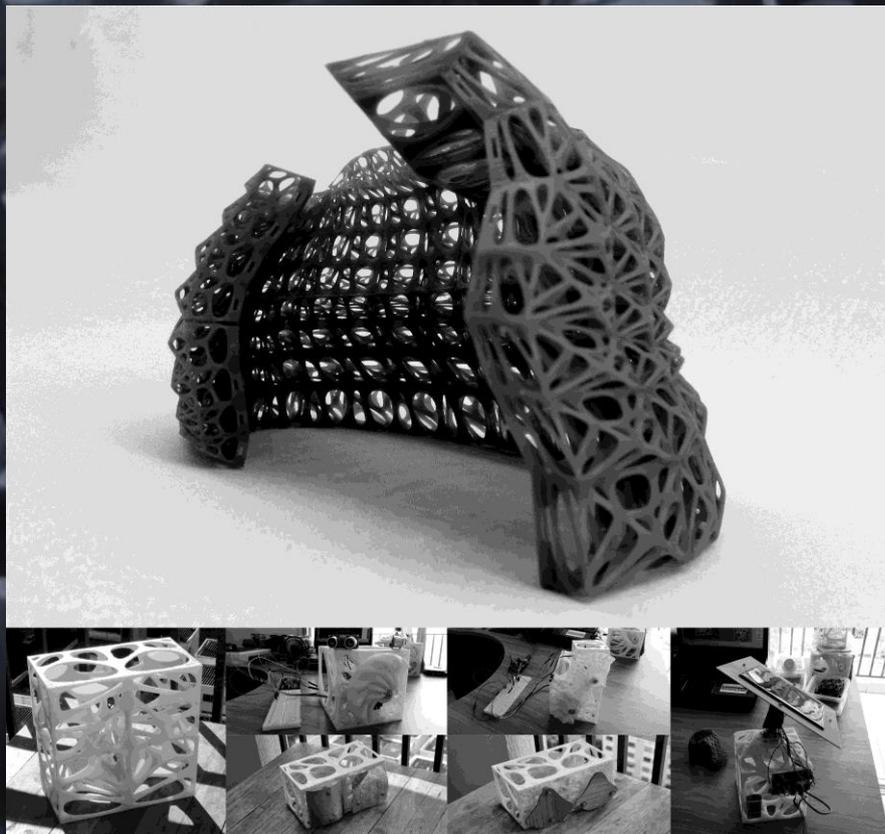


Juan Carlos Guillen Salas

**Projeção e Fabricação de Pavilhão Biomimético de Forma Complexa,  
Celular e Responsivo com Tecnologias Digitais e Robótica em Brasília - DF**



Brasília - Distrito Federal - Brasil

Julho/2020

Juan Carlos Guillen Salas

**Projeção e Fabricação de Pavilhão Biomimético de Forma Complexa, Celular e Responsivo  
com Tecnologias Digitais e Robótica em Brasília - DF**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, área de concentração de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, linha de pesquisa de Tecnologia de Produção do Ambiente Construído, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. PhD. Neander Furtado Silva

Brasília - Distrito Federal - Brasil

Julho/2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

GG975p Guillen Salas, Juan Carlos  
Projetação e Fabricação de Pavilhão Biomimético de Forma Complexa, Celular e Responsivo com Tecnologias Digitais e Robótica em Brasília - DF / Juan Carlos Guillen Salas; orientador Neander Furtado Silva. -- Brasília, 2020.  
377 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Arquitetura e Urbanismo)  
- Universidade de Brasília, 2020.

1. Biomimética. 2. Fabricação Digital. 3. Arquitetura Responsiva. 4. Robótica-Arduino. 5. Desenho Generativo algorítmico-Paramétrico. I. Furtado Silva, Neander, orient. II. Título.

Juan Carlos Guillen Salas

**Projeção e Fabricação de Pavilhão Biomimético de Forma Complexa, Celular e Responsivo  
com Tecnologias Digitais e Robótica em Brasília - DF**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, área de concentração de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, linha de pesquisa de Tecnologia de Produção do Ambiente Construído, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. PhD. Neander Furtado Silva

---

Prof. PhD. Neander Furtado Silva (Orientador)  
Universidade de Brasília

---

Prof. Dra. Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves Alves (Avaliador titular)  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

---

Prof. Dr. Fábio Ferreira de Lima (Avaliador titular)  
Universidade Federal de Goiás

---

Prof. Dr. Francisco Leite Aviani (Avaliador titular)  
Universidade de Brasília

---

Prof. Dr. Félix Alves da Silva Júnior (Avaliador suplente)  
Universidade de Brasília

Brasília - Distrito Federal - Brasil/Julho/2020

Dedico este trabalho à minha Esposa Luana, aos meus pais, Juan Máximo e Apolonia Alejandrina,, aos meus irmãos, Bernabé, Edgard e Yessenia, e amigos, que souberam compreender a minha ausência.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, o Prof. PhD. Neander Furtado Silva, pela sua amizade, grande apoio e importantes instigações para a pesquisa, experimentação e inovação.

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Luana Miranda Esper Kallas pelo patrocínio desta pesquisa e pelo apoio nos testes dos dispositivos e materiais nos diferentes experimentos realizados na pesquisa e pela coordenação da parceria do Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa com a Universidade Federal de Goiás.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alessandra Beatriz Carneiro Gonçalves Alves do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Triângulo Mineiro pela participação nas minhas bancas de Exame de Qualificação, Defesa de Tese e, pela leitura e sugestões realizadas para a melhoria deste trabalho de Tese.

Ao Prof. Dr. Fábio Ferreira de Lima do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás pela participação na minha banca de Defesa de Tese e pela leitura e sugestões realizadas para a melhoria deste trabalho de Tese.

Ao Prof. Dr. David Rodney Lionel Pennington da Faculdade de Comunicação da Universidade de Brasília pela participação na minha banca de Exame de Qualificação e pela leitura e sugestões realizadas para o prosseguimento do Projeto de Tese.

Ao Prof. Dr. Francisco Leite Aviani da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília pela participação na minha bancas de Exame de Qualificação, Defesa de Tese e, pela leitura e sugestões realizadas para a melhoria deste trabalho de Tese.. E pela sua amizade, grande apoio e importantes instigações para a pesquisa, experimentação e inovação.

Aos Professores, Neander Furtado Silva e Ecilamar Maciel Lima pelo fornecimento de alguns frutos da Palmeira Babaçu do quintal da sua residência.

Aos senhores, Luiz e Rosa Harumi, donos do “ANGRA Carnes e Pescados” no CEASA de Brasília, pelo fornecimento de alguns frutos da Palmeira Buriti (*Mauritia Flexuosa*).

Ao Arquiteto Paisagista Oscar Bressane (integrante da equipe de Roberto Burle Marx em excursões de coleta de plantas e pesquisas de campo) pela excursão guiada a um brejo de Buriti na estrada da cidade de Anápolis para a cidade de Pirenópolis no Estado de Goiás.

À Prof<sup>a</sup>. Ma. Symone Rodrigues Jardim do Departamento de Design da Universidade de Brasília pelo apoio na observação de algumas espécies vegetais no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília.

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria das Graças M. Souza do Laboratório de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelo apoio na observação de algumas espécies vegetais no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sueli Maria Gomes do Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelas informações fornecidas sobre a anatomia do fruto da Palmeira do Buriti, Buriti.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina C. Oliveira do Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelas informações fornecidas sobre a Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sueli Maria Gomes, especialista em Palmeiras.

À Ma. Shaiane Goulart Crossetti responsável do Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelo apoio na observação de algumas espécies vegetais.

À Tec. Ingrid Gracielle Martins da Silva do Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelo apoio na observação de algumas espécies vegetais.

Ao Tec. Guilherme Sirimarco de SouzaTonelli Silveira do Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília pelo apoio na observação de algumas espécies vegetais.

Aos alunos, Adriana Cosme Pereira, Alexandre Alves, Aline Biu, Emily Vurlod Ungaretti Pellegrin, Júlia Nascimento, Leonardo Figueiredo, Lucas Ber, Jéssica Ferreira, Luiz Felipe Machado, Mario Sergio Facundes Taveira, Pedro Braga, pela participação no processo de construção do Protótipo de Papelão em escala 1:1.

À designer Fabiana da empresa “Recortes a Laser” pelo apoio no serviço de corte a laser dos 450 módulos desdobrados do Protótipo de Papelão em escala 1:1.

Ao Designer Gráfico Fredy Ugarte da empresa “Pacific Plaza” na cidade de Arequipa, Peru, pelo apoio na impressão 3D da maquete, em baixa resolução, para estudo no material PLA

Ao Laboratório de Design - LADES / Protip (Prototipagem) do Departamento de Design da Universidade de Brasília pelo apoio no uso de suas instalações e equipamentos para a realização desta Pesquisa.

Ao Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília pelo apoio no uso de suas instalações e equipamentos para a realização desta Pesquisa.

À Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília pelo apoio no uso de uma sala de depósito, sala 31 no subsolo, como sala para a o armazenamento de materiais e construção da Estrutura de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1.

Ao Almojarifado da Universidade de Brasília pelo fornecimento de duas mesas para o desenvolvimento dos trabalhos de montagem dos módulos e dos panos da Estrutura de Papelão.

À Empresa Júnior “MECAJUN”, Rafaela S. Lima e Daniel Amaral do Curso de Mecatrônica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília pela parceria no desenvolvimento do dispositivo automatizado.

Aos alunos, Leonardo Figueiredo e Aline Biu pela participação no processo de experimentação de construção do modelo reduzido em Impressão 3D na impressora ZPrinter 310 usando o material original e outros alternativos.

Ao Me. Leonardo Barreto, proprietário da empresa “Uberblock”, pelo apoio na impressão 3D da maquete, em média resolução, para estudo no material Poliacido Láctico.

Ao Prof. Dr. Braulio Vinícius Ferreira, Diretor da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio no uso temporário de um gabinete na Sala de Professores pelo período de 3 meses de julho a setembro de 2019.

Ao Prof. Dr. Israel Elias Trindade, Pro-Reitor Adjunto de Graduação, da Universidade Federal de Goiás pelo apoio na concessão de uso da sala 8 no Centro de Aulas Caraíbas.

Ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação por me permitir usar suas instalações e equipamentos.

Ao Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha, do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio no corte de peças em papelão de onda simples para construção do Pavilhão de Forma Complexa construído em papelão em escala 1:1.

Ao Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho, do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio no corte de peças em isopor com fio quente em braço robótico e pelo teste de fabricação de peça por modelo perdido impresso em 3D em Poliacido Láctico pelo processo de conformação completa por fundição em alumínio.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Assfalk de Oliveira, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio no corte de peças em isopor com fio quente em braço robótico programado.

Ao Prof. Dr. José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa, Coordenador do Laboratório de Fabricação Digital da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, Portugal, pelo apoio nas consultas sobre o software e ferramentas para utilizar no braço robótico industrial.

Aos Técnicos, Fleide Wilian Rodrigues Alves y João Bosco da Cunha, do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação.

Ao Téc. Sebastião de Souza pelo apoio na fabricação do transformador industrial para alimentar o cortador de isopor a fio quente.

Aos alunos, Júnior da Silva Mata, Livia Aracelli Rocha Abreu, Gracielly Fonseca Cordeiro, do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás.

À Bibliotecária Adriana Ribeiro, Vice-Diretora da Biblioteca Central Prof. Alpheu da Veiga Jardim, da Universidade Federal de Goiás do Câmpus Samambaia, por me permitir expor a Estrutura de Forma Complexa em papelão e peças biônicas fabricadas em impressão 3D no Hall principal no período de 10 de junho a 5 de julho de 2019.

À Bibliotecária Márcia Calil, Coordenadora Geral da Biblioteca Seccional Campus Colemar Natal e Silva do Setor Universitário, por me permitir expor a Estrutura de Forma Complexa em papelão e peças biônicas fabricadas em impressão 3D no Hall principal no período de 8 de julho a 30 de agosto de 2019.

Ao Prof. Me. Alexandre de Araújo Badim, Coordenador da Galeria de Exposições Culturais do Curso de Letras da Universidade Federal de Goiás do Câmpus Samambaia, por me permitir expor a Estrutura de Forma Complexa em papelão e peças biônicas fabricadas em impressão 3D no Hall principal no período de 16 de setembro a 15 de outubro de 2019.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida para a minha manutenção e financiamento da pesquisa do meu Projeto de Tese.

Ao Decanato de Pós-Graduação (DPG) pelo auxílio concedido para o financiamento em parte do experimento de fabricação de estrutura de forma complexa em papelão em escala 1:1.

## RESUMO

No contexto das pesquisas para o desenvolvimento de envoltórias para as edificações, para filtrar as condições ambientais exteriores, para controlar o ambiente do espaço interior pelo usuário e, para a redução do consumo de energia. A problemática desta pesquisa de tese foi: É possível estabelecer um conjunto de métodos e técnicas que viabilizem a projeção, fabricação e construção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa, celular e responsiva com tecnologias digitais e robótica em Brasília, DF? E, a hipótese guia da pesquisa foi: Acredita-se que um conjunto de técnicas de projeção paramétrica, de fabricação digital e de robótica podem viabilizar a produção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa e celular em Brasília, DF. Assim, neste trabalho de carácter experimental, o objetivo foi determinar as possibilidades e limitações da projeção e fabricação com tecnologias digitais e robótica de um Pavilhão Biônico de Forma Complexa Celular Responsivo, inspirado nas estruturais das fibras encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas presentes na Região Centro-Oeste do Brasil: Ateemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. Em tal objetivo, o trabalho foi organizado em duas etapas: da fundamentação conceitual e, dos experimentos. Na etapa da fundamentação conceitual foram revisados os temas: biomimética, fabricação digital, arquitetura responsiva, fabricação com robótica na arquitetura e a plataforma arduino. E, na etapa dos experimentos, a partir do referencial teórico estabelecido na etapa da fundamentação conceitual, foram formulados sete experimentos práticos. Os quais consistiram na fabricação da versão 1.0 do pavilhão em papelã, fabricação com tecnologia 3D baseada em processamento em luz direta em resina ou ligas de metal de protótipos do pavilhão, células estruturais e células responsivas eletromecanicamente e responsivas por comportamento físico dos materiais e, testes de fabricação por fundição com modelo perdido em PLA e fabricação com fio quente em braço robótico antropomórfico industrial. E, a principal conclusão é que um conjunto de técnicas de projeção paramétrica, de fabricação digital e de robótica podem viabilizar a produção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa e celular em Brasília – DF.

**PALAVRAS CHAVE:** Biomimética, Fabricação Digital, Arquitetura Responsiva, Robótica-Arduino, Desenho Generativo-algorítmico-Paramétrico.

## RESUMEN

En el contexto de las investigaciones para el desarrollo de envolventes para las edificaciones, para filtrar las condiciones ambientales exteriores, para controlar el ambiente del espacio interior por el usuario y para la reducción del consumo de energía. El problema de esta investigación de tesis fue: Es posible establecer un conjunto de métodos e técnicas que viabilicen el diseño, fabricación y construcción de una arquitectura biomimética, de forma compleja, celular e inteligente con tecnologías digitales y robótica en Brasilia, DF? Y la hipótesis guía de la investigación fue: Que se cree que un conjunto de técnicas de diseño paramétrico, de fabricación digital y de robótica pueden viabilizar la producción de una arquitectura biomimética, de forma compleja e celular en Brasilia, DF. Assim, neste trabalho de caracter experimental, el objetivo fue determinar as posibilidades e limitaciones del diseño e fabricación con tecnologías digitales y robótica de un Pabellón Biônico de Forma Compleja Celular Responsivo, inspirado en las estructuras de las fibras encontradas en las cáscaras de los frutos de las especies fructíferas presentes en la Región Centro-Oeste del Brasil: atemoya, moriche, coco babasú, guanábana y anón. En tal objetivo, la investigación fue organizada en dos etapas: etapa de la fundamentación conceptual y etapa de los experimentos. Na etapa de la fundamentación conceptual fueron revisados los temas: biomimética, fabricación digital, arquitectura inteligente, fabricación con robótica en la arquitectura e la plataforma arduino. Y, en la etapa de los experimentos, a partir del referencial teórico establecido en la etapa de la fundamentación conceptual, fueron formulados siete experimentos prácticos. Los cuales consistieron en la fabricación de la versión 1.0 del pabellón, fabricación con tecnología de impresión 3D basada en procesamiento de luz directa sobre resina o materiales metálicos de prototipos do pabellão, células estructurales y células inteligentes, activas y pasivas; y ensayos de fabricación por fundición con modelo perdido en PLA y fabricación con alambre caliente en brazo robótico antropomórfico industrial. La principal conclusión de la investigación fue que un conjunto de técnicas de diseño paramétrico, de fabricación digital y de robótica pueden viabilizar la producción de una arquitectura biomimética, de forma compleja y celular en Brasilia – DF.

**PALABRAS CLAVE:** Biomimética, Fabricación Digital, Arquitectura Adaptativa, Robótica-Arduino, Diseño Generativo-Algorítmico-Paramétrico

## **ABSTRACT**

In the context of research for the development of envelopes for buildings, to filter external environmental conditions, to control the environment of the interior space by the user, and to reduce energy consumption. The problem with this thesis research was: Is it possible to establish a set of methods and techniques that enable the design, manufacture and construction of a biomimetic architecture, in a complex, cellular and responsive way with digital and robotic technologies in Brasília, DF? And, the guiding hypothesis of the research was: It is believed that a set of techniques of parametric design, digital fabrication and robotics can enable the production of a biomimetic architecture, in a complex and cellular way in Brasília, DF. Thus, in this experimental work, the objective was to determine the possibilities and limitations of the design and manufacture with digital and robotic technologies of a Responsive Cell Complex Bionic Pavilion, inspired by the structural fibers found in the fruit skins of the fruit species present in Central-West Region of Brazil: Atemoia, buriti, babassu coconut, soursop and pine cone or count fruit. With this objective in mind, the work was organized in two stages: conceptual foundation and experiments. In the conceptual foundation stage, the themes were revised: biomimicry, digital fabrication, responsive architecture, fabrication with robotics in architecture and the Arduino platform. And, in the experiment stage, from the theoretical framework established in the conceptual foundation stage, seven practical experiments were formulated. Which consisted of the manufacture of version 1.0 of the pavilion on cardboard, manufacture with 3D technology based on processing in direct light in resin or metal alloys of the pavilion's prototypes, structural cells and electromechanically responsive cells and responsive to the physical behavior of the materials and, tests of manufacture by foundry with model lost in PLA and manufacture with hot wire in industrial anthropomorphic robotic arm. And, the main conclusion is that a set of techniques of parametric design, digital fabrication and robotics can enable the production of a biomimetic architecture, in a complex and cellular way in Brasília - DF.

**KEYWORDS:** Biomimetic, Digital Fabrication, Responsive Architecture, Robotic-Arduino, Generative-Algorithmic-Parametric Design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Espécies frutíferas selecionadas. Fonte: Própria. ....	100
Figura 2:	Digitalização e restituição fotogramétrica das espécies frutíferas. Fonte: Própria.....	101
Figura 3:	Interpretação das geometrias das espécies frutíferas. Fonte Própria. ....	102
Figura 4:	Definição da geometria da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria. ....	103
Figura 5:	Maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria. ....	105
Figura 6:	Maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria .....	105
Figura 7:	Maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares dos módulos. (a) Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de igual tamanho de quadrados e triângulos. (b) Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de diferente tamanho de quadrados e triângulos. (c) Módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos, de diferente tamanho com dispositivos de conexão pelas arestas. (d) Maquetes rápidas de papel dos módulos. Fonte: Própria.....	107
Figura 8:	Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria. ....	110
Figura 9:	Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria. ....	110
Figura 10:	Parametrização da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria .....	112
Figura 11:	Panelização da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.....	112
Figura 12:	Parametrização do módulo para distribuição na superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.....	113
Figura 13:	Parametrização do protótipo do pavilhão Biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção. Fonte: Própria. ....	114
Figura 14:	Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição. Fonte: Própria.....	115
Figura 15:	Vistas do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção. Fonte: Própria. ....	116
Figura 16:	Vistas do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição. Fonte: Própria.....	117
Figura 17:	Protótipo 3D físico da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por seção. Fonte Própria .....	118
Figura 18:	Protótipo 3D físico da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por adição. Fonte Própria. ....	119
Figura 19:	Arquivos do pavilhão e divisão em panos. Fonte: Própria.....	122
Figura 20:	Papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,00m. Fonte: Própria. ...	122
Figura 21:	Separação das faces de arestas curvas das faces de arestas retas. Fonte Própria.....	123
Figura 22:	Junção das faces de arestas curvas com as faces de arestas retas. Fonte: Própria .....	124
Figura 23:	Revisão das linhas para corte e das linhas para dobragem sem fazer a diferenciação do tipo de linha. Fonte: Própria. ....	124

Figura 24:	Revisão das linhas para corte e as linhas para dobragem com diferenciação do tipo de linha. Fonte: Própria. ....	125
Figura 25:	Corte a laser e organização das partes dos módulos. Fonte: Própria.....	128
Figura 26:	Corte a laser dos módulos em peça única. Fonte: Própria.....	128
Figura 27:	Fechamento dos módulos. Fonte: Própria.....	130
Figura 28:	Reforço interno dos módulos. Fonte: Própria.....	131
Figura 29:	Reforço externo dos módulos. Fonte: Própria.....	131
Figura 30:	Organização e apresentação dos módulos que conformam os panos. Fonte: Própria.....	133
Figura 31:	Montagem dos panos. Fonte: Própria.....	134
Figura 32:	Apresentação dos panos. Fonte: Própria.....	134
Figura 33:	Comparação dos panos de papelão com os panos fabricados com impressão 3D. Fonte: Própria...	136
Figura 34:	Aplicação de resina a base d'água nos panos. Fonte: Própria.....	136
Figura 35:	Emborrachado dos panos da base 2-4-6-8. Fonte Própria.....	137
Figura 36:	Fabricação dos dispositivos de fixação dos panos. Fonte: Própria.....	139
Figura 37:	Colocação dos dispositivos de ligação nos panos. Fonte: Própria.....	140
Figura 38:	Pavilhão biônico de forma complexa na escala 1:1. Fonte: Própria.....	141
Figura 39:	Comparação do pavilhão na escala 1:1 de papelão com os pavilhões em tamanho reduzido fabricados com impressão 3D. Fonte: Própria.....	142
Figura 40:	Código gráfico da superfície. Fonte: Própria.....	150
Figura 41:	Código gráfico do módulo. Fonte: Própria.....	151
Figura 42:	Código gráfico da superfície do pavilhão dividido em módulos. Fonte: Própria.....	152
Figura 43:	Modelagem 3D digital do pavilhão. Fonte: Própria.....	153
Figura 44:	Divisão em panos do pavilhão. Fonte: Própria.....	155
Figura 45:	Divisão do pano 1 em blocos. Fonte: Própria.....	157
Figura 46:	Divisão do pano 2 em blocos. Fonte: Própria.....	158
Figura 47:	Divisão do pano 3 em blocos. Fonte: Própria.....	159
Figura 48:	Divisão do pano 4 em blocos. Fonte: Própria.....	160
Figura 49:	Divisão do pano 5 em blocos. Fonte: Própria.....	162
Figura 50:	Divisão do pano 6 em blocos. Fonte: Própria.....	163
Figura 51:	Divisão do pano 7 em blocos. Fonte: Própria.....	164
Figura 52:	Divisão do pano 8 em blocos. Fonte: Própria.....	166
Figura 53:	Teste de impressão 3D por fundição de pó ZCast. Fonte: Própria.....	169
Figura 54:	Teste de impressão 3D por fundição de pó de gesso-maltodextrina-açúcar. Fonte: Própria.....	170
Figura 55:	Teste de impressão 3D por fabricação de filamento fundido de ABS. Fonte: Própria.....	173
Figura 56:	Teste de impressão 3D por fabricação de filamento fundido de PLA. Fonte: Própria.....	174
Figura 57:	Impressão dos panos 1-2-3-4. Fonte: Própria.....	176
Figura 58:	Impressão dos panos 5-6-7-8. Fonte: Própria.....	177
Figura 59:	Modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão biônico. Fonte: Próprio.....	178
Figura 60:	Cascas das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria.....	183
Figura 61:	Secagem das amostras das espécies frutíferas: atemoia, buriti,coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria.....	184
Figura 62:	Preparação das amostras para metalização. Fonte: Própria.....	185
Figura 63:	Metalização das amostras. Fonte: Própria.....	186
Figura 64:	Obtenção das imagens microscópicas. Fonte: Própria.....	186
Figura 65:	Imagens microscópicas da casca da atemoia. Parte externa ampliada 20x (esquerda) e parte interna ampliada 700x (direita). Fonte: Própria.....	187
Figura 66:	Imagens microscópicas da casca do buriti. Parte externa ampliada 20x (esquerda) e parte interna ampliada 12000x (direita). Fonte: Própria.....	188
Figura 67:	Imagens microscópicas da casca do coco. Camada externa: parte externa ampliada 20x (superior esquerda) e parte interna ampliada 350x (superior direita). Camada intermediária ampliada 700x (inferior esquerda). Camada interna ampliada 12000x (inferior direita). Fonte: Própria.....	189

