN. **Site Oficial**. Disponível em <<https://www.lehmann-gruppe.ch/en/holzbau/free-form/swatch.html>>. Acesso: 17.set.2020.

LEITNER, Philipp. **Structural Bamboo – Material Properties and Fields of Application**. Master's Thesis, Civil Engineering – Structural Engineering Graz University of Technology. Graz: 2015

LENGEN, JOHAN VAN – **Manual do arquiteto descalço**. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2004.

LIA, Hai-tao; ZHANGA, Qi-sheng; HUANGA, Dong-sheng; DEEKSB, Andrew John. **Compressive performance of laminated bamboo**. Composites: Part B 54 - p. 319-328. 2013.<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.035>

LIESE, W. **The structure of bamboo in relation to its properties and utilization**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL USE OF BAMBOO.1992. Beijing,China. **Proceedings...** Beijing, 1992.

_____. **The anatomy of bamboo culms**. In: INTERNATIONAL NETWORK FORBAMBOO AND RATTAN (INBAR). 1998. China. **Technical Report 20**. China, 1998.

_____; KÖHL, M. **Bamboo – The plant and its uses**. 2015. Tropical Forestry (Book 10). Springer. 2015.

LIOU F. W. **Rapid Prototyping and Engineering Applications a toolbox for Prototype Development**. FL: CRV Press, EUA. 2008. ISBN-13: 978-0-8493-3409-2.

LIU, Xianmiao *et al.* **Nomenclature for Engineered Bamboo**. 2015. Bioresources.com DOI: 10.15376/biores.11.1.1141-1161

LONDOÑO, XIMENA. **Evaluation of bamboo resources in Latin America**. Cali: Instituto Valle Caucano de Investigaciones Cientificas, 2001.

MAGANGA, Matthew. **The Aesthetics of automation examining the appearance of 3D printed affordable housing**. Disponível em: <https://www.archdaily.com/962946/the-aesthetics-of-automation-examining-the-appearance-of-3d-printed-affordable-housing>. Acesso em: 2021.

MALÉ-ALEMANY, M.; SOUSA, J.P. **Computation and Materiality**. In: B. Kolarevic and K. Klinger (eds.), **Manufacturing Material Effects, Rethinking Design**

and Making in Architecture (pp. 129-144,) Routledge, Nova Iorque, 2008.

MARÇAL, Vitor Hugo. **Análise Comparativa de Normas Técnicas Internacionais para o Emprego do Bambu - Colmo em estruturas prediais.** Mestrado - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília: 2018.

MAYER, Jürgen. **Site Oficial.** Disponível em <<http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html>>. Acesso: 29.jul.2019.

METSÄ WOOD. **Site Oficial – Kerto.** Disponível em <<https://www.metsawood.com/global/Pages/default.aspx>>. Acesso: 29.ago.2020.

MIN, SHEN . **Bamboo in China.** Shanghai: Shanghai Press and Publishing Development Company,2012.

MINKE, GERNOT. **Manual de Construcción con Bambú.** Cali, Colômbia Merlín S.E.,2010

_____. **Building with Bamboo – Design and Technology of a Sustainable Architecture.** Basel: Birkhäuser, 2012.

MIKELL P. Groover; ZIMMERS, JR. **CAD/CAM Computer-Aid Design and Manufacturing** EUA:1 EUA/NJ Prentice Hall. 984 ISBN 0-13-110130-7

MITCHELL, W. J. **A Lógica da Arquitetura, projeto, computação e cognição.** Trad. Gabriela Celani, Campinas: Editora da Unicamp,2008. ISBN 978-85-268-0798-3.

MCDONOUGH, Willian. **Design, Ecology, Ethics, and the Making of Things.** 1994.

MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo.** 3. ed. Porto Alegre: Sulina, 2007.

MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas.** Lisboa: Edições 70, 1981.

NESBITT, Kate (org.). **Uma nova agenda para a arquitetura: antologia teórica (1965-1995).** São Paulo: Cosac Naify, 2006.

OGUNBLYL, Moses A.; OLAWALE, Simon O.; TUDJEGBE, Oke E.; AKINOLA, S. R. **Comparative Analysis of the Tensile Strength of Bamboo and Reinforcement Steel Bars as Structural Member in Building Construction.** International Journal of Scientific & Technology Research - Volume 4, ISSUE 11, November 2015.