Figura 68:	Imagens microscópicas da casca da graviola. Parte externa ampliada 43x (esquerda) e parte interna ampliada 1000x (direita). Fonte: Própria .....	190
Figura 69:	Imagens microscópicas da pinha ou fruta do conde. Parte externa ampliada 200x (esquerda) e parte interna ampliada 700x (direita). Fonte: Própria .....	190
Figura 70:	Traços da célula estrutural. Fonte: Própria.....	194
Figura 71:	Modelagem manual da célula estrutural. Fonte: Própria.....	194
Figura 72:	Modelagem digital dos protótipos das células estruturais 1-2-3 no <i>software rhinoceros 5.0</i> . Fonte: Própria .....	196
Figura 73:	Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 4 no <i>software rhinoceros 5.0,e plugin grasshopper e plugin t-spline</i> . Fonte: Própria.....	197
Figura 74:	Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 5 no <i>software rhinoceros 5.0,e plugin grasshopper e plugin t-spline</i> . Fonte: Própria.....	198
Figura 75:	Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 6 no <i>software rhinoceros 5.0,e plugin grasshopper e plugin t-spline</i> . Fonte: Própria.....	199
Figura 76:	Modelagem digital dos protótipos não torcionados das células dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria .....	200
Figura 77:	Modelagem digital dos protótipos torcionados das células das cascas dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria .....	202
Figura 78:	Modelagem digital de protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5. Fonte: Própria .....	202
Figura 79:	Fabricação por filamento fundido utilizando impressora 3D <i>reprap anet a8</i> . Fonte: Própria.....	205
Figura 80:	Protótipos da célula estrutural. Fonte: Própria .....	206
Figura 81:	Protótipos não torcionados das células das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria .....	208
Figura 82:	Protótipos torcionados das células estruturais das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria.....	209
Figura 83:	Protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5. Fonte: Própria .....	210
Figura 84:	Fabricação por processamento de luz direta em resina utilizando impressora 3D <i>moonray s</i> . Fonte: Própria .....	212
Figura 85:	Protótipo torcionado da célula estrutural 5. Fonte: Própria.....	212
Figura 86:	Definição da superfície do pavilhão. Fonte: Própria .....	218
Figura 87:	Modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão. Fonte: Própria .....	220
Figura 88:	Simulações computacionais de projeção de sombras do pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min. Fonte: Própria .....	222
Figura 89:	Simulação computacional da radiação captada pelo pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 no período das 6h00min às 18h00min. Fonte: Própria .....	223
Figura 90:	Simulação computacional da direção e intensidade dos ventos. Fonte: Própria .....	224
Figura 91:	Simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min. Fonte: Própria .....	226
Figura 92:	Simulação computacional da velocidade e pressão do vento no pavilhão – dia 21 de dezembro de 2019, direção do vento leste-oeste e velocidade do vento de 4m/s (dados extraídos do arquivo climático do INMET da cidade de Brasília no DF). Fonte: Própria .....	227
Figura 93:	Simulação computacional da velocidade e pressão do vento no pavilhão – dia 21 de dezembro de 2019, direção do vento leste-oeste e velocidade do vento de 10m/s (dados extraídos do arquivo climático do INMET da cidade de Brasília no DF). Fonte: Própria .....	228
Figura 94:	Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 4 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 4. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	230
Figura 95:	Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 5 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 5. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	231

Figura 96: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 6 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 6. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	231
Figura 97: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula buriti B e fragmentos do pavilhão modelado com célula buriti B. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	232
Figura 98: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula coco babaçu e fragmentos do pavilhão modelado com célula coco babaçu. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	233
Figura 99: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula graviola e fragmentos do pavilhão modelado com célula graviola. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria.....	234
Figura 100: Impressão da do protótipo por partes. Fonte: Própria.....	237
Figura 101: Protótipo do pavilhão construído com a célula estrutural 5 e fabricado com resina pela tecnologia de impressão 3D de processamento por luz direta. Fonte: Própria.....	237
Figura 102: Exportação para BIM utilizando a conexão <i>rhinoceros-grasshopper-archicad</i> 23. Fonte: Própria.	238
Figura 103: Estudo de superfícies dobráveis. Fonte: Própria.....	245
Figura 104: Sistema do dispositivo de deslizamento unidirecional da parte móvel da célula. Fonte: Própria....	246
Figura 105: Sistema do dispositivo de impulso para o deslizamento unidirecional da parte móvel da célula. Fonte: Própria.....	246
Figura 106: Alternativa de dispositivo giratório da parte móvel da célula. Fonte: Própria.....	247
Figura 107: Sistema do dispositivo de impulso para a rotação dos eixos para realizar a orientação da parte móvel da célula. Fonte: Própria.....	247
Figura 108: Célula responsiva com controle por potenciômetro – parte fixa e parte móvel. Fonte: Própria.....	249
Figura 109: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria.....	249
Figura 110: Esquema de montagem de potenciômetro e servo motor. Fonte: Como fazer as coisas.....	250
Figura 111: Montagem da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria.....	252
Figura 112: Gravação do programa na placa <i>arduino</i> da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria.....	252
Figura 113: Funcionamento da célula responsiva com potenciômetro. Fonte: Própria.....	253
Figura 114: Célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico – parte fixa e parte móvel. Fonte: Própria.....	254
Figura 115: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria.....	254
Figura 116: Esquema de montagem de sensores de distância ultrassônicos e servo motor. Fonte: <i>Steemit</i> .....	255
Figura 117: Montagem da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria.....	257
Figura 118: Gravação do programa na placa <i>arduino</i> da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria.....	257
Figura 119: Funcionamento da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria.....	258
Figura 120: Célula responsiva com controle por sensor de temperatura – parte fixa e parte móvel. Fonte: Própria.....	259
Figura 121: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria.....	259
Figura 122: Esquema de montagem de sensor de temperatura e servo motor. Fonte: <i>Instructables Circuits</i> .....	260
Figura 123: Montagem da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria.....	262
Figura 124: Gravação do programa na placa <i>arduino</i> da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria.....	262
Figura 125: Funcionamento da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria.....	263
Figura 126: Célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria.....	264

Figura 127: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria .....	264
Figura 128: Esquema de montagem de sensores de luminosidade e servos motores. Fonte: Própria.....	266
Figura 129: Protótipo e gravação do programa da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria .....	271
Figura 130: Protótipo da placa com carregador de energia para a célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria.....	271
Figura 131: Protótipo da célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade. Fonte: Própria .....	272
Figura 132: Funcionamento da célula responsiva autônoma com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria .....	272
Figura 133: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático. Fonte: Própria.....	275
Figura 134: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento da dilatação diferencial da lâmina de bimatéria – lâmina: papel de 75gr e alumínio para cozinha. Fonte: Própria.....	276
Figura 135: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento da dilatação diferencial da lâmina de bimatéria – lâmina: papel de 75gr e fita adesiva de alumínio. Fonte: Própria.....	277
Figura 136: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de pinus. Fonte: Própria .....	278
Figura 137: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de pinus com revestimento plástico na parte posterior. Fonte: Própria.....	278
Figura 138: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de eucalipto. Fonte: Própria .....	279
Figura 139: Fabricação dos protótipos testes de texturas para as lâminas de madeira. Fonte: Própria .....	280
Figura 140: Protótipos testes de texturas para as lâminas de madeira. Fonte: Própria .....	280
Figura 141: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva pontuda com sensor ultrassônico em superfície plana. Fonte Própria .....	283
Figura 142: Protótipo de painel com célula responsiva autônoma plana com sensores de distância ultrassônicos e de temperatura em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.....	284
Figura 143: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva autônoma com sensor de distância ultrassônico em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria .....	285
Figura 144: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva autônoma com sensor de temperatura em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria .....	285
Figura 145: Modelo da peça produzida com impressão 3D com filamento fundido de ácido polilático ou PLA. Fonte: Própria .....	293
Figura 146: Colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça. Fonte: Própria .....	295
Figura 147: Aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça. Fonte: Própria .....	296
Figura 148: Preparação do modelo da peça para conformação e colocação dos canais para aplicação do material fundido em caixa de areia. Fonte: Própria .....	297
Figura 149: Retirada da vasilha e vertido do alumínio fundido. Fonte: Própria.....	298
Figura 150: Vertido do alumínio fundido no modelo da peça. Fonte: Própria .....	299
Figura 151: Retiro da peça conformada da caixa de areia. Fonte: Própria .....	300
Figura 152: Modelos de peças de formas simples e complexas para fabricação robótica. Fonte: Própria .....	306
Figura 153: Modelagem do dispositivo de corte a fio quente para o braço robótico industrial. Fonte: Própria ..	307
Figura 154: Simulações computacionais de corte a fio quente e formação com retificadora utilizando o <i>plugin kuka prc</i> no <i>plugin grasshopper</i> no <i>rhinoceros 5.0</i> de modelos de peças de formas simples e complexa, respectivamente. Fonte: Própria .....	308
Figura 155: Simulação computacional de corte a fio quente utilizando o <i>software robodk</i> de modelo de peça de forma simples. Fonte: Própria.....	309
Figura 156: Simulação computacional de corte a fio quente utilizando o <i>software robodk</i> de modelo de peça de forma complexa. Fonte: Própria .....	309
Figura 157: Construção do dispositivo de corte a fio quente para o braço robótico industrial. Fonte: Própria ...	310

Figura 158: Transformador industrial de 220 volts/110 volts para 12 volts. Fonte: Própria .....	310
Figura 159: Teste de corte reto com controle manual de isopor com o robô <i>yaskawa motoman – hp20d a20</i> . Fonte: Própria .....	311
Figura 160: Teste de corte livre com controle manual de isopor com o robô <i>yaskawa motoman – hp20d a20</i> . Fonte: Própria .....	312
Figura 161: Corte a fio quente no braço robótico industrial de modelo de peça de forma simples. Fonte: Própria .....	313
Figura 162: Corte a fio quente no braço robótico industrial de modelo de peça de forma complexa. Fonte: Própria .....	314
Figura 163: Comparação do painel obtido com o painel projetado digitalmente. Fonte: Própria .....	315
Figura 164: Comparação da peça obtida com a peça projetada digitalmente. Fonte: Própria .....	315

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Linha do tempo do Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e no Design .....	83
Tabela 2:	Observações no Protocolo do Experimento 1 .....	144
Tabela 3:	Operacionalização da Fabricação Digital do Pavilhão Biônico .....	166
Tabela 4:	Observações no Protocolo do Experimento 2 .....	180
Tabela 5:	Observações no Protocolo do Experimento 3 .....	215
Tabela 6:	Observações no Protocolo do Experimento 4 .....	240
Tabela 7:	Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro.....	250
Tabela 8:	Programa do protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro .....	250
Tabela 9:	Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico .....	254
Tabela 10:	Programa do Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico ....	255
Tabela 11:	Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura.....	259
Tabela 12:	Programa do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura .....	260
Tabela 13:	Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade .....	264
Tabela 14:	Programa do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade.....	266
Tabela 15:	Observações no Protocolo do Experimento 5 .....	287
Tabela 16:	Observação no Protocolo do Experimento 6.....	303
Tabela 17:	Observação no Protocolo do Experimento 7.....	318
Tabela 18:	Protocolo de Projetação-Fabricação-Construção. ....	320
Tabela 19:	Possibilidades e Limitações das tecnologias digitais utilizadas nos Experimentos .....	321
Tabela 20:	Máquinas controladas por Computador nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO). ....	328
Tabela 21:	Sugestão para Pesquisas Futuras.....	331
Tabela 22:	Insumos do Experimento 1: Projetação e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1 .....	359
Tabela 23:	Insumos do Experimento 2: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido.....	361
Tabela 24:	Insumos do Experimento 3: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde.....	363
Tabela 25:	Insumos do Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa.....	365
Tabela 26:	Insumos do Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas .....	367
Tabela 27:	Insumos do Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica .....	370
Tabela 28:	Insumos do Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente .....	372
Tabela 29:	Produtos gerados nos experimentos.....	374

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>20</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>1. FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL.....</b>	<b>35</b>
<b>1.1. Biomimética .....</b>	<b>36</b>
1.1.1. Evolução da natureza como inspiração .....	36
1.1.1.1. Antiguidade.....	36
1.1.1.2. Surgimento do Termo “Biônica” .....	37
1.1.1.3. Surgimento do Termo “Biomimética” .....	38
1.1.1.4. Surgimento do Termo “Biomimicry” .....	39
1.1.2. Definição de Biomimética .....	40
1.1.2.1. Definição do Termo “Biônica” .....	40
1.1.2.2. Definição do Termo “Biomimética” .....	41
1.1.2.3. Definição do Termo “Biomimicry” .....	42
1.1.2.4. Sinônimos do termo “Biomimética” .....	43
1.1.3. Métodos de <i>Design</i> Biomiméticos .....	44
1.1.3.1. Design baseado no Problema ou “Top Down” .....	45
1.1.3.2. Design baseado na Solução “Bottom Up” .....	46
1.1.3.3. Design baseado no Problema na Arquitetura .....	47
1.1.4. Biomimética na Arquitetura.....	48
1.1.5. Biomimética nas Envoltórias das Edificações .....	50
1.1.5.1. Envoltória da Edificação, Consumo de Energia e Mudança de Papel .....	50

1.1.5.2. Envoltória Sustentável .....	51
1.1.5.3. Envoltórias Dinâmicas .....	52
1.1.6. Síntese .....	54
<b>1.2. Fabricação Digital .....</b>	<b>56</b>
1.2.1. Antecedentes .....	56
1.2.2. Definição de “Fabricação Digital” .....	57
1.2.3. Categorias dos Processos de “Fabricação Digital” .....	58
1.2.4. Síntese .....	61
<b>1.3. Arquitetura Responsiva .....</b>	<b>62</b>
1.3.1. Surgimento da frase “Arquitetura Responsiva” .....	62
1.3.2. Definição de “Arquitetura Responsiva” .....	63
1.3.3. Sistemas Responsivos .....	64
1.3.3.1. <i>Experiências de Sistemas Responsivos</i> .....	65
1.3.3.1.1. <i>Sistemas responsivos higroscópicos</i> .....	66
1.3.3.1.2. <i>Sistemas responsivos com materiais reativos</i> .....	67
1.3.3.1.4. <i>Sistemas responsivos de materiais com memória de forma</i> .....	69
1.3.3.1.5. <i>Sistemas responsivos com materiais inteligentes</i> .....	70
1.3.3.1.6. <i>Observações sobre as experiências de sistemas responsivos</i> .....	71
1.3.4. Síntese .....	71
<b>1.4. Fabricação com Robótica na Arquitetura .....</b>	<b>72</b>
1.4.1 Antecedentes .....	72
1.4.2 Programação de Robôs Industriais .....	73
1.4.3 Programação de Robôs Industriais para o Desenho Arquitetônico .....	74
1.4.4 Referentes na Fabricação com Robô Industrial na Arquitetura .....	74
1.4.5 Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e no <i>Design</i> .....	75
1.4.5.1 <i>Desenvolvimento de Ferramenta Digital Paramétrica para uso em Braço Robótico Industrial</i> .....	75
1.4.5.2 <i>Fio Quente em Braço Robótico Industrial</i> .....	76
1.4.5.3 <i>Construção de Muros com Tijolo com Braço Robótico Industrial</i> .....	77
1.4.5.4 <i>Montagem e Usinagem de Estruturas em Madeira com Braço Robótico Industrial</i> .....	77
1.4.5.5 <i>Dispositivos de Impressão 3D em Braço Robótico Industrial</i> .....	77
1.4.5.6 <i>Conformação de Superfícies de Dupla Curvatura a Frio utilizando Braço Robótico Industrial</i> .....	78
1.4.5.7 <i>Fabricação de Estruturas Leves em Concreto utilizando Braço Robótico Industrial</i> .....	79
1.4.5.8 <i>Uso da plataforma Arduino, Linguagem de Programação e Modelagem 3D com Braços Robóticos Industriais</i> .....	79
1.4.5.9 <i>Uso de Célula Robótica Móvel na Construção in situ</i> .....	80
1.4.5.10 <i>Eventos de Fabricação com Robôs na Arquitetura</i> .....	80
1.4.5.11 <i>Observações do Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e Design</i> .....	81
1.4.6 Síntese .....	82
<b>1.5. Arduino .....</b>	<b>84</b>
1.5.1 Definição de <i>Arduino</i> .....	84
1.5.2 <i>Hardware e Software</i> da Plataforma <i>Arduino</i> .....	87
1.5.3 Linguagem de Programação <i>Arduino</i> .....	88
1.5.4 Experiências do uso da Plataforma <i>Arduino</i> na Arquitetura .....	89
1.5.5 Síntese .....	92
<b>2. EXPERIMENTOS .....</b>	<b>94</b>

<b>2.1 Experimento 1: Projetação e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1</b>	<b>96</b>
2.1.1 Motivação	96
2.1.2 Hipótese	96
2.1.3 Objetivo Geral	97
2.1.3.1 <i>Objetivos específicos</i>	97
2.1.4 Protocolo	98
2.1.5 Desenvolvimento do Experimento	98
2.1.5.1 <i>Seleção e levantamento fotográfico das espécies frutíferas</i>	98
2.1.5.1.1 <i>Seleção das espécies frutíferas</i>	98
2.1.5.1.2 <i>Levantamento fotográfico das espécies frutíferas</i>	99
2.1.5.1.3 <i>Digitalização e restituição fotogramétrica das espécies frutíferas</i>	100
2.1.5.1.4 <i>Representação tridimensional do módulo e superfície</i>	101
2.1.5.1.4.1 <i>Representação tridimensional do módulo</i>	102
2.1.5.1.4.2 <i>Representação tridimensional da superfície</i>	102
2.1.5.1.4.3 <i>Observação na representação tridimensional do módulo e superfície</i>	103
2.1.5.1.5 <i>Observação na seleção e levantamento fotográfico das espécies frutíferas</i>	103
2.1.5.2 <i>Maquetes rápidas de papel para estudo das geometrias das superfícies de dupla curvatura</i>	104
2.1.5.2.1 <i>Maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura</i>	104
2.1.5.2.2 <i>Maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura</i>	105
2.1.5.2.3 <i>Maquetes rápidas de papel de módulos construídos com dobraduras de formas regulares</i>	106
2.1.5.2.3.1 <i>Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de igual tamanho</i>	106
2.1.5.2.3.2 <i>Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferente tamanho</i>	106
2.1.5.2.3.3 <i>Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferente tamanho</i>	107
2.1.5.2.3.4 <i>Observação nas maquetes rápidas de papel de módulos construídos com dobraduras de formas regulares</i>	107
2.1.5.2.4 <i>Observação nas maquetes rápidas de papel para estudo das geometrias das superfícies de dupla curvatura</i>	108
2.1.5.3 <i>Digitalização e restituição fotogramétrica das maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura</i>	109
2.1.5.3.1 <i>Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares</i>	109
2.1.5.3.2 <i>Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares</i>	110
2.1.5.3.3 <i>Observação na digitalização e restituição fotogramétrica das maquetes rápidas de papel com dobraduras regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura</i>	110
2.1.5.4 <i>Parametrização da restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares</i>	111
2.1.5.4.1 <i>Parametrização da superfície de dupla curvatura</i>	111
2.1.5.4.2 <i>Panelização da superfície de dupla curvatura</i>	112
2.1.5.4.3 <i>Parametrização do módulo</i>	112
2.1.5.4.4 <i>Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção</i>	113

2.1.5.4.5	<i>Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição</i>	114
2.1.5.4.6	<i>Geração dos protótipos do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção e adição</i>	115
2.1.5.4.6.1	<i>Protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção</i>	115
2.1.5.4.6.2	<i>Protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição</i>	116
2.1.5.4.7	<i>Observação na parametrização da restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares</i>	117
2.1.5.5	<i>Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico</i>	117
2.1.5.5.1	<i>Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por seção</i>	118
2.1.5.5.2	<i>Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por adição</i>	119
2.1.5.5.3	<i>Observação na prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico</i>	120
2.1.5.6	<i>Preparação para o processo de fabricação</i>	121
2.1.5.6.1	<i>Preparação dos arquivos</i>	121
2.1.5.6.2	<i>Seleção do material</i>	122
2.1.5.6.3	<i>Edição dos arquivos</i>	122
2.1.5.6.3.1	<i>Edição de desdobramento-transformação-organização para corte a laser</i>	123
2.1.5.6.3.2	<i>Edição da revisão das linhas para corte e as linhas para marcação e dobragem</i>	124
2.1.5.6.3.3	<i>Observação no processo de edição dos arquivos</i>	125
2.1.5.6.4	<i>Observação no processo de preparação do corte e dobragem dos módulos para fabricação</i>	126
2.1.5.7	<i>Fabricação</i>	126
2.1.5.7.1	<i>Corte a laser dos módulos</i>	127
2.1.5.7.1.1	<i>Corte a laser dos módulos por partes</i>	127
2.1.5.7.1.2	<i>Corte a laser dos módulos em peça única</i>	128
2.1.5.7.1.3	<i>Observação no corte a laser dos módulos</i>	129
2.1.5.7.2	<i>Montagem dos módulos e panos</i>	129
2.1.5.7.2.1	<i>Montagem dos módulos</i>	129
2.1.5.7.2.1.1	<i>Fechamento dos módulos</i>	130
2.1.5.7.2.1.2	<i>Reforço interno dos módulos</i>	130
2.1.5.7.2.1.3	<i>Reforço externo dos módulos</i>	131
2.1.5.7.2.1.4	<i>Observação na montagem dos módulos</i>	131
2.1.5.7.2.2	<i>Montagem dos panos</i>	132
2.1.5.7.2.2.1	<i>Organização e apresentação prévia dos módulos que conformam o pano</i>	132
2.1.5.7.2.2.2	<i>Montagem do pano</i>	133
2.1.5.7.2.2.3	<i>Apresentação do pano</i>	134
2.1.5.7.2.2.4	<i>Comparação dos panos de papelão com os panos fabricados com impressão 3D</i>	135
2.1.5.7.2.2.5	<i>Aplicação de resina nos panos</i>	136
2.1.5.7.2.2.6	<i>Emborrachado dos panos da base</i>	137
2.1.5.7.2.2.7	<i>Observação na montagem dos panos</i>	137
2.1.5.7.2.3	<i>Observação na montagem dos módulos e panos</i>	137
2.1.5.7.3	<i>Observação na fabricação</i>	138
2.1.5.8	<i>Montagem do pavilhão</i>	138
2.1.5.8.1	<i>União dos panos</i>	139
2.1.5.8.2	<i>Dispositivos de ligação</i>	139

2.1.5.8.3 Montagem .....	140
2.1.5.8.4 Comparação com modelos de tamanho reduzido.....	141
2.1.5.8.5 Observação na montagem do pavilhão .....	142
2.1.6 Síntese.....	143

## **2.2 Experimento 2: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido .....147**

2.2.1 Motivação .....	147
2.2.2 Hipótese .....	147
2.2.3 Objetivo Geral .....	148
2.2.3.1 Objetivos específicos .....	148
2.2.4 Protocolo.....	148
2.2.5 Desenvolvimento do Experimento.....	149
2.2.5.1 Código gráfico e modelo 3D do pavilhão biônico .....	149
2.2.5.1.1 Código gráfico da superfície .....	149
2.2.5.1.2 Código gráfico do módulo .....	150
2.2.5.1.3 Código gráfico da superfície do pavilhão dividido em módulos .....	151
2.2.5.1.4 Modelagem 3D do pavilhão .....	152
2.2.5.1.5 Observação no código gráfico e modelo 3D do pavilhão biônico.....	153
2.2.5.2 Operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico .....	154
2.2.5.2.1 Divisão em panos .....	154
2.2.5.2.2 Divisão dos panos em blocos para impressão .....	156
2.2.5.2.2.1 Pano 1 dividido em blocos .....	156
2.2.5.2.2.2 Pano 2 dividido em blocos .....	157
2.2.5.2.2.3 Pano 3 dividido em blocos .....	158
2.2.5.2.2.4 Pano 4 dividido em blocos .....	159
2.2.5.2.2.5 Pano 5 dividido em blocos .....	161
2.2.5.2.2.6 Pano 6 dividido em blocos .....	162
2.2.5.2.2.7 Pano 7 dividido em blocos .....	163
2.2.5.2.2.8 Pano 8 dividido em blocos .....	165
2.2.5.2.2.9 Observação na divisão dos panos em blocos para impressão.....	166
2.2.5.2.3 Observação na operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico .....	166
2.2.5.3 Seleção de tecnologia de fabricação digital por adição.....	168
2.2.5.3.1 Tecnologia de fabricação por fundição de pó - 3DP.....	168
2.2.5.3.1.1 Impressora ZPrinter 310 .....	168
2.2.5.3.1.1.1 Pó ZCast 500 .....	169
2.2.5.3.1.1.2 Pó de gesso-maltodextrina-açúcar.....	170
2.2.5.3.1.2 Observação na tecnologia de fabricação por fundição de pó - 3DP.....	171
2.2.5.3.2 Tecnologia de fabricação por filamento fundido - FFF .....	171
2.2.5.3.2.1 Filamento de acrilonitrila butadieno estireno em impressora reprop uberblock .....	172
2.2.5.3.2.2 Filamento de ácido poliláctico em impressora reprop anet a8 .....	173
2.2.5.3.2.3 Observação na tecnologia de fabricação por filamento fundido - FFF.....	174
2.2.5.3.3 Observação na seleção da tecnologia de fabricação digital por adição .....	175
2.2.5.4 Fabricação digital por adição.....	175
2.2.5.4.1 Impressão dos panos 1-2-3-4 .....	176
2.2.5.4.2 Impressão dos panos 5-6-7-8 .....	176
2.2.5.4.3 Montagem do modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão biônico .....	177
2.2.5.4.4 Observação na fabricação digital por adição.....	178
2.2.6 Síntese.....	179

<b>2.3 Experimento 3: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde.....</b>	<b>181</b>
2.3.1 Motivação .....	181
2.3.2 Hipótese .....	181
2.3.3 Objetivo Geral .....	182
2.3.3.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	182
2.3.4 Protocolo.....	182
2.3.5 Desenvolvimento do Experimento.....	183
2.3.5.1 <i>Determinação das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e, pinha ou fruta do conde</i> .....	183
2.3.5.1.1 <i>Seleção das cascas dos frutos das espécies frutíferas</i> .....	183
2.3.5.1.2 <i>Secagem das amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas</i> .....	184
2.3.5.1.3 <i>Análise das amostras das cascas dos frutos no microscópio</i> .....	184
2.3.5.1.3.1 <i>Preparação das amostras para metalização</i> .....	185
2.3.5.1.3.2 <i>Metalização</i> .....	185
2.3.5.1.3.3 <i>Imagens microscópicas</i> .....	186
2.3.5.1.3.3.1 <i>Imagens microscópicas da casca da atemoia</i> .....	187
2.3.5.1.3.3.2 <i>Imagens microscópicas da casca do buriti</i> .....	187
2.3.5.1.3.3.3 <i>Imagens microscópicas da casca do coco babaçu</i> .....	188
2.3.5.1.3.3.4 <i>Imagens microscópicas da casca da graviola</i> .....	189
2.3.5.1.3.3.5 <i>Imagens microscópicas da casca da pinha ou fruta do conde</i> .....	190
2.3.5.1.3.3.6 <i>Observação nas Imagens microscópicas</i> .....	191
2.3.5.1.4 <i>Observação na determinação das características estruturais das cascas das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde</i> .....	192
2.3.5.2 <i>Determinação da Forma da célula estrutural a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde</i> .....	193
2.3.5.2.1 <i>Traços da célula estrutural</i> .....	193
2.3.5.2.2 <i>Modelagem manual da célula estrutural</i> .....	194
2.3.5.2.3 <i>Modelagem 3D digital da célula estrutural</i> .....	195
2.3.5.2.3.1 <i>Modelagem utilizando o software rhinoceros 5.0</i> .....	195
2.3.5.2.3.2 <i>Modelagem utilizando o software rhinoceros 5.0, plugin grasshopper e plugin t-spline</i> ..	196
2.3.5.2.3.3 <i>Modelagem digital dos protótipos não torcidos das células dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde</i> .....	199
2.3.5.2.3.4 <i>Modelagem digital dos protótipos torcidos das células estruturais das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde</i> .....	201
2.3.5.2.3.5 <i>Modelagem digital de protótipo de painel torcido desmontável da célula estrutural 5</i> .....	202
2.3.5.2.3.6 <i>Observação na modelagem 3D da célula estrutural</i> .....	203
2.3.5.2.4 <i>Observação na determinação da Forma da célula a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde</i> .....	204
2.3.5.3 <i>Escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural</i> ....	204
2.3.5.3.1 <i>Fabricação digital por adição utilizando fabricação por filamento fundido</i> .....	205
2.3.5.3.1.1 <i>Equipamento e filamento utilizados</i> .....	205
2.3.5.3.1.2 <i>Protótipos da célula estrutural</i> .....	206
2.3.5.3.1.3 <i>Protótipos não torcidos das células</i> .....	207
2.3.5.3.1.4 <i>Protótipos torcidos das células</i> .....	209

2.3.5.3.1.5 Protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5 .....	210
2.3.5.3.1.6 Observação na fabricação digital por adição utilizando fabricação por filamento fundido .....	210
2.3.5.3.2 Fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina .....	211
2.3.5.3.2.1 Equipamento e resina utilizados.....	211
2.3.5.3.2.2 Protótipo torcionado de painel da célula estrutural 5.....	212
2.3.5.3.2.3 Observação na fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina.....	213
2.3.5.3.3 Observação na escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural.....	213
2.3.6 Síntese.....	214
<b>2.4 Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa .....</b>	<b>216</b>
2.4.1 Motivação .....	216
2.4.2 Hipótese .....	216
2.4.3 Objetivo Geral .....	216
2.4.3.1 Objetivos específicos .....	217
2.4.4 Protocolo.....	217
2.4.5 Desenvolvimento do Experimento.....	218
2.4.5.1 Definição da superfície do pavilhão .....	218
2.4.5.2 Modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão .....	219
2.4.5.3 Simulações computacionais .....	221
2.4.5.3.1 Simulação computacional de projeção de sombras do pavilhão .....	221
2.4.5.3.2 Simulação computacional de radiação no pavilhão.....	222
2.4.5.3.3 Simulação computacional de ventos no pavilhão .....	223
2.4.5.3.4 Simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão .....	224
2.4.5.3.5 Simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão .....	226
2.4.5.3.5.1 Simulação do pavilhão utilizando um modelo simples.....	227
2.4.5.3.5.1.1 Observação na simulação do pavilhão utilizando um modelo simples .....	229
2.4.5.3.5.2 Simulação de fragmento do pavilhão modelado com a célula.....	229
2.4.5.3.5.2.1 Observações na simulação de fragmento do pavilhão modelado com a célula .....	234
2.4.5.3.5.3 Observações nas simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão .....	235
2.4.5.3.6 Observações nas simulações computacionais.....	235
2.4.5.4 Prototipagem .....	236
2.4.5.5 Exportação para BIM .....	238
2.4.6 Síntese.....	239
<b>2.5 Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas .....</b>	<b>242</b>
2.5.1 Motivação .....	242
2.5.2 Hipótese .....	242
2.5.3 Objetivo Geral .....	242
2.5.3.1 Objetivos específicos .....	243
2.5.4 Processo Metodológico.....	243
2.5.5 Desenvolvimento do Experimento.....	244
2.5.5.1 Estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células .....	244
2.5.5.1.1 Estudo de superfícies dobráveis .....	244
2.5.5.1.2 Estudo de dispositivo de acionamento mecânico unidirecional .....	246
2.5.5.1.3 Estudo de dispositivo de acionamento mecânico giratório .....	246

2.5.5.1.4	<i>Observação nos estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células</i>	247
2.5.5.2	<i>Experimentações e prototipagem das células responsivas</i>	248
2.5.5.2.1	<i>Protótipos de células responsivas com robótica</i>	248
2.5.5.2.1.1	<i>Protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro</i>	249
2.5.5.2.1.2	<i>Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico</i>	253
2.5.5.2.1.3	<i>Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura</i>	258
2.5.5.2.1.4	<i>Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade</i>	263
2.5.5.2.1.5	<i>Observação nos protótipos de células responsivas com robótica</i>	273
2.5.5.2.2	<i>Protótipos de células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material</i>	273
2.5.5.2.2.1	<i>Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático</i>	274
2.5.5.2.2.2	<i>Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial dos materiais</i>	275
2.5.5.2.2.3	<i>Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico</i>	277
2.5.5.2.2.3.1	<i>Estudo de texturas para o protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico</i>	279
2.5.5.2.2.4	<i>Observação nos protótipos de células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material</i>	281
2.5.5.2.3	<i>Observação nas experimentações e prototipagem das células responsivas</i>	282
2.5.5.3	<i>Prototipagem de painéis com células responsivas</i>	282
2.5.5.3.1	<i>Protótipo de painel com célula responsiva pontuda com acionamento por sensor ultrassônico em superfície plana</i>	283
2.5.5.3.2	<i>Protótipo de painel com célula responsiva plana com acionamento por sensores de distância ultrassônicos e de temperatura em superfície de dupla curvatura</i>	284
2.5.5.3.3	<i>Observação na prototipagem de painéis com células responsivas</i>	286
2.5.6	<i>Síntese</i>	286
<b>2.6.</b>	<b>Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica</b>	<b>291</b>
2.6.1	<i>Motivação</i>	291
2.6.2	<i>Hipótese</i>	291
2.6.3	<i>Objetivo geral</i>	291
2.6.3.1	<i>Objetivos específicos</i>	292
2.6.4	<i>Protocolo</i>	292
2.6.5	<i>Desenvolvimento do Experimento</i>	293
2.6.5.1	<i>Preparação do modelo da peça</i>	293
2.6.5.2	<i>Estudo da colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça</i>	294
2.6.5.3	<i>Aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça</i>	295
2.6.5.4	<i>Montagem do modelo da peça e dos canais para aplicação do material fundido em caixa de areia</i>	296
2.6.5.5	<i>Aplicação do material fundido no modelo da peça</i>	298
2.6.5.6	<i>Retiro da peça conformada da caixa de areia</i>	299
2.6.5.7	<i>Observação na fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de peça biônica</i>	301
2.6.6	<i>Síntese</i>	302
<b>2.7</b>	<b>Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente</b>	<b>304</b>
2.7.1	<i>Motivação</i>	304
2.7.2	<i>Hipótese</i>	304
2.7.3	<i>Objetivo geral</i>	304

2.7.3.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	305
2.7.4 Protocolo.....	305
2.7.5 Desenvolvimento do Experimento.....	306
2.7.5.1 <i>Preparação dos modelos da peça</i> .....	306
2.7.5.2 <i>Simulação da aplicação robótica</i> .....	307
2.7.5.3 <i>Construção do dispositivo de corte a fio quente para braço robótico industrial</i> .....	310
2.7.5.4 <i>Testes de corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em bloco de isopor</i> .....	311
2.7.5.5 <i>Testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa em isopor</i> .....	312
2.7.5.6 <i>Resultados dos cortes</i> .....	314
2.7.5.7 <i>Observação na fabricação robótica de peça com corte a fio quente</i> .....	316
2.7.6 Síntese.....	317
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>320</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>330</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>338</b>
<b>FONTES CONSULTADAS.....</b>	<b>351</b>
<b>APÊNDICE I – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 1 .....</b>	<b>359</b>
<b>APÊNDICE II – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 2.....</b>	<b>361</b>
<b>APÊNDICE III – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 3 .....</b>	<b>363</b>
<b>APÊNDICE IV – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 4 .....</b>	<b>365</b>
<b>APÊNDICE V – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 5.....</b>	<b>367</b>
<b>APÊNDICE VI – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 6 .....</b>	<b>370</b>
<b>APÊNDICE VII – TABELA DE INSUMOS DO EXPERIMENTO 7.....</b>	<b>372</b>
<b>APÊNDICE VIII – PRODUTOS GERADOS NOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>374</b>

## INTRODUÇÃO

A biomimética na arquitetura desde tempos remotos tem procurado por inspiração na natureza para o desenvolvimento de projetos de edifícios, bairros e comunidades. Nos edifícios, a envoltória tornou-se um tema de preocupação de *design* devido ao papel de filtro das condições ambientais exteriores e os requerimentos funcionais dos usuários no espaço interior e, do alto consumo de energia. Nesse sentido, os arquitetos tem procurado desenvolver *desings* de envoltórias procurando eficiência energética. utilizando menos material por meio da projeção de sistemas complexos automatizados (sistemas ativos) ou sistemas de materiais com memória de forma (sistemas passivos).

Com o surgimento da fabricação digital, desde o ano de 1960 tem se procurado fabricar objetos com materiais customizados por meio do controle numérico por computador ou pela preparação de arquivo digital para fábrica. Nesse sentido, os processos de fabricação foram classificados em 4 categorias: o processo de fabricação por corte ou fabricação 2D, o processo de fabricação por subtração, o processo de fabricação por adição e, o processo de fabricação por conformação.

Com o surgimento da arquitetura responsiva ou arquitetura dinâmica, desde o ano de 1975 tem se procurado desenvolver projetos de sistemas com mudança física e autônoma por meio de dispositivos computacionais, eletromecânicos ou naturais. Nesse sentido, arquitetos e *designers* têm procurado desenvolver *desings* de envoltórias procurando aproveitar a propriedade higroscópica da madeira, a mudança de forma e tamanho dos materiais pelos estímulos ambientais, o controle de dispositivos eletromecânicos analogicamente pelos estímulos de temperatura ou luz natural e, a memória de forma dos materiais.

Com o surgimento da fabricação com robótica na arquitetura, desde o ano de 1980 tem se procurado automatizar algumas atividades no setor da construção. Nesse sentido, arquitetos e *designers* têm experimentado o uso do braço robótico industrial no corte com fio quente, na

montagem de muros com tijolo, na construção de estruturas de madeira, na impressão 3D e, na fabricação de estruturas leves de concreto.

Com o surgimento da plataforma de prototipagem eletrônica arduino, desde a segunda década do século XXI tem se procurado produzir dispositivos controlados manualmente, por computador e responsivos autônomos. Nesse sentido, os arquitetos e *digners* têm experimentado a plataforma arduino no desenvolvimento de fachadas das edificações com sistemas paramétricos, sistemas cinéticos, sistemas interativos e sistemas de construção inteligente ou biodinâmicos.

Em tal contexto, nesta tese, a problemática da pesquisa foi:

É possível estabelecer um conjunto de técnicas digitais e robóticas que viabilizem a projeção, fabricação e construção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa, celular e responsiva em Brasília, DF?

A hipótese guia da pesquisa foi:

Acredita-se que um conjunto de técnicas digitais e robóticas podem viabilizar a projeção, fabricação e construção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa, celular e responsiva em Brasília, DF.

O objetivo geral foi:

Determinar as possibilidades e limitações da projeção e fabricação com tecnologias digitais e robóticas de uma estrutura biomimética de forma complexa celular e responsiva em Brasília, DF.

E, os objetivos específicos foram

- Estabelecer um referencial teórico sobre a Biomimética e sua relação com o campo da Arquitetura;
- Estabelecer um referencial teórico sobre a Fabricação Digital e seus Processos de Fabricação;
- Estabelecer um referencial teórico sobre a Arquitetura Responsiva, antecedentes e experiências desenvolvidas;

- Estabelecer um referencial teórico sobre a Fabricação com Robótica no campo da Arquitetura;
- Estabelecer um referencial teórico sobre a Plataforma Arduino no campo da Arquitetura;
- Determinar as possibilidades e limitações do processo de projeção, fabricação e construção com técnicas digitais e manuais de um protótipo de pavilhão biônico de forma complexa e celular, com faces de dupla curvatura, na escala 1:1 nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).
- Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de pavilhão biônico de geometrias não euclidianas em tamanho reduzido inspirado nas formas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).
- Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo da célula estrutural inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).
- Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de pavilhão biônico de geometrias não euclidianas em tamanho reduzido nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).
- Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de painel de células responsivas inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).
- Determinar as possibilidades e limitações da fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de um protótipo de peça biônica inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas presentes na cidade de Brasília (DF).
- Determinar as possibilidades e limitações da fabricação digital por adição e por corte a fio quente em braço robótico industrial de um protótipo de peça biônica inspirada nas

estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas presentes na cidade de Brasília (DF).

O processo metodológico foi operacionalizado em 2 etapas:

- Fundamentação Conceitual;
- Experimentos.

A etapa da fundamentação conceitual consistiu na revisão dos 5 temas interrelacionados na pesquisa:

- Biomimética;
- Fabricação Digital;
- Arquitetura Responsiva;
- Fabricação com Robótica na Arquitetura;
- Arduino.

A etapa dos experimentos consistiu de 7 experimentações práticas:

- Experimento 1: Projeto e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1;
- Experimento 2: Projeto Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido;
- Experimento 3: Projeto Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde;
- Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa;
- Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas;
- Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica;
- Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente.

Onde, a principal conclusão foi:

Um conjunto de técnicas digitais e robóticas podem viabilizar a projeção, fabricação e construção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa, celular e responsiva em Brasília, DF.

E, a principal consideração final foi que:

A tecnologia de impressão 3D para grandes formatos com processamento de luz direta em resina ou liga metálica se apresenta como a mais promissora alternativa para a fabricação do protótipo do pavilhão na escala 1:1.

## 1. FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

Esta primeira etapa teve por objetivo estabelecer um marco de referencial teórico para a fundamentação conceitual e para a formulação de um conjunto de experimentos para verificar a hipótese guia da pesquisa de doutoramento.

Em tal objetivo, a fundamentação conceitual foi estruturada a partir da revisão da literatura especializada sobre os 5 temas inter-relacionados nesta pesquisa, os quais são listados a seguir:

- Biomimética;
- Fabricação Digital;
- Arquitetura Responsiva;
- Fabricação com Robótica na Arquitetura e;
- Arduino.

Onde, a revisão dos temas foi operacionalizada basicamente em 4 aspectos:

- Surgimento do conceito;
- Definição do conceito;
- Relação como o campo da arquitetura e;
- Síntese do referencial teórico.

Tal como é apresentado a seguir:

## 1.1. Biomimética

Este tópico tem por objetivo estabelecer um referencial sobre a Biomimética e sua relação com a Arquitetura. Nesse objetivo, aqui são revisadas questões como a evolução do uso da natureza como inspiração, definição de biomimética, métodos de design biomimético, biomimética na arquitetura e Biomimética nas Envoltórias das Edificações.

### 1.1.1. Evolução da natureza como inspiração

Os autores assinalam que a humanidade observou a natureza para tomá-la como inspiração, para resolver problemas de design, desde tempos remotos. Na antiguidade, a humanidade observou os organismos da natureza para desenvolver sistemas de proporção de beleza clássica; no século XV, a humanidade observou a natureza procurando inspiração para desenvolver máquinas e outros artefatos para satisfazer as necessidades da comunidade; no século XIX, a humanidade observou a natureza para inspirar projetos de sistemas estruturais para infraestrutura e; no século XX, a humanidade observou a natureza para solucionar problemas de design de diferentes áreas do conhecimento sob a perspectiva dos termos “biônica”, “biomimética” e “*biomimicry*”.

#### 1.1.1.1. Antiguidade

Os autores apontam que a natureza foi tomada como inspiração para solucionar os problemas de design desde tempos remotos. Filósofos gregos, arquitetos romanos, inventores italianos e engenheiros franceses têm tomado a natureza como inspiração para sistemas de proporção de beleza, máquinas e artefatos e, sistemas estruturais para infraestrutura.

Filósofos gregos e arquitetos romanos da antiguidade se inspiraram nos organismos da natureza para desenvolver sistemas de proporção de beleza. Radwan e Osama (2016, p.179)

assinalaram que, no século V A.C., os filósofos gregos observaram os organismos naturais para estabelecer uma proporção de beleza clássica entre as partes de um design. Mazzoleni (2013, p.8) assinalou que o arquiteto romano Marco Vitruvius Polião, no século I A.C., estabeleceu relações de proporção entre o corpo humano e as formas geométricas puras, quadrado e círculo.

Inventores no século XV tomaram como inspiração organismos da natureza para desenvolver diferentes máquinas. Salim, Mydin e Ulang (2014, p.1); Mazzoleni (2013, p.8) e Santos (2009, p.32) assinalaram que, o polímata, italiano, Leonardo da Vinci, no século XV, se inspirou no voo dos pássaros para desenvolver sua máquina de voar.

Engenheiros no século XIX inspiraram seus projetos de sistemas estruturais na anatomia do corpo humano. Santos (2009, p.32) assinalou que, o engenheiro francês, Alexandre Gustave Eiffel se inspirou na anatomia do fêmur humano para projetar a Torre Eiffel no ano de 1889.

Assim, sendo que a natureza foi tomada como inspiração desde o século V A.C. para sistemas de proporção de beleza, que os organismos da natureza têm sido tomados como inspiração desde o século XV para o desenvolvimento de máquinas e diferentes artefatos; que a natureza foi tomada como inspiração desde o século XIX para o desenvolvimento de sistemas estruturais para a construção de infraestrutura; em tal situação, nesta tese, será adotada a premissa de que a natureza tem sido tomada como inspiração para solucionar problemas de design desde tempos remotos em diferentes áreas do conhecimento humano.

#### *1.1.1.2. Surgimento do Termo “Biônica”*

A maioria dos autores aponta, ao engenheiro estadunidense, Jack Ellwood Steele como quem formulou o termo “biônica” e, que não há consenso sobre quando o termo foi utilizado pela primeira vez.

Os autores, na sua maioria, apresentam consenso sobre quem formulou o termo “biônica” mas salientam que teve outro termo que foi usado duas décadas antes no mesmo sentido. Soares et al. (2016, p.1078), Pohl e Nachtigall (2015, p.1), Nachtigall e Pohl (2013, p.1), Gruber (2011, p.14, citada por ÖZTOPRAK, 2018, p.20), Nachtigall (citado por GRUBER, 2011, p.13),

Acar (2011, p.9), Mahmoud (2010, p.1), Tübingen (2008, p.24) e Vincent (2006, p.471) apontaram que o termo “biônica” foi acunhado por Jack Ellwood Steele. Gießler (citado por TÜBINGEN, 2008, p.24) usou o termo “*biotechnik*” no mesmo sentido que o termo “biônica” no ano de 1939.

Os autores não apresentam consenso sobre o ano em que foi acunhado o termo “biônica”. Soares et al. (2016, p.1078) assinalaram que o termo foi utilizado pela primeira vez no ano de 1958. Tübingen (2008, p.24) assinalou que o termo foi utilizado no ano de 1959. Vincent (2006, p.471) assinalou que o termo foi utilizado no ano de 1960.

Assim, sendo que a maioria de autores aponta que Jack Ellwood Steele formulou o termo “biônica” e que os autores não concordam sobre o ano da aparição do termo “biônica”; em tal situação, nesta tese, será adotado que o termo “biônica” vem da biologia e tecnologia e foi acunhado por Jack Ellwood Steele em meados da década de 1950.

#### *1.1.1.3. Surgimento do Termo “Biomimética”*

Os autores apontam que o termo “biomimética” foi acunhado por Otto Schmitt, engenheiro e biofísico estadunidense, mas não apresentam consenso sobre o ano em que o termo foi acunhado.

A maioria dos autores concorda em que Otto Schmitt formulou o termo “biomimética”. Öztoprak (2018, p.20), Harkness (2002, citado por KENNEDY, 2016, p.2), Andrade (2014, p.25) Mazzoleni (2013, p.xix), Gruber (2011, p.140), Chung (2011, p.14), Acar (2011, p.9) e Vincent et al. (2006, p.471) apontaram que o termo “biomimética” foi acunhado por Otto Schmitt, engenheiro e biofísico estadunidense.