OLIVEIRA, Edith Gonçalves de. **Bambu: investigação de novos empregos na construção civil**. 1980. 151p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

ORTEGA, L. (Ed.) **La digitalización toma el mando. Compendios de Arquitectura Contemporánea**. GG, Barcelona, 2009.

OXMAN, R. **Theories of the Digital in Architecture**. New York: Routledge, EUA. 2014.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6 Editora, 2007.

PEREIRA, M. A. R.; PEREIRA NETO, M. R. **Projeto bambu: introdução de espécies prioritárias**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA –CONBEA, 25.; CONGRESSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 2.1996. Bauru. **Anais...** Bauru: UNESP, 1996.

PETERS, B.; PETERS, T. Inside Smartgeometry. **Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design**. 2013. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. UK. ISBN 978-1-118-52247-9.

PICON, A. **Digital Culture in Architecture: an introduction for the design professions**. Birkhäuser, 2010.

PROJETO BAMBU: **Site Oficial**. Disponível em: <<https://bambu-unesp-bauru.github.io/projetobambu>>. Acesso em: 27.jul.2020.

PROJETO PARAMÉTRICO. **Serpentine Gallery Pavilion**. Disponível em <<https://projeto-parametrico.wordpress.com/projeto-de-ensino-9/casos/arquiteturas/serpentine-gallery-pavilion/>>. Acesso: 17.jun.2020.

PYLOS. **Site Oficial**. Disponível em: <<http://pylos.iaac.net>>. Acesso em: 27.jul.2020.

RIVERO, L.A & BERALDO A. L. **Laminado colado e contraplacado de bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Construções Rurais e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RITTIRONK, S. (2009). **Investigating Laminated Bamboo Lumber as a Viable Structural Material in Architectural Applications**. Tese doutoral. Illinois Institute of Technology, College of Architecture. Chicago, Illinois, Estados Unidos.

SAGRADA FAMÍLIA. **Site Oficial**. Disponível em: <<http://www.sagradafamilia.org>>. Acesso em: 07.mai.2021

SALGADO, A. L. B.; AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; MACEDO, E. L.; **Instruções técnicas sobre o bambu**. Boletim Técnico. Instituto

Agrônomo de Campinas, Campinas, São Paulo. Maio, 1994. 44 p.

SERPENTINE GALLERIES. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.serpentinegalleries.org/exhibitions-events/serpentine-gallery-pavilion-2005-alvaro-siza-and-eduardo-souto-de-moura-cecil-balmond-0>>. Acesso: 25.nov.2019.

SCHODEK, D BECHTHOLD, M GRIGGS, K. **Digital design and manufacturing; CAD/CAM applications in architecture and design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

SHARMA, B., GATOO, A., BOCK, M., MULLIGAN, H., RAMAGE, M. (2014). **Engineered bamboo: state of the art**. Proceedings of the ICE - Construction Materials, volume 168.

SHARMA, B; BAUER, H; SCHICKHOFER, G; RAMAGE, MH., **'Mechanical characterisation of structural laminated bamboo'**, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, vol. 170, no. 4, pp. 250-264. 2017. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00061>

SHARMA, Bhavna; GATÓO, Ana; BOCK, Maximilian; RAMAGE, Michael. **Engineered bamboo for structural applications**. Constructions and Building Materials. 2015.

SIDNEY OPERA HOUSE. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.sydneyoperahouse.com>>. Acesso em: 07.mai.2021

SIZA, A. **O Pavilhão Serpentine de 2005**. In: JODIDIO, P. **Serpentine Gallery Pavilions**. Londres: Taschen, 2011.

SOUSA, José Pedro. **FCT Research Project: Robotic Technologies for Non-Standard Design and Construction in Architecture**. Porto: DFL - FAUP, 2015.

SOUSA, J.P.; DUARTE, J.P. **Digital Promises; Material Realities. Perceiving the Gap in: Proceedings of the 22nd Conference on Education in Computer Aided Architectural Design, eCAADe 2005** (pp. 221-228), Instituto Superior Técnico, Lisboa.

SOUSA, J.P. **From Digital to Material. Rethinking the application of Cork in Architecture through the use of CAD/CAM technologies**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2010 (Tese de Doutorado em Arquitetura).