Os autores não apresentam consenso sobre o ano em que foi acunhado o termo “biomimética”. Panchuk (2006, p.5) e Öztoprak (2018, p.20) assinalaram que o termo foi acunhado na década de 1950. Vincent et al. (2006, p.471) e Andrade (2014, p.25) assinalaram que o termo foi acunhado no ano de 1957 e Andrade (2014, p.25) salientou que o termo foi acunhado na pesquisa de doutorado de Otto Schmitt na qual, segundo Vincent et al. (2006, p.471), Otto tentou desenvolver um dispositivo que imitasse a ação elétrica de um nervo

humano. Harkness (2002, citado por KENNEDY, 2016, p.2) assinalou que o termo foi acunhado na década de 1960. Mazzoleni (2013, p.xix) assinalou que o termo foi utilizado desde a década de 1960, Redolfi e Khoshtinat (2016, p.4) assinalaram que o termo foi utilizado na literatura científica desde o ano de 1962. Andrade (2014, p.25) assinalou que o termo foi acunhado no ano de 1969.

Assim, sendo que a maioria dos autores aponta que o termo “biomimética” foi acunhado por Otto Schmitt, que os autores não concordam no ano em que foi acunhado o termo “biomimética”; em tal situação, nesta tese, o termo “biomimética” será entendido como acunhado por, Otto Schmitt no ano de 1957, na sua Tese de doutoramento.

#### *1.1.1.4. Surgimento do Termo “Biomimicry”*

Os autores assinalam que o termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” e “biomimética” e não apresentam consenso sobre a época em que apareceu o esse termo.

Os autores assinalam que o termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” e “biomimética”. Pawlyn (2016, p.2) assinalou que o termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” – acunhado por Jack Ellwood Steele - e “biomimética” - acunhado por Otto Schmitt.

Os autores não apresentam consenso sobre quando apareceu o termo “*biomimicry*”. Pawlyn (2016, p.2) e Nessim (2016, p.12) assinalaram que o termo “*biomimicry*” apareceu na literatura científica na década de 1962 e se expandiu principalmente na ciência dos materiais desde a década de 1980. Dash (2018, p.645) assinalou que o termo apareceu na literatura científica na década de 1980. Arruda (2013, p.2), El Ahmar (2011, p.18), Santos (2009, p.30) e Panchuk (2006, p.3) assinalaram que o termo apareceu no ano de 1997. El Ahmar (2011, p.18), Santos (2009, p.30) e Panchuk (2006, p.3) assinalaram que o termo “*biomimicry*” apareceu com a publicação intitulada “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*” da professora em ciências ambientais estadunidense, Janine Benyus,

Assim, sendo que os autores assinalam que o termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” e “biomimética”, que os autores não apresentam consenso sobre quando apareceu o

termo “*biomimicry*”; em tal situação, nesta tese, será adotado que o termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” e “biomimética” e, concordando com El Ahmar (2011, p.18), Santos (2009, p.30) e Panchuk (2006, p.3), o termo “*biomimicry*” apareceu no ano de 1997 com a publicação intitulada “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*” de Janine Benyus.

### 1.1.2. Definição de Biomimética

#### 1.1.2.1. Definição do Termo “Biônica”

Os autores assinalam que o termo “biônica” vem das palavras biologia e técnica e é definido como a análise das formas da natureza para transferi-las para a tecnologia.

Os autores indicam que o termo “biônica” vem das palavras biologia e técnica. Nachtigall (citado por GRUBER, 2011, p.13) assinalou que no idioma inglês o termo vem da combinação das palavras “*biology*”, “*technics*” or “*electronics*” e, Tübingen (2008, p.24) assinalou que no idioma alemão o termo “*bionik*” deriva das três primeiras letras e três últimas letras das palavras “*biologie*” e “*technik*”.

Os autores assinalam que o termo “biônica” é definido como a análise das formas da natureza para transferi-las para a tecnologia. Jack Ellwood Stelee (citado por SOARES et. Al., 2016, p.1078) definiu o termo “biônica” como a análise das formas pelas quais os sistemas vivos atuam e têm descoberto os artifícios da natureza. Gießler (citado por TÜBINGEN, 2008, p.24) assinalou que a “*biotechnik*” é a transferência da biologia para a tecnologia.

Assim, sendo que os autores indicam que o termo “biônica” vem das palavras biologia e técnica e, que os autores definem o termo como a análise das formas da natureza para transferi-las para a tecnologia; em tal situação, nesta tese, será adotado que o termo “biônica” é o estudo das formas da natureza para transferi-las para a tecnologia.

### 1.1.2.2. Definição do Termo “Biomimética”

Os autores indicam que o termo “biomimética” vem das palavras gregas, “*bios*” e “*mimesis*” e a definem como a ciência emergente que estuda as formas, processos e ecossistemas para replicá-los para solucionar um problema humano de design.

Alguns autores assinalam que o termo “biomimética” vem das palavras gregas, “*bios*” e “*mimesis*”. Badarnah (2017, p.5), Cohen e Reich (2016, p.3), Arruda (2013, p.2), Rangel et al. (2012, p. 1), Chung (2011, p.14), Santos (2010, p.146) e Lenau (2009, p.1) assinalaram que o termo “biomimética” vem de duas palavras gregas, “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação”.

Otto Schmitt assinalou que a “biomimética” estuda a natureza para replicar suas soluções. Otto Schmitt (citado por ANDRADE, 2014, p.25) (citado por ÖZTOPRAK, 2018, p.20), definiu o termo “biomimética” como a ciência que estuda e replica os métodos, projetos e processos da natureza.

Alguns autores assinalam que a “biomimética” observa a natureza para imitar suas soluções. Badarnah (2017, p.5), Cohen e Reich (2016, p.3), Rangel et al. (2012, p. 1), Detanico e Teixeira e Silva (2010, p.105), Selçuk (2009, p.9), Santos (2009, p.20), Llorens (2008, citado por ROSSI, 2009, p. 11)

Assim, sendo que alguns autores assinalam que o termo “biomimética” vem das palavras gregas, “*bios*” e “*mimesis*”, que Otto Schmitt definiu a “biomimética” como o estudo da natureza para replicar suas soluções, que alguns autores assinalaram que a “biomimética” observa a natureza para imitar as soluções; em tal situação, nesta tese, será adotado que o termo “biomimética” vem das palavras gregas, “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e, concordando com Otto Schmitt (citado por ANDRADE, 2014, p.25) (citado por ÖZTOPRAK, 2018, p.20), se define como a ciência que estuda e replica os métodos, projetos e processos da natureza.

### 1.1.2.3. Definição do Termo “Biomimicry”

Os autores apontam como referência da definição e princípios da “*biomimicry*” à professora de ciências naturais estadunidense, Janine Benyus. A autora assinala que o termo vem das palavras gregas “*bios*” e “*mimesis*” e é definido como a imitação consciente da natureza sob a perspectiva de tomar ela como modelo, medida e mentora.

Janine Benyus assinalou que o termo “*biomimicry*” vem das palavras gregas “*bios*” e “*mimesis*” e, o definiu a como a emulação consciente da natureza e apontou que ela deve ser tomada como modelo, medida e mentora. Janine Benyus (1997, p.7) assinalou que o termo “*biomimicry*” vem das palavras gregas: “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e salienta que a natureza tem que ser vista como: modelo, medida e mentora. Modelo porque estuda os designs e processos da natureza para utilizá-los como inspiração na solução de problemas humanos. Medida porque usa o padrão ecológico para julgar o acerto das inovações - depois de 3.8 bilhões de anos a natureza tem aprendido o que funciona, o que é apropriado e o que dura. Mentora porque é uma nova forma de ver a natureza, onde a natureza é observada para aprender e não para só extrair recursos dela. Janine Benyus define a “*biomimicry*” como a emulação consciente do gênio da vida.

A maioria dos autores referencia Janine Benyus e citam a definição e princípios apontados por ela e, enfatizam que o objetivo da “*biomimicry*” é tornar o planeta sustentável. Dash (2018, p.645), López et al. (2017, p.695), Fecheryr-Lippens e Bhiwapurkar (2017, p.360), Al-Obaidi, et al. (2017, p.1473), Radwan e Osama (2016, p.179), Redolfi e Khoshtinat (2016, p.7), Pawlyn (2016, p.2), Nessim (2016, p.12), Maglic (2012, p.22), Yowell (2011, p.13), Santos (2010, p.146), Detanico e Teixeira e Silva (2010, p.105), Mahmoud (2010, p.1) e, Panchuk (2006, p.3) assinalam que o termo “*biomimicry*” etimologicamente vem das palavras gregas “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e, sua definição é a emulação da natureza para resolver problemas de design humano a partir de toma-la como: modelo, medida e mentora.

Outros autores citam a definição e princípios apontados por Janine Benyus, mas não enfatizam o objetivo sustentável da “*biomimicry*”. Klein (2009, citado por FAMHY, 2018, p.882), Julian Vincent (citada por LÓPEZ et al., 2017, p.695), Kshirsagar e Malani e Tiware (2017, p.162), Pawlyn (2011, citado por NESSIM, 2016, p.12), Julian Vincent (citado por

NESSIM, 2016, p.12), Julian Vincent (citado por PAWLYN, 2016, p.2), Singh e Nayyar (2015, p.96), Rao (2014, p.1) e Royall (2010, p.4) assinalam que o termo “*biomimicry*” vem das palavras gregas “*bios*” e “*mimesis*” e a definem como uma ciência emergente que estuda as formas, processos e ecossistemas da natureza para usá-los como inspiração na solução de problemas humanos de design.

Assim, sendo que Janine Benyus assinalou que “*biomimicry*” vem das palavras gregas “*bios*” e “*mimesis*” e se define como imitação consciente da natureza, que a maioria dos autores referencia Janine Benyus e; em tal situação, nesta tese, será adotado que em concordância com Janine Benyus, o termo “*biomimicry*” vem das palavras gregas “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e se define como a imitação consciente da natureza em procura de tornar sustentável o planeta.

#### 1.1.2.4. Sinônimos do termo “*Biomimética*”

Os autores não concordam em que os termos “*bionica*”, “*biomimética*” e “*biomimicry*” são sinônimos. Alguns autores assinalam que todos os termos que referem à imitação da natureza são sinônimos entanto que outros autores assinalam que não são sinônimos e que se referem a diferentes objetivos.

Alguns autores assinalam que os termos “*biônica*”, “*biomimética*”, “*biomimicry*” e outros relacionados com tomar a natureza como inspiração são sinônimos. Pawlyn (2016, p.2) assinala que os termos “*biomimicry*” e “*biomimética*” são sinônimos. Mahmoud (2010, p.1) assinalou que os termos, “*biomimicry*”, “*biomimética*”, “*biônica*”, “*bio-inspiração*” e “*biognosis*”, se referem à mesma ciência. Lenau (2009, p.1) assinalou que os termos “*biomimética*” e “*biônica*” se referem a uma disciplina de criação de novos objetos com inspiração na natureza. E, Vincent et al. (2006, p.471) assinalaram que são sinônimos as palavras “*biomimética*”, “*biomimesis*”, “*biomimicry*”, “*biônica*”, “*biognosis*”, “*biologically inspired design*” e outras palavras e frases que impliquem a copia ou adaptação ou derivação da biologia.

Outros autores assinalam que os termos “bionica”, “biomimética” e “*biomimicry*” não são sinónimos devido a que tem objetivos diferentes. Cohen e Reich (2016, p.6) assinalaram que os termos “*biomimicry*”, “biomimética” e “biônica” representam diferentes pontos de desenvolvimento e tem surgido em diferentes épocas. O termo “biônica” inclui algumas funções ou características dos sistemas naturais. O termo “biomimética” é o estudo de formações, estruturas ou funções de substancias e materiais como mecanismos e processos biológicos. E, o termo “*biomimicry*” é o estudo dos modelos da natureza tomá-los como inspiração para resolver problemas de design humano.

Chung (2011, p.13) assinalou que a “biomimética” e “*biomimicry*” tem objetivos claramente diferentes. A “*biomimicry*” estuda processos ou ecossistemas inteiros como uma base para o design e seus princípios são ver natureza como modelo, medida e mentora, enquanto que, a “biomimética” estuda as estruturas e funções dos sistemas biológicos como modelos para o design e engenharia de materiais e máquinas e, geralmente aborda os métodos de fabricação da natureza, imitação de mecanismos da natureza e, princípios de organização da natureza.

Assim, sendo que alguns autores assinalam que os termos “biônica”, “biomimética”, “*biomimicry*” e outros que se referem à imitação da natureza são sinónimos, que outros autores assinalam que os termos “bionica”, “biomimética” e “*biomimicry*” não são sinónimos porque se referem a objetivos diferentes; em tal situação, nesta tese, será adotado que os termos “biônica” “biomimética” e “*biomimicry*” não são sinónimos.

### 1.1.3. Métodos de *Design* Biomiméticos

A maioria dos autores aponta que os Métodos de *Design* Biomimético se classificam em duas categorias, “*Design* baseado no Problema” e “*Design* baseado na Solução”.

Tokuç, Özkaban e Çakır (2018, p.78), Badarnah (2017, p.5), Radwan e Osama (2016, p.180), Nour ElDin, Abdou e Abd ElGawad (2016, p.377), Badarnah e Kadri (2015, p.121), Speck e Harder (citados por GRUBER, 2011a, citada por ANDRADE, 2014, p.31), El-Zeiny (2012, p.505), Gruber (2011, p.48) e Folz (citado por BARBOZA, 2008, Citado por SANTOS, 2010, p.150) assinalaram que os Métodos de *Design* Biomimético se classificam em duas

categorias. Uma categoria do “Design baseado no Problema” ou “*Top Down*” e outra do “*Design* baseado na Solução” ou “*Bottom Up*”.

#### 1.1.3.1. *Design* baseado no Problema ou “*Top Down*”

Este método de *Design*, como sua denominação infere, é o processo de design que se inicia com um determinado problema de design e que em função dele são realizadas as observações de como a natureza tem solucionado esse problema. Este método de design tem sido o mais utilizado nos processos de design.

No decorrer do tempo, os autores têm apresentado vários métodos de *design* baseados no Problema que vão desde uma sequência de passos até uma matriz heurística.

Lenau (2009, p.2) apresentou um processo constituído de 4 passos: 1) Pesquisa das analogias relevantes, 2) Análises das soluções biológicas, 3) Identificação dos princípios de design, 4) design do artefato.

Vincent (2006, citado por SANTOS, 2010, p.149) assinalou que o melhor método que se adequa à abordagem biomimética é o método TRIZ (Teoria para a Resolução de Problemas Inventivos). Santos (2010, p.149) assinalou que o método TRIZ é uma matriz heurística que facilita a transferência de soluções de uma área específica para outra situação similar.

Santos (2010, p.149) assinalou que o método do “Espiral de *Design* Biomimético” do “*Biomimicry Institute*” é um movimento cíclico ordenado que vá da parte mais simples a uma multiplicidade complexa. O método é composto por 5 passos: 1) Identificação da função do Design, 2) Determinar como a natureza realiza a função. 3) Identificar as melhores soluções desenvolvidas pela natureza, 4) Implementar as soluções identificadas e 5) Avaliar as soluções implementadas.

Gebeshuber, Majlis, e Stachelberger (2011, p. 31) apresentaram o “Método de Inovação Biomimético – BIM” constituído por 4 passos: 1) Identificação da função, 2) Perguntar à biologia, 3) Encontrar as melhores práticas da natureza, 4) Gerar ideias para o processo ou produto.

El-Zeiny (2012, p.505) apresentou um método constituído por 6 passos: 1) Definição do problema, 2) Reformulação do problema, 3) Pesquisa de solução na biologia, 4) Definição da solução pela biologia, 5) Determinação dos princípios, 6) Aplicação dos princípios.

Gebeshuber et al. (citados por ANDRADE, 2014, p.32) assinalaram que o método é composto por 4 passos: 1) Identificação do problema, 2) identificação se o problema já foi resolvido pela natureza, 3) Identificar as melhores práticas da natureza e, 4) Propor ideias de produto ou processos.

Hsuan-An (2018, p.43) apresentou um processo de design chamado de Categorias de Analogias e composto por 6 passos: 1) Características formais e configurações, 2) Características estruturais e prático funcionais, 3) Características cinéticas comportamentais, 4) Características texturais, estéticas e qualitativas. 5) Características compositivas, 6) Características dimensionais e quantitativas.

Assim, sendo que os autores têm apresentado vários métodos de *design* baseado no problema que vão desde uma matriz heurística até uma sequência ordenada de passos; em tal situação, nesta tese, será adotado que o Método de *Design* baseado no Problema, em essência, é uma sequência ordenada e cíclica de refinamento de 7 passos: 1) Determinação do Problema de Design, 2) Observação de como a natureza soluciona esse problema, 3) Análise das soluções da natureza, 4) Identificação das melhores soluções, 5) Determinação dos princípios da natureza, 6) Aplicação dos princípios no *design*, 7) Avaliação do *design*.

#### 1.1.3.2. *Design* baseado na Solução “Bottom Up”

Este método de *Design*, como sua denominação infere, é o processo que se inicia com a observação de um organismo da natureza e transformado em um banco de dados que pode ser utilizado em um determinado produto.

A literatura sobre o método de design baseado na solução tem sido pouco utilizada pelos autores. O método vai desde a observação da solução a um determinado problema pela natureza à aplicação do princípio em um determinado projeto de design.

El-Zeiny (2012, p.505) apresentou um método constituído por 7 passos: 1) Identificação da solução na biologia, 2) Definir a solução pela biologia, 3) Determinação dos princípios, 4) Reformulação da solução, 5) Pesquisa sobre o problema, 6) Definição do problema, 7) Aplicação do princípio.

Assim, sendo que o autor apresentou um método que vá da observação da natureza até a aplicação dos princípios no problema de design; em tal situação, nesta tese, concordando com El- Zeiny (2012, p.505), será adotado que o Método de *Design* baseado na Solução é um processo que vá da observação da natureza até a aplicação dos princípios da natureza e é composto de 7 passos: 1) Identificação da solução na biologia, 2) Definir a solução pela biologia, 3) Determinação dos princípios, 4) Reformulação da solução, 5) Pesquisa sobre o problema, 6) Definição do problema, 7) Aplicação do princípio.

#### *1.1.3.3. Design baseado no Problema na Arquitetura*

Os autores assinalam que o Método de *Design* baseado no Problema tem sido utilizado no campo do Design e da Arquitetura. E, o método tem sido composto por 5 passos que vá da observação da natureza até aplicação do princípio no problema de *Design*.

Bahamón (2006, citado por SANTOS, 2010, p.150) assinalou que no campo do design e da arquitetura a abordagem biomimética tem sido desenvolvida na forma de *Design* baseado no Problema ou “*Top Down*”, onde a observação e experimentação têm sido o método muito útil para projetar formas arquitetônicas.

Julian Vincent (citado por GRUBER, 2008, p.2) apresentou um mapa biomimético, adaptado para a arquitetura, para transferir as estratégias da natureza para um problema de *design*. O mapa biomimético foi composto por 5 passos: 1) Observar a natureza, 2) Copiar a forma ou processo da natureza, 3) Analisar a função da forma ou do processo copiado da natureza, 4) Usar a forma ou princípio analisado da natureza e, 5) Aplicar a forma ou princípio no problema de *design*.

Assim, sendo que o Método de *Design* baseado no Problema tem sido utilizado no campo do *Design* e da Arquitetura e, que o método foi composto por 5 passos que vá da observação da

natureza até a aplicação dos princípios no problema de *design*; em tal situação, nesta tese, será adotado o Método de *Design* baseado no Problema na Arquitetura é composto por 7 passos: 1) Determinação do Problema de *Design*, 2) Observação de como a natureza soluciona esse problema, 3) Análise das soluções da natureza, 4) Identificação das melhores soluções, 5) Determinação dos princípios da natureza, 6) Aplicação dos princípios no *design*, 7) Avaliação do *design*.

#### 1.1.4. Biomimética na Arquitetura

Os autores apontam que a biomimética na arquitetura é uma disciplina emergente que procura inspiração a partir das analogias com a natureza para o desenvolvimento de projetos de edifício, bairro e comunidade. Que sua aplicação na arquitetura tem passado pela ornamentação, desempenho estrutural e adoção de princípios da natureza na projeção do ambiente construído. Que existem vários exemplos da aplicação da biomimética na arquitetura e, que a biomimética na arquitetura se constitui como uma poderosa ferramenta na inovação no desenvolvimento de designs sustentáveis para o ambiente construído.

Os autores assinalam que a biomimética na arquitetura é uma disciplina emergente que observa os organismos, relações comportamentais dos organismos e ecossistema para aplicar os princípios da natureza na arquitetura. Mazzoleni (2013, p.6), Janine Benyus (1997, citada por EL-ZEINY, 2012, p.503), Petra Gruber (2011, citada por SALIM; MYDIN; ULANG, 2013, p.1), Petra Gruber (2011, p.109) e Selçuk (2009, p. 34) apontaram que a biomimética na arquitetura é um campo emergente das analogias funcionais dos processos, e mecanismos dos organismos vivos para desenvolver designs eficientes para edifícios, bairros e comunidades. Petra Gruber (2011, citada por SALIM; MYDIN; ULANG, 2013, p.1) assinalou que a aplicação da biomimética na arquitetura é conhecida como “arquitetura biônica”.

Petra Gruber (2009, p.8) assinalou que existe muita sobreposição de campos entre a arquitetura e o reino das plantas. Das analogias entre plantas e edificações algumas soluções desenvolvidas pelas plantas podem ser transferidas pela biomimética para a arquitetura.

Os autores assinalaram que a aplicação da biomimética na arquitetura tem passado por 3 fases: Ornamentação, Desempenho Estrutural e Princípios da Natureza para funcionamento e Fabricação.

Dash (2018, p.648) assinalou que a biomimética na arquitetura, no primeiro momento, foi aplicada no uso de elementos ornamentais com formas da natureza, e logo foi sofrendo uma transformação para questões funcionais, estruturais e estéticas de design. Como por exemplo: uso da planta lótus nos capiteis dos pilares da arquitetura egípcia (no século VI), uso da planta *acanthus* nos capiteis dos pilares das arquiteturas: grega e romana – pilar corinto e pilar compósito (entre os séculos VI e IX), uso da forma das árvores nos sistemas de arcobotantes na arquitetura gótica (no século XII), uso de catenárias nas formas orgânicas da arquitetura de Gaudí (no século XIX), uso da geometria de parabolóide hiperbólico na arquitetura de Felix Candela e, uso do espiral Fibonacci, da natureza, na arquitetura.

Yedekci Arslan (2013) assinalou três formas como a biomimética foi aplicada na arquitetura. A primeira, chamada de biomorfismo, na qual as formas naturais só foram reproduzidas, como no trabalho dos arquitetos Frei Otto, Eero Saarinen, Antonio Gaudí. A segunda, na qual foram observados desempenhos/funções em diferentes níveis, tais como nos níveis do organismo, das relações comportamentais entre os organismo e no ecossistema (Mazzoleni; Price, 2013, citados por YEDEKCI ARSLAN, 2013), como no trabalho da professora Janine Benyus. A terceira, chamada de *biodesign*, na qual são incorporadas ideias da natureza para o desenvolvimento de projetos e realização da fabricação, como no trabalho do arquiteto Michael Pawlyn.

Os autores assinalam que existem vários exemplos da aplicação da biomimética na arquitetura e é uma poderosa ferramenta de inovação no desenvolvimento de designs sustentáveis.

Sheikh e Asghar (2019, p.4) e Radwan e Osama (2016, p.180) assinalaram que há muitos exemplos da aplicação da biomimética na arquitetura. Radwan e Osama (2016, p.180) fazem referência ao Sistema Estrutural do Palácio de Cristal inspirado nos lírios em água por James Paxton, no ano de 1851, aos Sistemas Estruturais projetados por Robert Le Ricolais baseado nos desenhos de Haeckel, a meados do século XX. Le Corbusier e Frank Lloyd Wright também foram inspirados pela natureza.

Pawlyn (2016, p. 5) assinalou que a biomimética é uma poderosa ferramenta de inovação que permite aos arquitetos ir além das aproximações convencionais e entregar *designs* sustentáveis.

Assim, sendo que os autores assinalam que a biomimética na arquitetura é uma disciplina emergente que procura inspiração na natureza para a projeção do ambiente construído, que a aplicação da biomimética tem passado pela ornamentação-desempenho estrutural-princípios da natureza para funcionamento e fabricação, que existem vários exemplos de aplicação da biomimética na arquitetura e que é uma poderosa ferramenta de inovação no desenvolvimento de *designs* sustentáveis; em tal situação, nesta tese, será adotado que a aplicação da biomimética na arquitetura é uma disciplina emergente que procura inspiração na natureza para o desenvolvimento de projetos com implementação dos princípios da natureza nos edifícios, bairros e comunidade. Que tem passado pela ornamentação, desempenho estrutural e adoção de princípios da natureza no desenvolvimento de projetos para o ambiente construído. Que existem vários exemplos de sua aplicação na arquitetura. E, que é uma ferramenta poderosa para inovação no desenvolvimento de projetos sustentáveis.

#### 1.1.5. Biomimética nas Envoltórias das Edificações

##### 1.1.5.1. *Envoltória da Edificação, Consumo de Energia e Mudança de Papel*

Na literatura, os autores apontam uma definição da Envoltória das Edificações, observações sobre o alto consumo de energia e, observações da mudança do papel ao longo do tempo. A Envoltória do Edifício é definida como um filtro entre os ambientes, exterior e interior. Que as Envoltórias Convencionais tem um alto consumo de energia. E, que as Envoltórias, no século XX, têm passado por 3 tipos de uso, como revestimento, como sistema estrutural eficiente e como sistema com eficiência energética.

Sandak et al. (2019, p.1), Minsolmaz Yeler e Yeler (2017, p.147), López et al. (2017, p.693), López et al. (2015, p.28), Stephen Kieran (2005, citado por YOWELL, 2011, p.9) e Sung (2011, p.147) definiram a Envoltória dos Edifícios como o filtro das condições ambientais

exteriores e os requerimentos funcionais dos usuários no espaço interior. Gruber e Gosztanyi (2010, p.504) assinalaram que as envoltórias das edificações são consideradas como a terceira pele depois das roupas das pessoas e que fornecem abrigo e espaço para as atividades humanas.

López et al. (2017, p.693) assinalaram que as fachadas convencionais demandam um alto consumo de energia para controlar o conforto interno das edificações. As envoltórias enfrentam problemas ambientais básicos como a radiação solar, temperatura, umidade relativa, água de chuva, movimento do vento, ruídos e dióxido de carbono.

Öztoprak (2018, p.36) assinalou que a envoltória da edificação tem passado por 3 fases no século XX, como revestimento, como sistemas estruturais eficientes e como sistemas com eficiência energética. No caso do uso como revestimento temos como exemplo o Palácio de Cristal, no caso como sistemas de estruturas eficientes temos como exemplo o Domo Geodésico e, no caso de sistemas com eficiência energética temos as Peles que respiram.

Assim, sendo que os autores assinalam que a Envoltória das Edificações é um filtro entre os ambientes, exterior e exterior, que as Envoltórias Convencionais têm um alto consumo de Energia e, que a Envoltória das Edificações tem passado pelo seu uso como revestimento, sistema estrutural eficiente e sistema com eficiência energética; em tal situação, nesta tese, será adotado que a Envoltória da Edificação é um filtro das condições ambientais exteriores e dos requerimentos funcionais dos usuários no espaço interior, que as Envoltórias Convencionais têm um alto consumo de energia e, que a Envoltória das Edificações tem sofrido mudanças no seu papel ao longo do tempo até chegar às Envoltórias com eficiência energética.

#### *1.1.5.2. Envoltória Sustentável*

Os autores apontaram que a Envoltória Sustentável da Edificação é a que separa os ambientes, externo e interior, e é construída com matérias que propiciam a eficiente energeticamente na edificação. Dentre essas Envoltórias se encontram as Envoltórias Verdes e as Design baseado na Biologia.

Tokuç, Özkaban e Çakır (2018, p.79) definiram a Envoltória Sustentável das edificações como um elemento exterior da edificação que separa o ambiente interior do ambiente exterior, onde os primeiros critérios de sustentabilidade estão relacionados ao material utilizado e a eficiência energética. Exemplos: *Media TIC* (1997-2007, inteligência experimental), *One Ocean Pavilion* (2010 -2012, Fachada Kinética), Torre de Especialidades do *Manuel Gea Gonzalez Hospital building* (2013, Fachadas comedores de fumaça), *BIQ Apartment House* (2013, Cultivo de algas).

Entre as Envoltórias Sustentáveis, Yowell (2011, p.34) apresentou as Envoltórias Verdes e as de design baseado na biologia. Onde as Envoltórias Verdes são fachadas que usam vegetais crescendo na parte exterior e, as de design baseado na biologia são dispositivos que se comportam como os organismos vivos.

Assim, sendo que os autores assinalam que uma Envoltória Sustentável é aquela que separa os ambientes externo e interno e, é construída com materiais que propiciam a eficiência energética na edificação e, que entre as Envoltórias Sustentáveis estão as Envoltórias Verdes e as Envoltórias com *Design* baseado na Biologia; em tal situação, nesta tese, completando a colocação dos autores, será adotado que a Envoltória Sustentável é aquela que filtra as condições ambientais exteriores e funcionaliza os requerimentos dos usuários do espaço interior e, que é construída aplicando os princípios da natureza em termos de menor uso de material e eficiência energética.

#### *1.1.5.3. Envoltórias Dinâmicas*

Os autores assinalam que as Envoltórias das Edificações deveriam atuar como a pele dos animais. Nesse sentido, é possível inferir o conceito de Envoltória Dinâmica a qual pode ser definida como a Fachada que age como um filtro dos câmbios aos ambientes externos e internos por sistemas complexos automatizados (sistemas ativos) ou sistemas de matérias com memória de forma (sistemas passivos). Dentre as Envoltórias Dinâmicas, os autores apresentam: Inteligentes, Responsivas, Adaptativas e Regenerativas.

Sandak et al. (2019, p.1) apresentaram uma analogia entre as funções das envoltórias das edificações e a pele dos animais.

KieranTimberlake (2011, p.1, citado por YOWELL, 2011, p.31) e Sung (p.5) definiram as Envoltórias Inteligentes como as fachadas que podem reagir aos câmbios dos ambientes externos e internos, construída com sistemas de controle climático, energia, iluminação, exibição de informações e materiais de memória de forma, respectivamente. Exemplos: KieranTimberlake's SmartWrap, Bloom Pavilion.

Yowell (2011, p.32, 33) definiu as Envoltórias Responsivas como as fachadas que reagem aos câmbios dos ambientes externos e internos e, construídas com materiais que mudam de estado e acumulam energia. Exemplo: *Anglia Ruskin University Ashcroft International Business School* (vidros com sais hidratados). Anis (2019, p.339) apontou como exemplos de sistemas passivos: O Pavilhão *Bloom* desenhado por Doris Sung nos Estados Unidos de Norte América e, o Pavilhão *Higroskin* desenvolvido por Achim Menges na Alemanha. O Pavilhão *Bloom*, construído com placas bimetálicas, reage à temperatura e o Pavilhão *Higroskin*, construído com madeira, reage à umidade.

Loonen et al. (2013, citado por ANIS, 2019, p.339) definiu a Envoltória Adaptativa ao clima como uma estrutura que tem a característica de mudar sua configuração segundo a mudança dos parâmetros ambientais para alcançar um bom desempenho. As Envoltórias Adaptativas ao clima se classificam dois tipos de sistemas: Sistemas mecanizados com complexos dispositivos automatizados (sistemas ativos) e, sistemas responsivos baseados no comportamento e propriedades dos materiais (sistemas passivos).

Yowell (2011, p.34) assinalou que a Envoltória Regenerativa é uma fachada constituída por um material regenerativo. Exemplo: Concreto regenerativo.

Assim, sendo que os autores assinalam que a Envoltória das Edificações deveria atuar como a pele dos animais, que as Envoltórias Inteligentes, Responsivas, Adaptativas e Regenerativas reagem às mudanças dos ambientes externos e internos; em tal situação nesta tese, a Envoltória Dinâmica pode ser definida como a Fachada que age como um filtro aos câmbios dos ambientes externos e internos por sistemas complexos automatizados (sistemas ativos) ou sistemas de matérias com memória de forma (sistemas passivos).

### 1.1.6. Síntese

Nesta tese, serão adotadas as proposições a seguir:

A natureza tem sido tomada como inspiração para solucionar problemas de design desde tempos remotos em diferentes áreas do conhecimento humano;

O termo “biônica” vem da biologia e tecnologia e foi acunhado por Jack Ellwood Steele em meados da década de 1950;

O termo “biomimética” será entendido como acunhado por, Otto Schmitt no ano de 1957, na sua Tese de doutoramento;

O termo “*biomimicry*” foi precedido pelos termos “biônica” e “biomimética” e, concordando com El Ahmar (2011, p.18), Santos (2009, p.30) e Panchuk (2006, p.3), o termo “*biomimicry*” apareceu no ano de 1997 com a publicação intitulada “*Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*” de Janine Benyus;

O termo “biônica” é o estudo das formas da natureza para transferi-las para a tecnologia;

O termo “biomimética” vem das palavras gregas, “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e, concordando com Otto Schmitt (citado por ANDRADE, 2014, p.25) (citado por ÖZTOPRAK, 2018, p.20), se define como a ciência que estuda e replica os métodos, projetos e processos da natureza;

O termo “*biomimicry*” vem das palavras gregas “*bios*” que significa “vida” e “*mimesis*” que significa “imitação” e se define como a imitação consciente da natureza em procura de tornar sustentável o planeta, em concordância com Janine Benyus.

Os termos “biônica” “biomimética” e “*biomimicry*” não são sinónimos;

A maioria dos autores aponta que os Métodos de Design Biomimético se classificam em duas categorias, “*Design* baseado no Problema” e “*Design* baseado na Solução”;

O Método de *Design* baseado no Problema, em essência, é uma sequência ordenada e cíclica de refinamento de 7 passos: 1) Determinação do Problema de Design, 2) Observação de como

a natureza soluciona esse problema, 3) Análise das soluções da natureza, 4) Identificação das melhores soluções, 5) Determinação dos princípios da natureza, 6) Aplicação dos princípios no design, 7) Avaliação do design;

O Método de *Design* baseado na Solução é um processo que vá da observação da natureza até a aplicação dos princípios da natureza e é composto de 7 passos: 1) Identificação da solução na biologia, 2) Definir a solução pela biologia, 3) Determinação dos princípios, 4) Reformulação da solução, 5) Pesquisa sobre o problema, 6) Definição do problema, 7) Aplicação do princípio;

O Método de *Design* baseado no Problema na Arquitetura é composto por 7 passos: 1) Determinação do Problema de Design, 2) Observação de como a natureza soluciona esse problema, 3) Análise das soluções da natureza, 4) Identificação das melhores soluções, 5) Determinação dos princípios da natureza, 6) Aplicação dos princípios no design, 7) Avaliação do design;

A aplicação da biomimética na arquitetura é uma disciplina emergente que procura inspiração na natureza para o desenvolvimento de projetos com implementação dos princípios da natureza nos edifícios, bairros e comunidade. Que tem passado pela ornamentação, desempenho estrutural e adoção de princípios da natureza no desenvolvimento de projetos para o ambiente construído. Que existem vários exemplos de sua aplicação na arquitetura. E, que é uma ferramenta poderosa para inovação no desenvolvimento de projetos sustentáveis;

A Envoltória da Edificação é um filtro das condições ambientais exteriores e dos requerimentos funcionais dos usuários no espaço interior, que as Envoltórias Convencionais têm um alto consumo de energia e, que a Envoltória das Edificações tem sofrido mudanças no seu papel ao longo do tempo até chegar às Envoltórias com eficiência energética;

A Envoltória Sustentável é aquela que filtra as condições ambientais exteriores e funcionaliza os requerimentos dos usuários do espaço interior e, que é construída aplicando os princípios da natureza em termos de menor uso de material e eficiência energética;

A Envoltória Dinâmica pode ser definida como a Fachada que age como um filtro aos câmbios dos ambientes externos e internos por sistemas complexos automatizados (sistemas ativos) ou sistemas de matérias com memória de forma (sistemas passivos).

## 1.2. Fabricação Digital

Este tópico tem por objetivo estabelecer um referencial sobre a Fabricação Digital e seus processos de fabricação. Nesse objetivo, aqui são revisadas questões da Fabricação Digital como os antecedentes, a definição e as categorias nas que se classificam os processos de fabricação digital.

### 1.2.1. Antecedentes

Os autores assinalam que o desenvolvimento das tecnologias de controle numérico por computador (CNC) e design assistido por computador (CAD) colaboraram para o surgimento da “Fabricação Digital” e a projeção de formas de curvas complexas.

Menges, Schwinn e Krieg (2017, p.XX) assinalaram que o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) desenvolveu o controle numérico por computador (CNC) na década de 1950. No contexto em que os sistemas de design assistidos por computador (CAD) também foram desenvolvidos, como foi o caso do trabalho pioneiro de Ivan Sutherland, Sketchpad Tese, no ano de 1963. Os autores também assinalaram que na mesma década de 1960, métodos de modelagem de curvas complexas foram desenvolvidos por Paul Casteljau na Citroën e Pierre Bézier na Peugeot na França. Essa modelagem *NURBS* (non-uniform rational basis spline) possibilitou a modelagem de superfícies curvadas modeladas digitalmente.

Em relação às possibilidades oferecidas pela modelagem *NURBS* e a Fabricação Digital, Estévez e Navarro (2016, p.1), no artigo “*Del microscopio electrónico a la estrategia digital en arquitectura*”, assinalaram que a partir da observação no microscópio eletrônico se podia desenvolver os algoritmos da modelagem 3D de um determinado artefato para logo ser fabricado digitalmente.

Caneparo (2014, p.56) assinalou que com o surgimento dos computadores e a necessidade da Força Armada dos Estados Unidos de América de controlar máquinas, surgiu o controle numérico por computador (CNC) no ano de 1956.

Assim, sendo que os autores assinalaram que o controle numérico por computador (CNC) surgiu na década de 1950 e, que as tecnologias de design assistido por computador (CAD) surgiram na década de 1960; em tal situação, nesta tese, será adotado que a “Fabricação Digital” surgiu na década de 1960.

### 1.2.2. Definição de “Fabricação Digital”

Os autores não concordam na definição de “fabricação digital”. Mas os autores apontam implicitamente que é um processo de fabricação controlado numericamente por computador de um objeto com material customizado.

Wrangler et al. (2016, p.67) a definiram a como a aplicação da modelagem digital e as tecnologias de fabricação para a produção de objetos de material customizado.

Gershenfeld (2012, p.9) a definiu como o processo que usa ferramentas controladas por computador que são descendentes da fresa de topo controlada por computador no Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT) no ano de 1952. O autor assinalou que no sentido mais estrito da Fabricação Digital os mesmos materiais eram digitais.

Celani e Pupo (2010, p.1) a definiram como a produção de modelos físicos e objetos finais diretamente de uma modelagem computacional com máquinas controladas numericamente.

Iwamoto (2009, p.005) a definiu a como a forma pela qual dados digitais controlam processos de fabricação.

Smith (citado por KOLAREVIC, KLINGER, 2008, p.224) a definiu como um processo de fabricação controlado por máquinas. O autor assinala que na prática o processo de “fabricação digital” tende a misturar o controle por computador com processos manuais.

Bonwetsch. et al. (2006, p.489) a definiram como a fabricação de componentes para edificação utilizando controle numérico por computador (CNC).

Seely (2004, p.10) a definiu como um processo assistido por computador.

Kolarevic (2003, p.1) (2001, p.2) a definiu como o processo de fabricação por máquinas controladas numericamente por computador (CNC).

Assim, sendo que alguns autores definem como um processo de fabricação controlado numericamente por computador (CNC), que outros a definem como a fabricação controlada por máquinas; em tal situação, nesta tese, será adotado que a “fabricação digital” será entendida como o processo de fabricação controlado numericamente por computador de um objeto com um material customizado. Onde, a fabricação controlada numericamente por computador pode ser entendida como a preparação de “arquivo digital para fábrica”.

### 1.2.3. Categorias dos Processos de “Fabricação Digital”

Os autores não concordam sobre as categorias nas que se classificam os processos de “fabricação digital”. A maioria assinalam 4 categorias e o resto assinalam 2, 3 ou 5 categorias. Mas a maioria concorda em apontar os Processos de Corte, Subtração, Adição e Conformação.

Os autores que assinalam 2 categorias de classificação dos processos de fabricação digital não especificam se referem ao material em formato bidimensional ou tridimensional e não diferenciam claramente os processos. Scopigno et al. (2015, p.2) assinalaram 2 categorias de classificação dos processos de fabricação digital: Subtrativo e Aditivo. Os autores também apontaram que: 1) O Processo Subtrativo consistia na remoção de material de um bloco utilizando uma ferramenta de usinagem controlada numericamente por computador. E, que a principal vantagem do processo era a ampla variedade de matérias que pode utilizar. 2) O Processo Aditivo consistia na fabricação camada a camada de um objeto. O autor apresenta 4 tecnologias aditivas: Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Fabricação de Objetos Laminados (LOM), Ligação de Materiais Granulados (GMB), Fotopolimerização.

Os autores que assinalam 3 categorias de classificação dos processos de fabricação digital não especificam se referem ao material em formato bidimensional ou tridimensional e não diferenciam claramente os processos. Martins e Souza (2014, p.478) e Guzik (2009, p.15) dividiram os processos de fabricação digital em 3 categorias: Subtrativa, Aditiva,

Conformação. Guzik (2009, p.16) apontou que: O Processo Subtrativo, por usinagem ou corte a laser, desperdiça material durante a produção do objeto e demanda maior ou menor tempo de fabricação em função do tamanho do objeto e, o Processo Aditivo, por construção de camada a camada, é mais caro e demanda mais tempo para a fabricação de peças de pequeno porte. Guzik indicou que este processo deve ser utilizado para a fabricação do objeto final.

Os autores que assinalam 4 categorias de classificação dos processos de fabricação digital especificam o formato do material para cada um dos processos. Dunn (2012, p.88) assinalou que os processos de fabricação digital geralmente se classificaram em 4 categorias: Corte, Subtração, Adição e Conformação. O autor também apontou que: 1) O Processo de Corte, o mais utilizado na fabricação, consistia de um dispositivo de corte e uma mesa de corte. Onde o movimento do dispositivo de corte se movimentava em dois eixos (eixos X e Y). 2) O Processo de Subtração consistia da remoção de um volume de material de um volume sólido. Onde o material era removido pela técnica de usinagem. 3) O Processo de Adição consistia na construção camada a camada de um objeto. Esse método era conhecido como prototipagem rápida. E, 4) O Processo de Conformação consistia na aplicação de forças mecânicas para remodelar ou deformar o material.

Kolarevic (2003, p. 52) (2001, p.2) apresentou 4 processos de fabricação digital: Corte, Subtração, Adição e Conformação. O autor assinalou que: 1) O Processo de Corte ou fabricação 2D, processo mais utilizado, consistia de um dispositivo de corte e uma plataforma para corte, onde a movimentação do dispositivo de corte era em dois eixos (X e Y). O autor indicou que dentre as várias tecnologias de Corte estavam o Corte por Arco de Plasma, Corte por Raio Laser e Corte por Jato de Água. O autor também indicou que a fabricação 2D permitia a produção por contorno e triangulação (ou tesselação poligonal) de superfícies regradadas, superfícies desenvolvíveis e superfícies desdobráveis. 2) O Processo de Subtração consistia na remoção de um volume de material de um sólido usando multieixos de usinagem. Onde a usinagem é realizada por controle numérico por computador (CNC). 3) O Processo de Adição consistia na formação de um modelo tridimensional em um processo de fundição de camada a camada. O autor também apontou que este processo era comumente conhecido como a fabricação camada a camada de forma livre sólida, prototipagem rápida ou fabricação de área de trabalho. E, 4) O Processo de Conformação consistia na aplicação de forças mecânicas como calor ou vapor no material para dar a forma desejada por remodelação ou deformação.

Os autores que assinalam 5 categorias de classificação dos processos de fabricação digital não consideram os processos de subtração e adição. Iwamoto (2009, p.004) apresentou 5 categorias dos processos de fabricação digital: Seção, Tesselação, Dobragem, Contorno, Conformação. A Autora apontou que: 1) O Processo de Seção consistia de cortes bidimensionais de um objeto tridimensional. 2) O Processo de Tesselação consistia de peças que se organizavam uma do lado da outra sem deixar brechas para formar um plano ou uma superfície. 3) O Processo de Dobragem consistia de dobrar uma superfície bidimensional para conseguir uma superfície tridimensional. 4) O Processo de Contorno consistia na remodelação de uma superfície bidimensional para construir uma superfície tridimensional com a remoção sucessiva de material. E, 5) O Processo de Conformação consistia em produzir objetos a partir de moldes ou formas.

Assim, sendo que os autores que assinalam 2 e 3 categorias não especificam o formato do material e não diferenciam os processos, que os que assinalam 4 categorias especificam o formato do material e, que os que assinalam 5 categorias não consideram os processos de fabricação digital em forma subtrativa e Aditiva; em tal situação, nesta tese, concordando com Dunn e Kolarevic, será adotado que os processos de fabricação digital se classificam em 4 categorias: Seção, Subtração, Adição e Conformação. Onde, 1) O Processo de Corte ou fabricação 2D, processo mais utilizado, consiste de um dispositivo de corte e uma plataforma para corte, onde o dispositivo de corte se movimenta em dois eixos (X e Y). Dentre as várias tecnologias de Corte estão o Corte por Arco de Plasma, Corte por Raio Laser e Corte por Jato de Água. Este processo permite a produção por contorno e triangulação (ou tesselação poligonal) de superfícies regradas, superfícies desenvolvíveis e superfícies desdobráveis. 2) O Processo de Subtração consiste da remoção de um volume de material de um sólido usando multieixos de usinagem. Onde a usinagem é realizada por controle numérico por computador (CNC). 3) O Processo de Adição consiste na formação de um modelo tridimensional em um processo de fundição de camada a camada. Este processo é comumente conhecido como a fabricação camada a camada de forma livre sólida, prototipagem rápida ou fabricação de área de trabalho. E, 4) O Processo de Conformação consiste na aplicação de forças mecânicas como calor ou vapor no material para dar a forma desejada por remodelação ou deformação.

#### 1.2.4. Síntese

Nesta tese, serão adotadas as proposições a seguir:

A Fabricação Digital surgiu na década de 1960;

A Fabricação Digital é o processo de fabricação controlado numericamente por computador de um objeto com um material customizado. Onde, a fabricação controlada numericamente por computador pode ser entendida como a preparação de “arquivo digital para fábrica”;

Os Processos de Fabricação Digital, concordando com Dunn (2012, p.88) e Kolarevic (2003, p. 52) (2001, p.2), se classificam em 4 Categorias: Seção, Subtração, Adição e Conformação. Onde: 1) O Processo de Corte ou fabricação 2D, processo mais utilizado, consiste de um dispositivo de corte e uma plataforma para corte, onde o dispositivo de corte se movimenta em dois eixos (X e Y). Dentre as várias tecnologias de Corte estão o Corte por Arco de Plasma, Corte por Raio Laser e Corte por Jato de Água. Este processo permite a produção por contorno e triangulação (ou tesselação poligonal) de superfícies regradadas, superfícies desenvolvíveis e superfícies desdobráveis. 2) O Processo de Subtração consiste da remoção de um volume de material de um sólido usando multieixos de usinagem. Onde a usinagem é realizada por controle numérico por computador (CNC). 3) O Processo de Adição consiste na formação de um modelo tridimensional em um processo de fundição de camada a camada. Este processo é comumente conhecido como a fabricação camada a camada de forma livre sólida, prototipagem rápida ou fabricação de área de trabalho. E, 4) O Processo de Conformação consiste na aplicação de forças mecânicas como calor ou vapor no material para dar a forma desejada por remodelação ou deformação.

### **1.3. Arquitetura Responsiva**

Este tópico tem por objetivo estabelecer um referencial sobre a Arquitetura Responsiva, antecedentes e as experiências que têm sido desenvolvidas. Nesse objetivo, aqui são revisadas questões sobre o surgimento da frase “Arquitetura Responsiva”, sua definição, experiências desenvolvidas dos Sistemas Responsivos.