SOUTO DE MOURA. E. **Serpentine Galleries: 2005 Pavilion**. In: LARNER. M. **Serpentine Gallery Pavilion 2005 Designed by Álvaro Siza, Eduardo Souto de Moura with Cecil Balmond – Arup**. Londres: M. Larner Editor, 2005.

SPUYBROEK, L. NOX. **Machining Architecture**. London UK:Thames&Hudson, 2004.

STAMM, J. **La evolución de los métodos constructivos en bambú**. In: CONGRESO MEXICANO DEL BAMBÚ, 2. 2007. Puebla. **Anais...** Puebla, México, 2007.

STANDART. **Serpentine Gallery Pavilion 2005**. Disponível em <<https://standard.co.uk/s3fs-public/thumbnails/image/2017/02/21/13/serpentinegalleryyears2102i.jpg/>>. Acesso: 17.ago.2019.

STEURER, Anton. **Developments in Timber Engineering – The Swiss Contribution**. Birkhäuser, Basel-Switzerland, 2006.

SUHAILY, S. Siti; KHALIL, Abdul H.P.S.; NADIRAH, Wan W.O.; JAWAID, M. **Bamboo Based Biocomposites Material, Design and Applications**. 2014. <http://dx.doi.org/10.5772/56057>

TÉCHNE. A Revista do Engenheiro Civil. **Construções de bambu**. PINI, Técnica 108, mar. 2006.

UNICAMP. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.unicamp.br/unicamp/eventos/2019/06/13/plasma>>. Acesso em: 27.jul.2020.

UNITED NATIONS. **The use of bamboo and reeds in building construction**. Department of Economic and Social Affairs. Nova York, 1972.

VIDIELLA, Àlex Sánchez – **Bamboo**. Barcelona: Ed. FKG, 2011.
VILLEGAS, M. **Tropical Bamboo**. Rizzoli International Publications, Inc. Nova York, 1990.

VITRA. **Site Oficial**. Disponível em: <<https://www.vitra.com>>. Acesso em: 10.mai.21

VITRA DESIGN MUSEUM (ed.). **Grow your own house – Simón Vélez and bamboo architecture**. Alemanha, 2000.

VOGTLÄNDER, J., VAN DER LUGT, P., BREZET, H. **The sustainability of bamboo products for local and Western European applications**. LCAs and land-use. Journal of Cleaner Production, 2010.

VOLPATO, N. (org.) **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher, 2007. ISBN 85-212-0388-8.

WANBERG J. **Composite Materials Fabrication Handbook # 3 Stillwater**: Wolfgang Publications Inc. USA, 2012.

WANG, Z., GUO, W. **Laminated Panel Manufacture of Two Kinds of Bamboo for Architecture Material and Property**

Comparison. International Network for Bamboo and Rattan - INBAR. INBAR working paper n°48.

XIAO, Y., YANG, R.Z., SHAN, B. **Production, environmental impact and mechanical properties of GluBam®.** Construction and Building Materials, 2013.

XIAO, Y. **Progress in GluBam® Structure Development.** Presentation during the Fifth Kwang-Hua Forum: Innovations and Implementations in Earthquake Engineering Research. Shanghai, China, 2012.

XIAO, Y; WU,Y; LI,J; YANG,Rz. (2017) **An experimental study on shear strength of glubam.** Constr Build Mater 150:490–500. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.005>

XU, Ming; CUI, Zhaoyan; TU, Lihui; XIA, Qiuling; CHEN, Zhongfan. **The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of laminated bamboo.** Construction and Building Materials 226 p. 32-46. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.274>

YU, D., TAN, H., RUAN, Y. **A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission.** Energy and Buildings, 2011.

ZELLNER, P. **Hybrid Space New Forms in Digital Architecture.** London, UK: Thames&Hudson, 1999. ISBN-10:0847822036.

ZHANG, Xiubiao; JIANG, Zehui; FEI, Benhua; FANG, Changhua; LIU, Huanrong. **Experimental performance of threaded steel glued into laminated bamboo.** Construction and Building Materials 249. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118780>.

ZWERGER, K. **Wood and Wood Joints: Building Traditions of Europe and Japan.** Birkhäuser.