#### **1.3.1. Surgimento da frase “Arquitetura Responsiva”**

Os autores concordam em que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva”, mas não concordam na época na que foi acunhada a frase. Alguns autores assinalam que a frase foi acunhada na década de 1970 e outros assinalam que foi no ano de 1975. Mas a maioria dos autores assinala que a frase foi acunhada no ano de 1975.

Presenti et al. (2015, p.662) e Verma e Devadass (2013, p.157) assinalaram que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva”.

Henriques (2015, p.201) assinalou que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva” na década de 1970.

Vaz et al. (2016, p.76) e Sterk (2003, p.86) assinalaram que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva” no ano de 1975.

Assim, sendo que os autores concordam em que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva”, que uma parte significativa dos autores apontam que a frase foi acunhada na década de 1970, que poucos autores assinalam que a frase foi acunhada no ano de 1975; em tal situação, nesta tese, será adotado que Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva” no ano de 1975.

### 1.3.2. Definição de “Arquitetura Responsiva”

Os autores não concordam na definição de “Arquitetura Responsiva”. Na literatura se encontra em forma geral 4 tipos de definições. Uma definição relacionada com a mudança de uma forma arquitetônica para responder às condições ambientais externas e internas do ambiente construído, uma definição relacionada com sensores-máquinas-atuadores para controlar dispositivos que emulam os sistemas dos seres vivos na natureza, uma que integra a computação com os espaços ou estruturas construídas para melhoria do desempenho e, uma definição a refere como uma arquitetura que se reconfigura segundo os ganhos de calor, ventilação e consumo de energia. Mas as 4 definições referem a um sistema dinâmico que pode ser computacional-eletromecânico ou natural para regular o impacto dos fatores ambientais externos e melhoria do ambiente interno para as atividades dos usuários.

Alguns autores assinalam que a “Arquitetura Responsiva” é um sistema de mudança da forma das edificações para responder às condições ambientais externas e necessidades dos usuários nos ambientes internos construídos. Elmokadem et al. (2018, p. 751), Meyboom (citado por DAVIS, SALIM, BURRY, 2011, p.156) e Pan e Jeng (2008, p.2) assinalaram que a “Arquitetura Responsiva” é um sistema de mudança da forma das edificações para responder às condições ambientais e às atividades dos usuários.

Alguns autores assinalam que a “Arquitetura Responsiva” é um sistema composto por máquinas, sensores e atuadores que regulam dispositivos tendo como inspiração os sistemas dos seres vivos. Al-Faleh (2017, p.12) e Menges, Reichert e Krieg (2014, p.39) definiram a “Arquitetura Responsiva” como um sistema de máquinas, sensores e atuadores que regulam dispositivos emulando sistemas vivos.

A maioria dos autores, referenciando Nicholas Negroponte, define a “Arquitetura Responsiva” como a integração da computação com os espaços ou estruturas construídas para melhorar o desempenho das edificações. Vaz et al. (2016, p.76), Henriques (2015, p.201), Meagher (2014, p.95), Verma e Devadass (2013, p.157) e Sterk (2003, p.86), referenciando Nicholas Negroponte, definiram a “Arquitetura Responsiva” como a integração da computação com os espaços ou estruturas construídas para melhorar o desempenho das edificações.

Alguns autores, referenciando Tristan d'Estree Sterk, definem a “Arquitetura Responsiva” como a arquitetura que se reconfigura física e autonomamente segundo os ganhos de calor emitido pelo sol, ventilação e redução do consumo de energia. Presenti et al. (2015, p.662), Henriques (2015, p.201) e Sterk (2003, p.86) apontaram que Tristan d'Estree Sterk definiu a “Arquitetura Responsiva” como uma arquitetura que tem por objetivo a reconfiguração física e autónoma segundo as necessidades de mobilidade variável, localização e geometria. Os autores também apontaram que esse tipo de arquitetura é utilizada para regular ganhos de calor emitido pelo sol, ventilação e redução do consumo de energia.

Assim, sendo que alguns autores definem a “Arquitetura Responsiva” como um sistema de mudança da forma das edificações para responder aos fatores ambientais externos e às necessidades do usuário no ambiente interno construído, que alguns autores a definem como um sistema de máquinas-sensores-atuadores para controlar dispositivos emulando os sistemas dos seres vivos na natureza, que a maioria dos autores - referenciando Nicholas Negroponte - a definem como a integração da computação com os espaços ou estruturas construídas para melhorar o desempenho das edificações, que alguns autores - referenciando Tristan d'Estree Sterk - a definem como a arquitetura que se reconfigura física e autonomamente segundo os ganhos de calor, necessidade de ventilação e redução do consumo de energia; em tal situação, nesta tese, a “Arquitetura Responsiva” será definida como uma arquitetura dinâmica que implica mudança física e autônoma por meio de dispositivos computacionais-eletromecânicos ou naturais de recepção-processamento-atuação nos espaços ou estruturas construídas para regular o impacto dos fatores ambientais externos e melhoria do ambiente interno para as atividades dos usuários.

### 1.3.3. Sistemas Responsivos

Os autores diferenciam os Sistemas Responsivos dos Sistemas Inteligentes e os Sistemas Adaptativos. Os Sistemas Responsivos podem ser naturais ou artificiais e podem interagir ou se adaptar a de materiais ou superfícies e, de controle ambiental por determinadas condições.

Dewindar, Mohamed e Ashour (2013, p.2) apresentaram uma diferenciação dos sistemas responsivos, inteligentes e adaptativo. Onde:

Os Sistemas Responsivos podem ser naturais ou artificiais que podem interagir e se adaptar a determinadas condições (BEESLEY, HIROSUE, RUXTON, 2006, citados por DEWINDAR, MOHAMED, ASHOUR, 2013, p.3).

Os Sistemas Inteligentes se referem ao uso de materiais e superfícies inteligentes que respondem a propriedades físicas internas ou intercâmbios de energia externos (KLOOSTER, 2009, citado por DEWINDAR, MOHAMED, ASHOUR, 2013, p.2).

Os Sistemas Adaptativos se referem a sistemas que se modificam segundo as condições ambientais e parâmetros estabelecidos (DEWINDAR, MOHAMED, ASHOUR, 2013, p.2).

Assim, sendo que os Sistemas Responsivos podem ser naturais ou artificias, que os Sistemas Inteligentes podem ser constituídos por determinados materiais ou superfícies de determinados materiais, que os Sistemas Adaptativos se modificam segundo as condições ambientais e parâmetros estabelecidos; em tal sentido, nesta tese, concordando com Beesley, Hirosue e Ruxton (2006, citados por DEWINDAR, MOHAMED, ASHOUR, 2013, p.3) será adotado que os Sistemas Responsivos podem ser naturais ou artificiais que podem interagir ou se adaptar a determinadas condições.

#### *1.3.3.1. Experiências de Sistemas Responsivos*

Desde a década dos anos 1960, os autores têm experimentado diferentes Sistemas Responsivos procurando responder aos fatores ambientais externos e às demandas dos usuários nos ambientes internos e reduzir o consumo de energia. Nesse intuito, os autores têm apresentado 5 tipos de Sistemas Responsivos, os quais aproveitam as propriedades higroscópicas da madeira, as propriedades reativas físicas e químicas - internas - dos materiais, sistemas complexos eletromecânicos, a memória de forma dos materiais e o comportamento físico dos materiais.

#### *1.3.3.1.1. Sistemas responsivos higroscópicos*

Os autores têm desenvolvido protótipos de Sistemas Responsivos Higroscópicos experimentando as propriedades anisotrópicas (deformação diferenciada nos eixos X e Y) e higroscópicas (deformação pela absorção de água) da madeira. Os protótipos têm sido construídos utilizando unicamente madeira e, outros protótipos misturando madeira com polímeros.

Augustin (2018) apresentou um sistema de envoltória dinâmico passivo usando as propriedades higroscópicas da madeira folheada.

Correa et al. (2017, p.106) apresentaram uma experiência de programação de transformação higroscópica da madeira fabricada com impressão 3D: A experiência consistiu de 3 experimentações: Madeira Submergida em Água, Madeira exposta a Vapor de Água, Madeira exposta a Radiação Térmica. A experiência foi realizada utilizando 2 métodos de fabricação digital: Impressão 3D diferenciando o sentido das fibras, Impressão 3D multimaterial diferenciando um material altamente reativo higroscópicamente e outro material não reativo.

Holstov, Farmer e Bridgens (2016, p.1) apresentaram um protótipo higromorfo de madeira e camadas sintéticas reativas em uma pele arquitetônica responsiva.

Wood et al. (2016) apresentaram um protótipo de superfícies construídas com madeira e atuação higroscópica.

Menges, Reichert e Krieg (2014, p.40) apresentaram os projetos “Morfologia Meteorosensitiva” e “Pavilhão Meteorosensitivo”, ambos baseados na higroscopia da madeira.

Krieg et al. (2014) apresentaram o “Pavilhão Meteorosensitivo” baseado na propriedade higroscópica da madeira.

Correa et al. (2013) apresentaram um protótipo responsivo baseado nas propriedades elástica e higroscópica da madeira.

Menges (2009) apresentou dois experimentos sobre as características anisotrópica e higroscópica da madeira. Onde o experimento da anisotropia da madeira mostrou uma atuação diferente dos elementos de madeira uniforme nos eixos X e Y e, o experimento da higroscopia da madeira em uma estrutura de superfície folheada r mostrou mudança na forma das folhas devido à absorção d'água do ambiente.

Assim, sendo que os autores têm desenvolvido protótipos de Sistemas Responsivos Higroscópicos experimentando as propriedades anisotrópicas e higroscópicas da madeira como material único e, como material misturado com polímeros; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos Higroscópicos são aqueles que sofrem mudanças nas suas formas físicas, como é o caso da madeira, pela absorção d'água.

#### *1.3.3.1.2. Sistemas responsivos com materiais reativos*

Os autores têm desenvolvido Sistemas Responsivos Reativos a diferentes fatores (estímulos) ambientais. Os estímulos ambientais foram: umidade, temperatura, dióxido de carbono e Luz natural. Os materiais utilizados foram: hidrogel, madeira, lâminas bimetálicas térmicas, ligas com memória de forma, polímeros com memória de forma, polímeros termocrômicos, plásticos sensíveis ao calor.

Lópes et al. (2015, p.33) apresentaram materiais ativos: Reativos à umidade, reativos à temperatura, reativos ao dióxido de carbono, reativos à luz. Os materiais ativos são aqueles que mudam de tamanho e forma segundo os fatores ambientais sem a necessidade de energia externa extra e nem partes complexas mecânicas. Entre os materiais reativos à umidade estão: Hidrogel, madeira. Entre os materiais reativos à temperatura estão: Lâminas Bimetálicas Térmicas, Ligas com Memória de Forma, Polímeros com Memória de Forma, Polímeros Termocrômicos, Plásticos Sensíveis ao calor. Entre os materiais reativos ao dióxido de carbono está: Polímeros Responsivos ao CO<sub>2</sub>. Entre os materiais reativos à luz: Corantes Fotocrômicos, Polímeros Responsivos à Luz.

Assim, sendo que os autores têm desenvolvido experimentações com materiais reativos aos estímulos ambientais como a umidade, temperatura, dióxido de carbono e luz natural; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos Reativos são aqueles que mudam de forma e tamanho perante estímulos ambientais sem o auxílio de energia externa e nem dispositivos mecânicos.

#### *1.3.3.1.3. Sistemas responsivos eletromecânicos*

Alguns autores têm desenvolvido Sistemas Responsivos Eletromecânicos sensíveis a fatores ambientais (estímulos). Esses estímulos foram: temperatura e luz natural.

Sharaidin (2014) apresentou 3 Sistemas Cinéticos Responsivos. 1) O Pavilhão 67 projetado por Richard Buckminster Fuller no ano de 1967. O Pavilhão 67 integrava sensores e atuadores que controlavam termostaticamente as condições ambientais do interior das estruturas. 2) Os Painéis Obturadores Cinéticos do Instituto do Mundo Árabe projetados por Jean Nouvel no ano de 1987. Os Painéis obturadores respondiam às condições de iluminação natural. 3) Os Painéis Cinéticos do *Abu Dhabi Investment Council Headquarters* projetados por AEDAS no ano de 2012. Os Painéis Cinéticos eram regulados mecanicamente controlados em 3 fases segundo a incidência da luz solar.

Assim, sendo que alguns autores têm desenvolvido Sistemas eletromecânicos sensíveis à temperatura, que alguns autores têm desenvolvido Sistemas eletromecânicos sensíveis à luz natural; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos Eletromecânicos são aqueles que abrem e fecham por dispositivos eletromecânicos controlados analogicamente pelo usuário perante estímulos ambientais (temperatura e luz natural).

#### *1.3.3.1.4. Sistemas responsivos de materiais com memória de forma*

Alguns autores têm desenvolvido Sistemas Responsivos de Materiais com Memória de Forma sensíveis a estímulos ambientais ou processos químicos.

Beites et al. (2013) apresentou um protótipo de um atuador dinâmico e painel interconectado. Onde o atuador foi desenvolvido utilizando um polímero com memória de forma.

Crawford (2010) apresentou um Sistema Responsivo baseado na expansão e contração de um dispositivo que atuava como um diafragma. O autor apontou que os materiais utilizados foram o polipropileno e fibras de Kevlar submetidos ao estímulo da temperatura.

Leng (2009, p.1) apresentou dois materiais com memória de forma: 1) Polímeros com memória de forma (SMPs) e, 2) Ligas com memória de forma (SMAs). O autor indicou que: os SMPs respondem a um estímulo específico mudando levemente sua forma e, geralmente estão constituídos por duas lâminas onde uma delas possui alta elasticidade e a outra com a capacidade de reduzir de tamanho levemente na presença de um estímulo particular. Os estímulos aos que podem responder são: temperatura, luz ou Química.

Assim, sendo que tem sido desenvolvido um protótipo de um Sistema Responsivo com Polímero com Memória de Forma, que tem sido desenvolvido um Sistema Responsivo com Polipropileno e fibras de Kevlar, ambos sensíveis à temperatura, que têm sido apresentados polímeros e ligas com memória de forma; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos de Materiais com Memória de Forma são aqueles que se expandem ou contraem perante uma mudança da temperatura, luz ou processos químicos.

### *1.3.3.1.5. Sistemas responsivos com materiais inteligentes*

Os autores têm desenvolvido Sistemas Responsivos com Materiais Inteligentes sensíveis a estímulos ambientais. Esses estímulos foram: temperatura, luz, som, campo elétrico, campo magnético.

Sung (2011) apresentou um protótipo de pele para edificação que respira utilizando termobimetálicos inteligentes. Onde os materiais têm coeficiente de dilatação linear diferente e espessura diferente. Os materiais utilizados foram o invar e a liga de níquel-manganês. O invar é uma liga de baixo coeficiente de dilatação linear, composto por 64% de aço e 36% de níquel e, a liga de níquel-manganês que é de alto coeficiente de dilatação linear, composto por 72% de manganês, 18% de cobre e 10% de níquel.

Aggour e Soliman (2011) apresentaram sistemas adaptativos utilizando materiais inteligentes e nano materiais na arquitetura.

Daveiga e Ferreira (2005, p.58) apresentaram 2 tipos de materiais: inteligente e nano. Onde, 1) Newman (1997, citado por DAVEIGA, FERREIRA, 2005, p.59) definiu os materiais inteligentes como materiais que tem a propriedade de desempenhar funções de sensores e atuadores perante estímulos externos. Onde os estímulos podem ser na forma de luz, som, temperatura, campo elétrico, campo magnético e estres. Entre os materiais inteligentes se encontram: piezoelétricos, estritamente elétricos, estritamente magnéticos, eletrocromicos, ligas com memória de forma e, Biomiméticos. 2) Daveiga e Ferreira (2005, p.60) definiram os nano materiais como materiais com subestrutura em escala nanométrica. Entre os nano materiais estão: Nano partículas, Nano arames, Nano tubos, Nano películas, Nano massas.

Assim, sendo que têm sido desenvolvido Sistemas Responsivos com Materiais Inteligentes sensíveis a estímulos ambientais, que os materiais inteligentes podem ser ligas metálicas, piezoelétricos, elétricos, magnéticos, eletrocromicos, Biomiméticos; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos com Materiais Inteligentes são aqueles que compostos por materiais que possam desempenhar funções de sensores e atuadores perante estímulos externos.

#### *1.3.3.1.6. Observações sobre as experiências de sistemas responsivos*

Assim, sendo que os autores têm apresentado experiências que aproveitam as características higroscópicas da madeira, que aproveitam a reação física e química dos materiais, que aproveitam a complexidade de sistemas eletromecânicos emulando os seres vivos, que aproveitam a memória da forma dos materiais, que aproveitam as funções de atuar como sensores ou atuadores dos materiais; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Sistemas Responsivos podem ser desenvolvidos aproveitando a propriedade. Higroscópica da madeira, as propriedades reativas físicas e químicas dos materiais, sistemas complexos eletromecânicos, a memória de forma dos materiais e aproveitando as funções de sensores ou atuadores perante estímulos do ambiente.

#### 1.3.4. Síntese

Nesta tese, serão adotadas as proposições a seguir:

Nicholas Negroponte formulou a frase “Arquitetura Responsiva” no ano de 1975;

A “Arquitetura Responsiva” é uma arquitetura dinâmica que implica mudança física e autônoma por meio de dispositivos computacionais-eletromecânicos ou naturais de recepção-processamento-atuação nos espaços ou estruturas construídas para regular o impacto dos fatores ambientais externos e melhoria do ambiente interno para as atividades dos usuários;

Beesley, Hirose e Ruxton (2006, citados por DEWINDAR, MOHAMED, ASHOUR, 2013, p.3) assinalam que os Sistemas Responsivos podem ser naturais ou artificiais e, que podem interagir ou se adaptar a determinadas condições;

Os Sistemas Responsivos podem ser desenvolvidos aproveitando a propriedade. Higroscópica da madeira, as propriedades reativas físicas e químicas dos materiais, sistemas complexos eletromecânicos, a memória de forma dos materiais e aproveitando as funções de sensores ou atuadores perante estímulos do ambiente.

## 1.4. Fabricação com Robótica na Arquitetura

Este tópico tem por objetivo estabelecer um referencial sobre a Fabricação com Robótica na Arquitetura. Nesse objetivo, aqui são revisadas questões sobre antecedentes, programação de robôs industriais, programação de robôs industriais para o desenho arquitetônico, referentes na fabricação com robô industrial na arquitetura e, uso de robôs industriais na arquitetura e no *Design*.

### 1.4.1 Antecedentes

Os autores assinalam que a construção com robôs industriais foi iniciada na década de 1980 na indústria da Construção no Japão e que arquitetos e pesquisadores desde o início do século XXI estão explorando novas aplicações na Construção.

Campos (2016, p.32) assinalou que a Construção utilizando robôs só surgiu a partir da década de 1980 na indústria da Construção no Japão. O autor indicou que essa utilização foi interrompida devido a algumas conclusões desfavoráveis e mudanças na economia do Japão. Mas em relação à reaparição da robótica na construção, o autor também indicou que ela ocorreu por volta do ano de 2005 na Suíça. O autor assinalou que os grandes representantes da reaparição na Europa foram os arquitetos Gramazio e Kohler, investigadores no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique – ETHZ. Gramazio, Kohler e Willian (2014, p.10, citados por CAMPOS, 2016, p.36) assinalaram que criaram o primeiro laboratório robótico para realizar investigações em arquitetura e processos de fabricação com o intuito de explorar as implicações no desenho com os processos de construção robótica e não com o objetivo de racionalizar ou automatizar os processos de construção existentes.

Sousa (2014, p.5) assinalou que desde o início do século XXI, arquitetos e pesquisadores têm explorado novas aplicações da robótica na indústria da construção. A impressão 3D e a construção com tecnologias robóticas são desafios que ainda estão sendo perseguidos na arquitetura.

Assim, sendo que a Construção com robôs industriais foi iniciada no Japão na década de 1980, que arquitetos e pesquisadores estão explorando novas aplicações da robótica na indústria da Construção desde o início do século XXI; em tal situação, nesta tese, será adotado que a Construção com Robótica Industrial foi iniciada no Japão na década de 1980 e arquitetos e pesquisadores desde o início do século XXI estão explorando novas aplicações da robótica na indústria da Construção.

#### 1.4.2 Programação de Robôs Industriais

Os autores assinalam que os robôs industriais podem ser programados em *online* ou *off-line*. Tal como é apresentado a seguir:

Braumann e Brell-Cokcan (2011, p.243) apresentaram 2 estratégias de programação de robôs industriais da marca *KUKA*: programação *online*/automática e programação *off-line*/programação manual: 1) A programação *online* é realizada utilizando a linguagem robótica *KUKA (KRL)* e que é similar à linguagem de programação Pascal e que é utilizada para controlar robôs e, 2) A programação *off-line* é realizada em um computador fora da célula robótica. No computador é gerado o *G-Code* e logo é usado um *post-processor* conhecido como *KUKA SimPro/CAMRob*.

Assim, sendo que os robôs industriais podem ser programados em *online* utilizando a linguagem do robô, que podem ser programados em *off-line* utilizando um computador externo para gerar o *G-Code* e logo aplicar o *post-processor*; em tal situação, nesta tese, será adotado que os robôs podem ser programados em *online* utilizando a linguagem de programação própria ou podem ser programados em *off-line* utilizando um computador externo para gerar o *G-Code* e logo aplicar o *post-processor*.

#### 1.4.3 Programação de Robôs Industriais para o Desenho Arquitetônico

Braumann e Brell-Cokcan assinalam que os Robôs Industriais no Desenho Arquitetônico podem ser programados em *off-line*, via scripts customizados ou definição em *Grasshopper*.

Braumann e Brell-Cokcan (2011, p.244) assinalaram que a localização do robô tem que ser controlada com precisão por meio de um sistema de Coordenadas Cartesianas. Os autores assinalaram 2 formas de programação dos robôs industriais: 1) A Programação *Off-line* via scripts customizados e, 2) A Programação *Off-line* via definição *Grasshopper*.

Assim, sendo que os autores assinalaram que os Robôs Industriais podem ser programados no Desenho Arquitetônico em *off-line*, via *scripts* customizados e definição *Grasshopper*; em tal situação, nesta tese, será adotado que os Robôs Industrializados podem ser utilizados no Desenho e Fabricação de componentes arquitetônicos sendo programados em *off-line*, via *scripts* customizados ou definição *Grasshopper*.

#### 1.4.4 Referentes na Fabricação com Robô Industrial na Arquitetura

Os autores assinalam que os referentes do uso de Robôs na Arquitetura se encontram na Europa e se remonta ao ano de 2005. Os referentes se encontram no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHZ) e na Universidade Técnica de Viena.

Chiarella, Barentin e Böhme (2013, p.440) apontaram como referentes na Fabricação com Robôs na Arquitetura 2 grupos de pesquisa europeus: 1) Fabio Gramazio e Matthias Kohler do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHZ) em Zurique na Suíça e, 2) A Associação de Robôs na Arquitetura da Universidade Técnica de Viena em Viena em Áustria. Onde, Sigrid Brell-Cokcan e Johannes Braumann lideram o grupo e desenvolveram o software de controle paramétrico robótico *KUKA (KUKAprc)*.

Gramazio e Kolher (2008, citados por SOUSA, XAVIER, 2015, p.143) apresentaram seus primeiros trabalhos com exploração de robôs industriais no ano de 2005.

Assim, sendo que os autores assinalam que os referentes na Europa são Gramazio e Kolher (Instituto Federal de Tecnologia de Zurique na Suíça) e, Brell-Cokcan e Braumann (Universidade Técnica de Viena na Áustria), que Gramazio e Kolher apresentaram as primeiras explorações do uso de Robôs na Arquitetura no ano de 2005; em tal situação, nesta tese, será adotado que os referentes no uso de robôs na arquitetura se encontram na Suíça e na Áustria e as primeiras experiências de seu uso vêm do ano de 2005.

#### 1.4.5 Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e no *Design*

Os autores têm desenvolvido ferramentas digitais paramétricas para aproximar os robôs industriais dos arquitetos. Essas ferramentas têm permitido projetar e fabricar artefatos e estruturas de formas geométricas complexas. Formas complexas que têm exigido o desenvolvimento de diferentes dispositivos para serem utilizados nos flanges dos braços robóticos industriais. Dispositivos que têm permitido explorar novos materiais e novos processos de fabricação de componentes para a arquitetura. Explorações que têm sido compartilhadas em eventos de Fabricação Robótica na Arquitetura, Arte e *Design*.

##### 1.4.5.1 *Desenvolvimento de Ferramenta Digital Paramétrica para uso em Braço Robótico Industrial*

Desde finais da década dos anos 2000, os autores têm desenvolvido ferramentas digitais paramétricas para o design e fabricação de artefatos utilizando robôs industriais da marca *KUKA*.

Stumm, Braumann e Brell-Cokcan (2016) apresentaram uma ferramenta de programação intuitiva para realizar tarefas de construção.

Braumann, Stumm, Brell-Cokcan (2016) apresentaram experiências no desenvolvimento de novas ferramentas de Design Robótico.

Braumann e Brell-Cokcan (2015) apresentaram uma forma de trabalho paramétrico diretamente do *Design* para o robô industrial *KUKA*.

Brell-Cokcan e Braumann (2015) apresentaram uma experiência de desenvolvimento de ferramenta digital paramétrica para controlar braço robótico industrial.

Brell-Cokcan e Braumann (2014) apresentaram experiências do uso de robô industrial na fabricação de artefatos de *design* criativo.

Brell-Cokcan e Braumann (2010) apresentaram uma ferramenta de design paramétrico para controlar a usinagem realizada com braço robótico industrial da marca *KUKA*.

Brell- Cokcan (2009) apresentou uma experiência de *design* digital e produção digital utilizando um braço robótico industrial de 7 eixos.

#### *1.4.5.2 Fio Quente em Braço Robótico Industrial*

Desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências explorando o uso de fio quente em braço robótico industrial para fabricação de superfícies de dupla curvatura.

Rust, Gramazio e Kohler (2016) apresentaram uma experiência de fabricação de uma superfície de dupla curvatura com corte de fio quente adaptativo.

Rust et al. (2016) apresentaram uma experiência de fabricação robótica com corte de fio quente utilizando dois braços robóticos com 6 eixos de movimentação.

McGee, Feringa e Søndergaard (2013) apresentaram algumas experiências de fabricação de componentes arquitetônicos com robótica utilizando fio quente.

#### *1.4.5.3 Construção de Muros com Tijolo com Braço Robótico Industrial*

Desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de construção de muros de tijolo utilizando braços robóticos industriais.

Sousa, Varela e Martins (2015) apresentaram uma experiência de construção de muros com tijolo utilizando braço robótico industrial.

Vomhof et al. (2014) apresentaram a experiência da construção de um muro acústico de tijolo com robô industrial.

#### *1.4.5.4 Montagem e Usinagem de Estruturas em Madeira com Braço Robótico Industrial*

Desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de fabricação de estruturas em madeira utilizando braços robóticos industriais.

Adel et al. (2018) apresentaram uma experiência de fabricação de uma estrutura em madeira utilizando braço robótico industrial *KUKA*.

Hornung et al. (2015) apresentaram uma experiência de uso de braço robótico industrial para processos de fabricação utilizando usinagem em madeira.

#### *1.4.5.5 Dispositivos de Impressão 3D em Braço Robótico Industrial*

Desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de impressão 3D utilizando braços robóticos industriais e robô controlado por cabos paralelos.

Kontovourkis e Tryfonos (2018) apresentaram uma experiência de integração do desenho paramétrico com impressão 3D em braço robótico industrial.

Raghavan, Neethu e Ajijoy (2017) apresentaram uma experiência de impressão 3D utilizando braço robótico industrial.

Trommelen et al. (2017) apresentaram uma experiência de implementação de um dispositivo de impressão 3D em braço robótico industrial com *hardware e software arduino*.

Izard et al. (2017) apresentaram uma experiência de impressão 3D a larga escala com robô controlado por cabos paralelos.

Ishak e Larochelle (2017) apresentaram uma experiência de impressão 3D utilizando robô industrial.

Ishak, Fisher e Larochelle (2016) apresentaram uma experiência de fabricação aditiva utilizando braço robótico de 6 eixos.

Swanson, Spurgeon e Vass (2016) apresentaram uma experiência de impressão 3D utilizando braço robótico industrial.

#### *1.4.5.6 Conformação de Superfícies de Dupla Curvatura a Frio utilizando Braço Robótico Industrial*

Desde meados da década de 2010, os autores têm iniciado a conformação de superfícies de dupla curvatura em metal a frio utilizando braço robótico industrial.

Lublasser et al. (2016) apresentaram uma experiência de fabricação de formas 3D e estruturas por pressão em metal utilizando braço robótico industrial.

#### *1.4.5.7 Fabricação de Estruturas Leves em Concreto utilizando Braço Robótico Industrial*

Desde final da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de construção de estruturas leves de concreto utilizando braços robóticos industriais.

Szabo et al. (2019) apresentaram uma experiência de construção de estruturas leves de concreto utilizando formas controladas por braço robótico industrial.

Taha et al. (2019) apresentaram uma experiência de pulverizador de concreto controlado por braço robótico industrial.

#### *1.4.5.8 Uso da plataforma Arduino, Linguagem de Programação e Modelagem 3D com Braços Robóticos Industriais*

Desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências do uso da plataforma *arduino*, linguagens de programação de scripts e códigos gráficos e, *softwares* de modelagem 3D com braços robóticos industriais.

Dubor et al. (2016) apresentaram uma experiência de sistema de controle de percurso de ferramenta robótica com sensores. Os autores também apontaram que o hardware e *software* da plataforma *arduino*, conjuntamente com o uso de softwares como *Grasshopper 3D*, *Rhinoceros 3D* e *Processing* abriram novas estratégias para de manipulação robótica para dar suporte a processos de fabricação robótica.

Braumann e Brell-Cokcan (2012) apresentaram uma experiência do uso da plataforma *arduino* para controlar robôs industriais na arquitetura.

#### 1.4.5.9 Uso de Célula Robótica Móvel na Construção *in situ*

Desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de montagem de estruturas e construção *in situ*.

Devadass, Stumm e Brell-Cokcan (2019) apresentaram uma experiência de montagem de uma estrutura com um braço robótico industrial móvel.

Dai, Kerber e Brell-Cokcan (2019) apresentaram uma experiência de montagem de uma estrutura de metal utilizando braço robótico industrial.

Helm et al. (2012) apresentaram uma experiência da utilização de um robô móvel na construção *in situ*.

#### 1.4.5.10 Eventos de Fabricação com Robôs na Arquitetura

Desde os primeiros anos da década de 2010, o evento de “Fabricação Robótica em Arquitetura, Arte e *Design*” organiza e sistematiza palestras, pesquisas, oficinas, projetos e experiências na indústria.

Willmann et al. (2018) apresentaram uma sistematização de experiências de Fabricação com Robôs na Arquitetura, Arte e *Design* em 5 vertentes: design e simulação, material e processos, construção e estrutura, controle e fabricação, aplicação e prática.

Reinhardt, Saunders e Burry (2016) apresentaram uma sistematização de experiências de Fabricação com Robôs na Arquitetura, Arte e *Design* em 5 vertentes: palestras, artigos científicos, projetos, oficinas e, artigos da indústria.

McGee e Leon (2014) apresentaram uma sistematização de experiências de Fabricação com Robôs na Arquitetura, Arte e *Design* em 4 vertentes: artigos científicos, projetos, oficinas e, artigos da indústria.

Brell-Cokcan e Braumann (2012) apresentaram uma sistematização de experiências de Fabricação com Robôs na Arquitetura, Arte e *Design* em 5 vertentes: palestras, oficinas, projetos, artigos científicos, artigos da indústria.

#### *1.4.5.11 Observações do Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e Design*

Assim:

Sendo que desde finais da década dos anos 2000, os autores têm desenvolvido ferramentas digitais paramétricas para o design e fabricação de artefatos utilizando robôs industriais da marca *KUKA*;

Sendo que desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências explorando o uso de fio quente em braço robótico industrial para fabricação de superfícies de dupla curvatura;

Sendo que desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de construção de muros de tijolo utilizando braços robóticos industriais;

Sendo que desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de fabricação de estruturas em madeira utilizando braços robóticos industriais;

Sendo que desde meados da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de impressão 3D utilizando braços robóticos industriais e robô controlado por cabos paralelos;

Sendo que desde meados da década de 2010, os autores têm iniciado a conformação de superfícies de dupla curvatura em metal a frio utilizando braço robótico industrial;

Sendo que desde final da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de construção de estruturas leves de concreto utilizando braços robóticos industriais;

Sendo que desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências do uso da plataforma arduino, linguagens de programação de scripts e códigos gráficos e, softwares de modelagem 3D com braços robóticos industriais;

Sendo que desde os primeiros anos da década de 2010, os autores têm desenvolvido experiências de montagem de estruturas e construção *in situ*;

Sendo que desde os primeiros anos da década de 2010, o evento de “Fabricação Robótica em Arquitetura, Arte e Design” organiza e sistematiza palestras, pesquisas, oficinas, projetos e experiências na indústria.

Em tal situação, nesta tese, será adotado que:

Os autores têm utilizado Ferramentas Digitais Paramétricas para uso em Braços Robóticos Industriais desde o ano de 2009;

Os autores têm utilizado a Plataforma *Arduino*, Linguagens de Programação, Modelagem 3D, células robóticas móveis e organizado eventos de robótica na arquitetura desde o ano de 2012;

Os autores têm utilizado o Fio Quente em Braço Robótico Industrial desde o ano de 2013;

Os autores têm construído muros com tijolo utilizando braços robóticos industriais desde o ano de 2014;

Os autores têm montado e usinado estruturas em madeira com braço robótico industrial desde 2015;

Os autores têm utilizado dispositivos de impressão 3D e dispositivos para conformação de superfícies de dupla curvatura em braços robóticos industriais desde o ano de 2016;

Os autores têm fabricado estruturas leves de concreto utilizando braços robóticos industriais desde o ano de 2019.

#### 1.4.6 Síntese

Nesta tese, serão adotadas as proposições a seguir:

A Construção com Robótica Industrial foi iniciada no Japão na década de 1980 e arquitetos e pesquisadores desde o início do século XXI estão explorando novas aplicações da robótica na indústria da Construção;

Os Robôs podem ser programados em online utilizando a linguagem de programação própria ou podem ser programados em off-line utilizando um computador externo para gerar o *G-Code* e logo aplicar o *post*-processador;

Os Robôs Industrializados podem ser utilizados no Desenho e Fabricação de componentes arquitetônicos sendo programados em *off-line*, via *scripts* customizados ou definição *Grasshopper*;

Os referentes no uso de robôs na arquitetura se encontram na Suíça e na Áustria e as primeiras experiências de seu uso vêm do ano de 2005;

Tabela 1: Linha do tempo do Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e no Design

Ano	Uso de Robôs Industriais na Arquitetura e no <i>Design</i>
2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento de Ferramenta Digital Paramétrica para uso em Braço Robótico Industrial.</li> </ul>
2010	
2011	
2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso da Plataforma <i>Arduino</i>, Linguagem de Programação e Modelagem 3D com Braços Robóticos Industriais.</li> <li>• Uso de Célula Robótica Móvel na Construção <i>in situ</i>.</li> <li>• Eventos de Fabricação com Robôs na Arquitetura.</li> </ul>
2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fio Quente em Braço Robótico Industrial.</li> </ul>
2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção de Muros com Tijolo com Braço Robótico Industrial.</li> </ul>
2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montagem e Usinagem de Estruturas em Madeira com Braço Robótico Industrial.</li> </ul>
2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositivos de Impressão 3D em Braço Robótico Industrial.</li> <li>• Conformação de Superfícies de Dupla Curvatura a Frio utilizando Braço Robótico Industrial.</li> </ul>
2017	
2018	
2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de Estruturas Leves em Concreto utilizando Braço Robótico Industrial.</li> </ul>

## 1.5. Arduino

Este tópico tem por objetivo estabelecer um referencial sobre a Plataforma *Arduino* na Arquitetura. Nesse objetivo, aqui são revisadas questões sobre definição do *arduino*, *hardware* e software da Plataforma *Arduino*, linguagem de programação da placa *arduino*, experiências do uso da Plataforma *Arduino* na Arquitetura.

### 1.5.1 Definição de *Arduino*

Os autores não apresentam acordo na definição do *Arduino*. Os autores apontam que é um processador, um microcontrolador, uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto, uma plataforma eletrônica, um pequeno computador ou uma ferramenta para criar computadores. Embora um dos criadores do *Arduino*, Banzi, assinala que é uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto e na qual podem ser conectados dispositivos para interagir com o ambiente do entorno.

Alguns autores assinalam que o *arduino* é um processador que recebe dados do ambiente exterior e os transforma em sinais elétricos. TUTORIAL (2017, p.3) assinalou que o *arduino* é um *kit* de desenvolvimento que pode ser visto como uma unidade de processamento de variáveis do ambiente externo e transformá-las em um sinal elétrico por meio de sensores.

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma plataforma microcontroladora de código aberto para prototipagem eletrônica composta por *hardware* e *software*, de fácil uso, na qual podem ser conectados sensores e atuadores e, onde o microcontrolador pode ser programado. FUNDUINO (2016, p.3) assinalou que o *arduino* é uma base para prototipagem eletrônica de código aberto para uso de *hardwares* e *softwares* no campo dos microcontroladores. Evans (2016, p.1) assinalou que o *arduino* é uma plataforma *hardware* programável projetada para artistas, *designers*, consertadores de coisas e criadores de coisas. Organtini (2016, p. 6) assinalou que o *arduino* é uma placa eletrônica com um microcontrolador e algumas capacidades. Organtini apontou que existem várias versões que usam a mesma linguagem de programação. Organtini também assinalou que o *hardware* e *software* são códigos abertos e

podem ser modificados pelo usuário segundo as necessidades. Chung (2011, p.52) assinalou que o *arduino* é uma plataforma de prototipagem eletrônica baseada na flexibilidade e fácil uso de *hardware* e *software*. É um microcontrolador que pode receber informações de uma variedade de sensores e pode modificar seu entorno pelo controle de atuadores. O microcontrolador pode ser programado. Sanchez (2010, p.290) assinalou que o *arduino* é uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto capaz de receber informações de diferentes sensores e alterar seu entorno pelo controle de dispositivos eletrônicos. ARDUINO (p.14) assinalou que o *arduino* é uma plataforma de eletrônica aberta para criação de protótipos baseados em *softwares* e *hardwares* livres, flexíveis e fáceis de usar. A plataforma foi desenvolvida para artistas, *designers*, *hobistas* e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. FREBS (p.7) assinalou que o *arduino* é uma plataforma flexível de código aberto de *hardware* e *software* para prototipagem eletrônica. A plataforma foi destinada a *designers*, *hobistas*, técnicos, engenheiros e pessoas interessadas em criar projetos ou ambientes interativos.

Um dos criadores do *arduino* assinala que é uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto e na qual podem ser conectados dispositivos para interagir com o ambiente do entorno. Banzi (2011,citado por NERI, 2014, p. 3) assinalou que o *arduino* é uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto para criação de dispositivos que podem interagir com o ambiente através de sensores de temperatura, sensores de som, *leds*, motores, *displays*, alto-falantes, entre outros.

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *software* de fácil uso na qual podem ser conectados sensores e atuadores. Sharaidin (2014, p.x) assinalou que o *arduino* é uma plataforma eletrônica de código aberto baseado em *software* de fácil uso. Foi criado para explorar projetos interativos por *designers*. Na plataforma *arduino* informações captadas por sensores podem ser transformadas e enviadas para atuadores e afetar seu entorno.

Alguns autores assinalam que o *arduino* é um computador pequeno no qual podem ser conectados dispositivos eletrônicos. Monk (2014, p.1) assinalou que é uma placa de microcontrolador que contém um conector *USB* que permite ligá-la a um computador, além de diversos pinos que permitem a conexão com circuitos eletrônicos externos, como motores, relés, sensores, luminosos, diodos laser, alto-falantes, microfones, etc. McRoberts (2011, p. 22) assinalou que o *arduino* é um pequeno computador que pode ser programado para

processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Calvacante (2011, citado por NERI, 2014, p.3) assinalou que o *arduino* é uma placa de circuitos com entradas e saídas para um microcontrolador.

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma ferramenta para criar computadores para controlar o mundo físico. INTERACTIVE (p.1) assinalou que o *arduino* é uma ferramenta que cria computadores que podem ser capazes de detectar e controlar o mundo físico mais do que a área de trabalho do computador.

Assim, sendo que:

Alguns autores assinalam que o *arduino* é um processador que recebe dados do ambiente exterior e os transforma em sinais elétricos;

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma plataforma microcontroladora de código aberto para prototipagem eletrônica composta por *hardware* e *software*, de fácil uso, na qual podem ser conectados sensores e atuadores e, onde o microcontrolador pode ser programado;

Um dos criadores do *arduino*, Banzi, assinala que é uma plataforma de *hardware* e *software* de código aberto e na qual podem ser conectados dispositivos para interagir com o ambiente do entorno;

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *software* de fácil uso, e na qual podem ser conectados sensores e atuadores;

Alguns autores assinalam que o *arduino* é um computador pequeno no qual podem ser conectados dispositivos eletrônicos e;

Alguns autores assinalam que o *arduino* é uma ferramenta para criar computadores para controlar o mundo físico;

Em tal situação, nesta tese, será adotado que:

Concordando com Banzi - um dos criadores do *arduino* - o *arduino* é uma plataforma microcontroladora (mini computador) de *hardware* e *software* de código aberto para prototipagem eletrônica. Onde, o processador pode ser controlado por um código escrito na linguagem de programação própria, *arduino*, no ambiente de desenvolvedor integrado - *IDE*.

E na qual podem ser conectados dispositivos de sensoriamento e atuação para controlar o mundo físico.

### 1.5.2 Hardware e Software da Plataforma Arduino

Os autores assinalam que o *Arduino* é composto por hardware e software de código aberto. O Hardware é uma placa eletrônica microcontrolada com dispositivos para alimentação, conexão com computador, saídas de energia, saídas digitais e entradas analógicas e; o software é um ambiente de desenvolvedor integrado - *IDE* - no qual se encontram capacidades como criar um *sketch*, verificar um *sketch*, carregar um *sketch*, abrir um *sketch*, salvar um *sketch* e mostrar o monitor serial.

Souza (2017, p.17) assinalou que o *Arduino* é constituído de uma placa eletrônica e um ambiente de desenvolvimento integrado – *IDE*. A placa eletrônica (*Arduino Uno*) conta com um dispositivo para alimentação, uma porta *USB*, um microcontrolador *ATmega328*, saídas de energia de 3,3 *volts* e 5 *volts*, entradas analógicas e, saídas digitais. Onde, o dispositivo de alimentação é utilizado quando se deseja usar a placa sem um computador. A porta *USB* serve para estabelecer contato da placa com o computador e também serve como fonte de alimentação da placa. O microcontrolador *ATmega328* é o cérebro da placa e é o componente que processa os dados e armazena programas. O microcontrolador é uma CPU com *clock* de 20 MHz, 8 bits e 32 kB de memória *flash*. As saídas de 3,3 *volts* e 5 *volts* alimentam dispositivos com 3,3 *volts* e 5 *volts*. As entradas analógicas recebem os dispositivos atuadores. As saídas digitais recebem os dispositivos sensores.

O ambiente de desenvolvimento integrado - *IDE* – consta de 6 botões: verificar, carregar, novo, abrir, salvar e monitor serial. O botão “Verificar” compila o *sketch*, verificando os erros de sintaxe do seu código. O botão “Carregar” compila e armazena o código na placa *arduino*. O botão “Novo” cria um novo *sketch*. O botão “Abrir” abre um *sketch* salvo previamente. O botão “Salvar” salva o *sketch*. O botão “Monitor Serial” abre o monitor serial para ler o valor armazenado em uma dada variável.

Banzi e Shiloh (2015, p.15) assinalaram que o *arduino* está composto por duas partes. A placa *Arduino* que é o hardware onde são construídos os objetos. O Ambiente de desenvolvimento integrado *arduino - IDE* – é o software onde é criado o *sketch* (pequeno programa para computador) para ser carregado na Placa Arduino.

FREBS (p.8) assinalou que a plataforma *arduino* é formada por dois componentes, *hardware* e *software*. Onde: O *hardware* do *arduino* é uma placa com um circuito eletrônico microcontrolado no qual são conectados componentes para que funcione em forma independente ou se comunique com o computador. O *software arduino* é um ambiente de desenvolvimento integrado que permite criar *sketches* para a placa *arduino*.

Assim, sendo que os autores assinalam que o *arduino* é composto por hardware e software de código aberto, onde o hardware é uma placa eletrônica microcontrolada com dispositivos para alimentação, conexão com computador, saídas de energia, saídas digitais e entradas analógicas e; o software é um ambiente de desenvolvedor integrado - *IDE* - no qual se encontram capacidades como criar um *sketch*, verificar um *sketch*, carregar um *sketch*, abrir um *sketch*, salvar um *sketch* e mostrar o monitor serial; em tal situação, nesta tese, será adotado que o *Arduino* é composto por uma placa eletrônica microcontrolada com dispositivos para alimentação, conexão com computador, saídas de energia, saídas digitais e entradas analógicas e; o *software* é um ambiente de desenvolvedor integrado - *IDE* - no qual se encontram capacidades como criar, verificar, carregar, abrir, salvar e mostrar no monitor serial um *sketch* (pequeno programa).

### 1.5.3 Linguagem de Programação *Arduino*

Os autores não concordam na linguagem de programação do microcontrolador na placa *arduino*. Alguns autores assinalam que a linguagem de programação da placa *arduino* é a linguagem C, alguns assinalam que a placa *arduino* é programada na linguagem *arduino* e, outros autores assinalam que a placa *arduino* é programada na linguagem *processing*; mas um dos criadores da Plataforma *Arduino*, Banzi, aponta que o *IDE* é programado na linguagem *processing* mas o *sketch* é programado na linguagem C.

Souza (2017, p.22) assinalou que a linguagem *arduino* é um conjunto de funções específicas em linguagem C para programar o microcontrolador da placa *arduino*.

Banzi e Shiloh (2015, p.19) assinalaram que o *arduino* é programado na linguagem C, mas o ambiente de desenvolvedor integrado é programado na linguagem *processing*.

Sharaidin (2014, p.x) assinalou que o *arduino* pode ser programado por um código escrito na linguagem de programação própria do *arduino*.

Chung (2011, p.52) assinalou que o microprocessador do *arduino* é programado pela linguagem de programação própria do *arduino* no ambiente de desenvolvimento integrado – *IDE*.

Sanchez (2010, p.290) assinalou que o microprocessador do *arduino* pode ser controlado por um código escrito na linguagem de programação própria do *arduino*.

FREBS (p.8) assinalou que o microprocessador *arduino* pode ser programado a partir da linguagem *processing*.

Assim, sendo que alguns autores assinalam que o microcontrolador da placa *arduino* é programada na linguagem C, que alguns autores assinalam que a placa *arduino* é programada na linguagem *arduino* e, que outros assinalam que a placa *arduino* é programada na linguagem *processing*; em tal situação, nesta tese, será adotado que concordando com um dos criadores do *arduino*, Banzi, a placa *arduino* é programada na linguagem C.

#### 1.5.4 Experiências do uso da Plataforma *Arduino* na Arquitetura

Desde o início da segunda década do século XXI, os autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente com outros softwares para o desenho, prototipagem e fabricação de diferentes dispositivos para Sistemas Paramétricos, Cinéticos, interativos, de Construção Inteligente ou Biodinâmicos para uso nas fachadas das edificações.

Desde o ano de 2013, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente com a definição *Grasshopper* para o desenho e prototipagem de diferentes dispositivos responsivos

autônomos ou controlados por computador para o desenvolvimento de Sistemas Interativos, de Controle Manual, de Material Responsivo e, Cinéticos Autônomos para uso nas fachadas das edificações. Shemirani (2017) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* e *Grasshopper* no desenvolvimento de um Sistema de Fachada Interativo. O sistema consistiu do desenho e prototipagem de um dispositivo responsivo. Tashakori (2014) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* e *Grasshopper* no desenvolvimento de um Sistema de Sombreamento de Fachada. O sistema consistiu do desenho e prototipagem de um dispositivo controlado por computador. Khoo (2014) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* e *Grasshopper* no desenvolvimento de um Sistema de Material Responsivo. O sistema consistiu de desenho e prototipagem de um dispositivo responsivo. Grobman e Yekutieli (2013) apresentaram uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* e *Grasshopper* no desenvolvimento de um Sistema Cinético Autônomo para fachadas. O sistema consistiu do desenho e prototipagem de dois dispositivos cinéticos autônomos para serem utilizados em fachadas.

Desde o ano de 2011, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente e principalmente com os softwares de modelagem 3D, *Rhinoceros*, a definição *Grasshopper*, o software *Firefly*, o software *Autodesk Ecotect Analysis*, dentre outros, para o desenho, prototipagem virtual e prototipagem ou fabricação física de diferentes dispositivos responsivos autônomos e de controle manual no para o desenvolvimento de Sistemas Cinéticos, de Construção Inteligente, Biodinâmicos Adaptativos e Responsivos para uso nas fachadas das edificações. Sharaidin (2014) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino*, *Raspberry Pi*, *Rhinoceros*, *Grasshopper*, *Firefly*, *Autodesk Ecotect Analysis*, *Climate Consultant 5.5*, *Touch OSC*, *Galapagos* no desenvolvimento de um Sistema de Fachada Cinética. O sistema consistiu no desenho e prototipagem de um dispositivo responsivo. Park e Bechthold (2013) apresentaram uma experiência do uso da Plataforma *Arduino*, *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *Firefly* no desenvolvimento de um Sistema de construção inteligente inspirado na biologia. O sistema consistiu do desenho e prototipagem de 3 dispositivos responsivos. Chung (2011) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino*, *Rhinoceros*, *Grasshopper* e *Firefly* no desenvolvimento de um Sistema Arquitetônico biodinâmico Adaptativo. O sistema consistiu no desenho de um protótipo virtual de uma estrutura de sombreamento imersiva. Khoo, Burry e Burry (2011) apresentaram uma experiência do uso da Plataforma *Arduino*, *Grasshopper* e *Firefly* no

desenvolvimento de um Sistema Cinético Responsivo. O sistema consistiu no desenho e fabricação de uma pele arquitetônica elástica transformável para controle visual e climático.

Desde o ano de 2010, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* para o desenho, prototipagem e fabricação de diferentes dispositivos cinéticos e responsivos autônomos para o desenvolvimento de Sistemas Responsivos, Paramétricos e Eco-Cinético para uso nas fachadas das edificações. Khoo e Salim (2013) apresentaram uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* no desenvolvimento de um Sistema de Pele Arquitetônica Transformável de Material responsivo. O sistema consistiu no desenho e prototipagem de um sistema cinético transformável responsivo. Liang et al. (2013) apresentaram uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* no desenvolvimento de um Sistema de Superfícies Arquitetônicas Dinâmicas e Responsivas. O sistema consistiu do desenho e prototipagem de um dispositivo dinâmico e Responsivo. Ron (2012) apresentou uma experiência de aplicação da Plataforma *Arduino* e Desenho Paramétrico no desenvolvimento de um Sistema Arquitetônico Eco-Cinético. O sistema consistiu da prototipagem de um dispositivo interativo dinâmico. Sanchez (2010) apresentou uma experiência do uso da Plataforma *Arduino* no desenvolvimento de um Sistema Performativo Paramétrico. O sistema consistiu no desenho e fabricação de uma pele responsiva bioclimática.

Assim, sendo que:

Desde o ano de 2013, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente com a definição *Grasshopper* para o desenho e prototipagem de diferentes dispositivos responsivos autônomos ou controlados por computador para o desenvolvimento de Sistemas Interativos, de Controle Manual, de Material Responsivo e, Cinéticos Autônomos para uso nas fachadas das edificações;

Desde o ano de 2011, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente e principalmente com os softwares de modelagem 3D, *Rhinoceros*, a definição *Grasshopper*, o software *Firefly*, o software *Autodesk Ecotect Analysis*, dentre outros, para o desenho, prototipagem virtual e prototipagem ou fabricação física de diferentes dispositivos responsivos autônomos e de controle manual no para o desenvolvimento de Sistemas Cinéticos, de Construção Inteligente, Biodinâmicos Adaptativos e Responsivos para uso nas fachadas das edificações;

Desde o ano de 2010, alguns autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* para o desenho, prototipagem e fabricação de diferentes dispositivos cinéticos e responsivos autônomos para o desenvolvimento de Sistemas Responsivos, Paramétricos e Eco-Cinético para uso nas fachadas das edificações.;

Em tal situação, nesta tese, será adotado que:

Desde o início da segunda década do século XXI, os autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente com *softwares* de modelagem 3D, de definição paramétrica, de exploração de protótipos físicos e virtuais entre a definição paramétrica e o microcontrolador do *arduino*, de simulação e análises ambientais, dentre outros, para o desenho, prototipagem e fabricação de diferentes dispositivos controlados manualmente, controlados por computador, responsivos autônomos para o desenvolvimento de Sistemas Paramétricos, Cinéticos, Interativos, de Construção Inteligente ou Biodinâmicos para uso nas fachadas das edificações.

#### 1.5.5 Síntese

Nesta tese serão adotadas as proposições a seguir:

Concordando com Banzi - um dos criadores do *arduino* - o *arduino* é uma plataforma microcontroladora (mini computador) de hardware e software de código aberto para prototipagem eletrônica. Onde o processador pode ser controlado por um código escrito na linguagem de programação própria, *arduino*, no ambiente de desenvolvedor integrado - IDE. E na qual podem ser conectados dispositivos de sensoriamento e atuação para controlar o mundo físico;

O *Arduino* é composto por uma placa eletrônica microcontrolada com dispositivos para alimentação, conexão com computador, saídas de energia, saídas digitais e entradas analógicas e; por um software chamado ambiente de desenvolvedor integrado - *IDE* - no qual se encontram capacidades como criar, verificar, carregar, abrir, salvar e mostrar no monitor serial um *sketch* (pequeno programa);

Concordando com um dos criadores do *arduino*, Banzi, a placa *arduino* é programada na linguagem C;

Desde o início da segunda década do século XXI, os autores têm utilizado a Plataforma *Arduino* conjuntamente com softwares de modelagem 3D, de definição paramétrica, de exploração de protótipos físicos e virtuais entre o *software* de definição paramétrica e o microcontrolador do *arduino*, de simulação e análises ambientais, dentre outros, para o desenho, prototipagem e fabricação de diferentes dispositivos controlados manualmente, controlados por computador, responsivos autônomos para o desenvolvimento de Sistemas Paramétricos, Cinéticos, Interativos, de Construção Inteligente ou Biodinâmicos para uso nas fachadas das edificações.

## 2. EXPERIMENTOS

Esta segunda etapa teve por objetivo verificar a hipótese guia da pesquisa a partir de um conjunto de experimentos práticos. Os experimentos que foram realizados nas instalações do Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa (LFDC) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (FAU/UnB), nas instalações do Centro de Aulas Caraíbas da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Campus Samambaia, nas instalações do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás (EMC/UFG) – Setor Universitário e, na própria residência.

Em tal objetivo, 7 experimentos foram estruturados a partir dos temas revisados no referencial teórico da etapa da fundamentação conceitual, os quais são listados a seguir:

- Experimento 1: Projetação e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1;
- Experimento 2: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido;
- Experimento 3: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde;
- Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa;
- Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas;
- Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica;
- Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente.

Onde, os experimentos foram operacionalizados basicamente em 7 aspectos:

- Motivação;
- Hipótese;
- Objetivo Geral e Objetivos Específicos;
- Processo Metodológico;
- Desenvolvimento do Experimento;
- Síntese do Experimento.

## 2.1 Experimento 1: Projetação e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1

### 2.1.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de pavilhão biônico de forma complexa em escala 1:1.

### 2.1.2 Hipótese

As tecnologias digitais – fotografia digital, *software Autodesk recap pro*, *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem digitalizar e projetar um protótipo de pavilhão de forma complexa ou de geometrias não euclidianas na escala 1:1, inspirado nas formas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software coreldraw 7.0*, impressora 3D *Delta*, *software cura 15.04.6*, impressora *reprap uberblock*, impressora *reprap anet a8*, *thunder laser*, *lasercut 5.3*, cortadora a laser de *marca thunder laser* modelo nova 51 mesa de corte de 1400mm x1030mm, cortadora a laser de *marca laser engraving & cutting machine* mesa de corte de 1400mm x1030mm. - permitem a produção do protótipo utilizando papelão de onda simples. Nas cidades de Brasília no Distrito Federal (DF) e Goiânia no Estado de Goiás (GO).

### 2.1.3 Objetivo Geral

Determinar as possibilidades e limitações do processo de projeção, fabricação e construção com técnicas digitais e manuais de um protótipo de pavilhão biônico de forma complexa e celular, com faces de dupla curvatura, na escala 1:1 nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).

#### 2.1.3.1 Objetivos específicos

- Determinar as características geométricas de algumas espécies frutíferas presentes na cidade de Brasília (DF): Atemoia, Buriti, Graviola e Pinha ou fruta do conde;
- Determinar a importância do protótipo rápido da superfície de dupla curvatura (maquete de estudo em papel) para estudo da geometria das espécies frutíferas observadas.
- Determinar a importância da digitalização tridimensional do protótipo rápido da superfície de dupla curvatura na definição paramétrica;
- Determinar a importância da definição paramétrica no processo de projeção;
- Determinar a importância do protótipo rápido de impressão 3D (maquete impressa em 3D pelo processo de depósito de filamento fundido) no planejamento e fabricação do pavilhão biônico de forma complexa em papelão em escala 1:1;
- Determinar as fases de preparação do processo de fabricação do pavilhão biônico de forma complexa em papelão em escala 1:1;
- Determinar as fases do processo de fabricação do pavilhão biônico de forma complexa em papelão em escala 1:1
- Determinar as fases da montagem do pavilhão biônico de forma complexa em papelão em escala 1:1.

#### 2.1.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo têm sido estruturado em 8 fases.

- Seleção e levantamento fotográfico das espécies frutíferas;
- Maquete rápida de papel para estudo das geometrias da superfície de dupla curvatura e dos módulos de fases de dupla curvatura;
- Levantamento fotogramétrico e restituição da maquete rápida de papel;
- Parametrização da restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel;
- Prototipagem da parametrização;
- Planejamento do processo de fabricação;
- Fabricação;
- Montagem do pavilhão.

#### 2.1.5 Desenvolvimento do Experimento

##### *2.1.5.1 Seleção e levantamento fotográfico das espécies frutíferas*

As espécies frutíferas foram selecionadas pela presença na cidade de Brasília e pela peculiaridade das formas na parte exterior dos frutos.

##### *2.1.5.1.1 Seleção das espécies frutíferas*

A seleção das espécies frutíferas começou com o interesse de observar uma espécie frutífera relacionada à cidade de Brasília, como foi o caso do fruto da Palmeira *Mauritia Flexuosa* (REIS et al., 2017; SILVA et al., 2014), Buriti.

Na pesquisa foi encontrado que a Palmeira *Mauritia Flexuosa* ou Palmeira do Buriti é a árvore símbolo da cidade de Brasília. O buriti (fruto) em estado natural não é fácil de se encontrar na cidade de Brasília e nem no Distrito Federal. Supermercados e Feiras da cidade de Brasília e do Distrito Federal foram visitados em procura do fruto do buriti até encontrar aos senhores, Luiz e Rosa Harumi, donos da loja “ANGRA Carnes e Pescados” no CEASA da cidade de Brasília, os quais me forneceram gentilmente alguns frutos extraídos das Palmeiras do Buriti que cresceram na fazenda da sua propriedade.

No interstício da procura pelo fruto do buriti e os frutos do buriti que me foram fornecidos, foram observadas outras espécies frutíferas presentes no CEASA da cidade de Brasília. Essas espécies foram: o fruto do cruzamento da *Annona Cherimola, Mill* e *Annona Squamosa, L.* (SANTOS et al., 2019, CRUZ et al. 2013), conhecido popularmente como atemoia; o fruto da *Annona Muricata* (SACRAMENTO et al., 2003), conhecido popularmente como graviola; o fruto da *Annona Squamosa* (SANTOS, 2014), conhecido popularmente como pinha ou fruta do conde. Essas espécies foram observadas pela peculiaridade das geometrias das formas da parte externa dos frutos.

#### 2.1.5.1.2 Levantamento fotográfico das espécies frutíferas

As espécies frutíferas selecionadas foram fotografadas para determinar as características geométricas. Essa tarefa foi realizada com uma câmera fotográfica de marca DSLR Nikon modelo D600.

As espécies frutíferas selecionadas possuem formas geométricas não euclidianas, na sua maioria são de forma regular, com gomos de diferentes tamanhos e formas, onde os gomos de menor tamanho se apresentam nas curvaturas mais agudas. A atemoia apresentou uma forma não euclidiana, irregular, alongada, com gomos de diferente tamanhos e formas, com gomos de tamanho menor em partes onde as curvaturas são mais agudas. O buriti apresentou uma forma não euclidiana, regular, semi oval, com escamas de diferentes tamanhos, com escamas de menor tamanho nas partes onde as curvaturas são mais agudas. A graviola apresentou uma forma não euclidiana, regular, com gomos com espinhos, com gomos de menor tamanho na parte onde a curvatura é mais aguda. A pinha ou fruta do conde apresentou uma forma não

euclidiana, regular, arredondada, com gomos de diferentes tamanhos e formas, com gomos de menor tamanho onde a curvatura é mais aguda.



(a) Atemoia (fruto do cruzamento da *Annona Cherimola*, Mill e *Annona Squamosa*, L.)



(b) Buriti (fruto da Palmeira *Mauritia Flexuosa*)



(c) Graviola (fruto da *Annona Muricata*)



(d) Pinha (fruto da *Annona Squamosa*)

Figura 1: Espécies frutíferas selecionadas. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.1.3 Digitalização e restituição fotogramétrica das espécies frutíferas

Após das espécies frutíferas selecionadas serem fotografadas para determinar as características geométricas. As espécies frutíferas foram digitalizadas utilizando a técnica de restituição fotogramétrica e definição de contornos de imagens. A restituição fotogramétrica foi realizada com uma câmera fotográfica de marca DSLR Nikon modelo D600 e o *software Autodesk Recap* e, a definição de contornos das imagens foi realizada com o *software Coreldraw 7.0*.

As espécies frutíferas da atemoia, graviola e pinha - foram restituídas fotogrametricamente a partir de 60 fotografias tiradas de cada espécie e, a espécie frutífera do buriti foi digitalizada a partir da definição dos contornos das escamas. A digitalização das espécies frutíferas foi realizada com o propósito de estudar as geometrias não euclidianas dos gomos e escamas para sua posterior representação tridimensional.

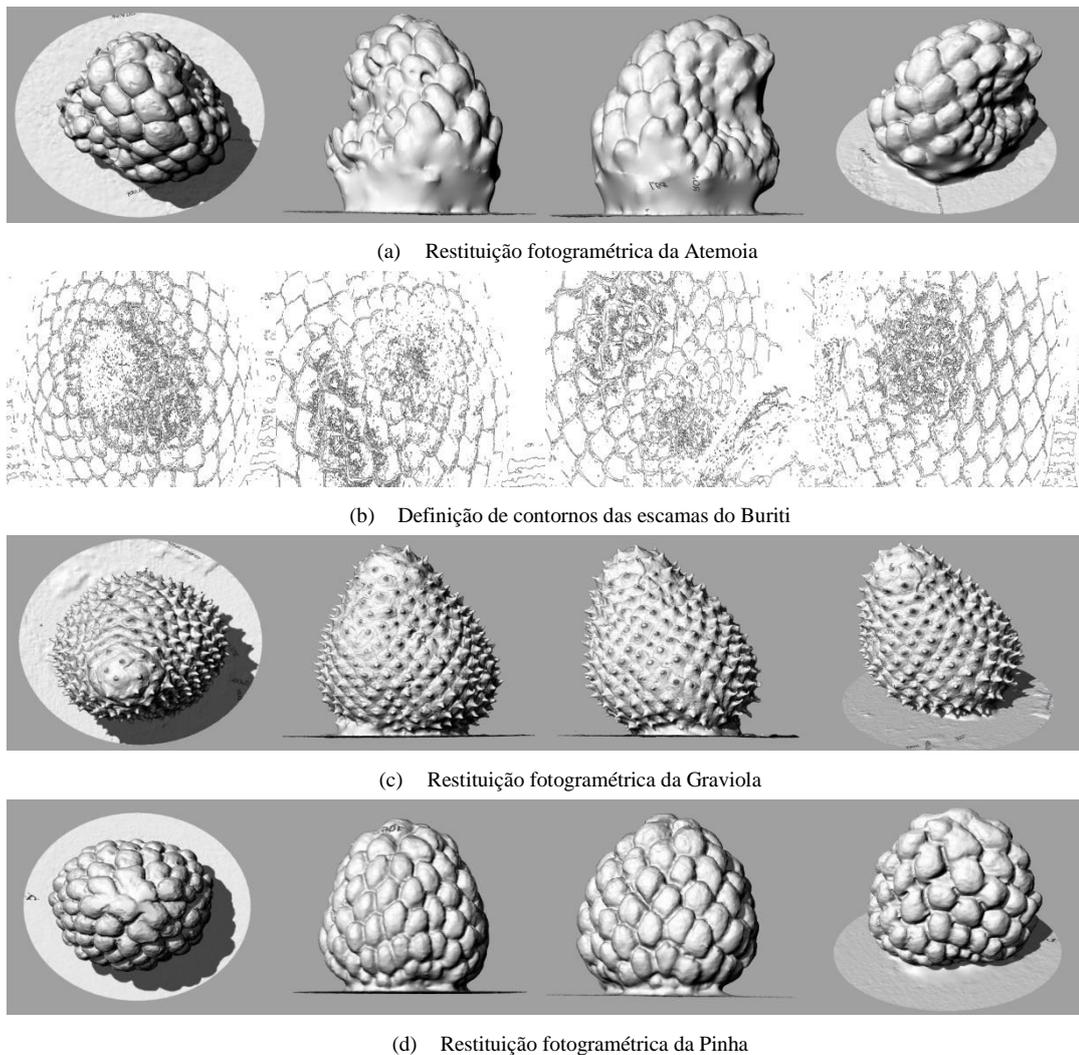


Figura 2: Digitalização e restituição fotogramétrica das espécies frutíferas. Fonte: Própria

#### 2.1.5.1.4 Representação tridimensional do módulo e superfície

A representação tridimensional foi o resultado da análise dos módulos, organização dos módulos e variação do tamanho e forma dos módulos na superfície de dupla curvatura. Onde

foi observado que os módulos modificam seu tamanho e forma dependendo da forma das curvaturas da superfície que conformam.

#### *2.1.5.1.4.1 Representação tridimensional do módulo*

A partir do estudo da organização e tamanho dos gomos e escamas das espécies frutíferas, foi realizada a análise bidimensional da geometria dos módulos, organização dos módulos e variação do tamanho e forma dos módulos. Na análise foi observada a variação do tamanho e forma dos módulos segundo a curvatura da superfície que formam.

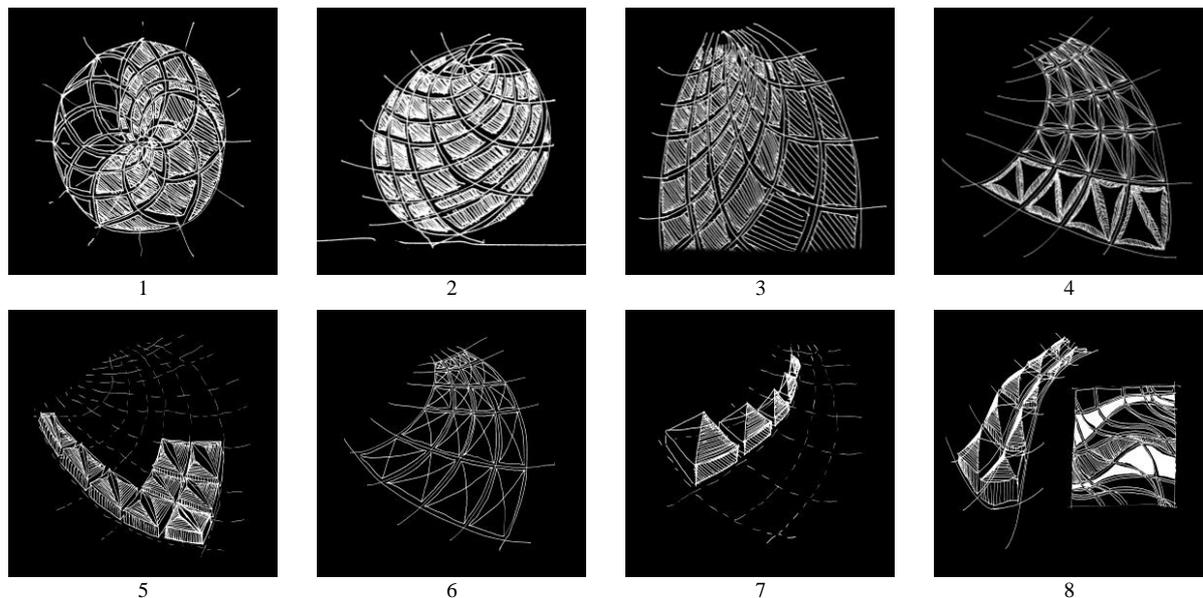


Figura 3: Interpretação das geometrias das espécies frutíferas. Fonte Própria.

#### *2.1.5.1.4.2 Representação tridimensional da superfície*

Após a definição do padrão do módulo, organização dos módulos e variação do tamanho dos módulos foi realizada a análise bidimensional da geometria da superfície de dupla curvatura. Na análise foi observada que a forma da superfície de dupla curvatura depende de um

conjunto de curvas tridimensionais dispostas em duas direções (eixos: x,y) ou no mínimo de das 4 curvas tridimensionais que definem o perímetro da superfície.

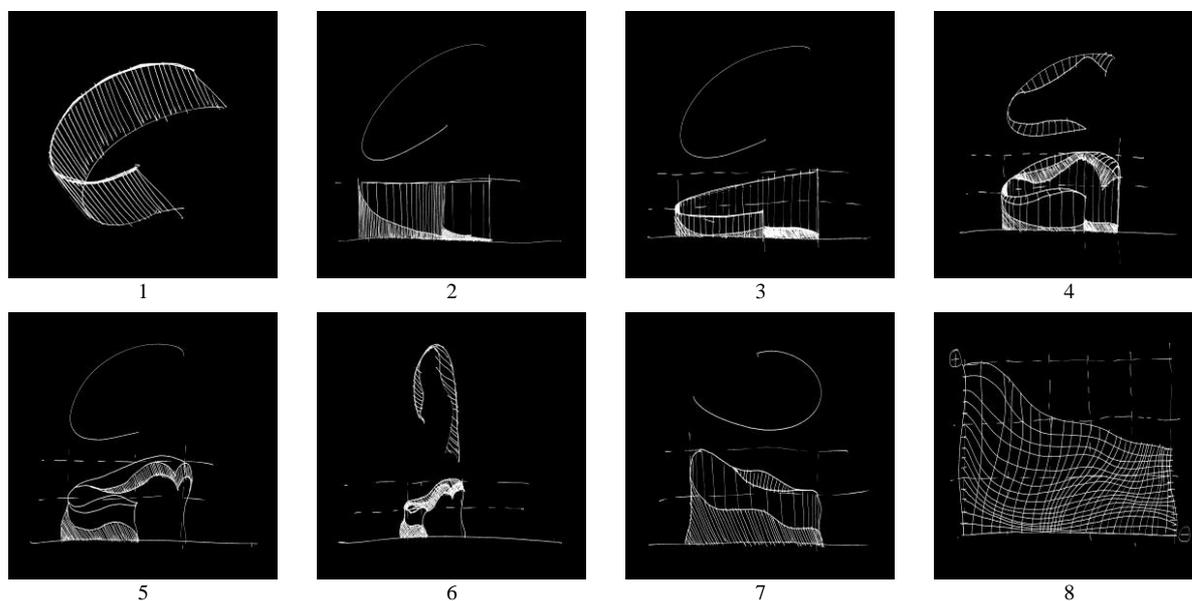


Figura 4: Definição da geometria da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.1.4.3 Observação na representação tridimensional do módulo e superfície*

Assim, sendo que foi observado que os módulos sofrem variação do tamanho e forma segundo a curvatura da superfície, que foi observado que a superfície de dupla curvatura depende de um conjunto de curvas ou no mínimo de 4 curvas tridimensionais: em tais observações, nesta tese, será adotado que os módulos modificam seu tamanho e forma em função da forma da superfície de dupla curvatura.

#### *2.1.5.1.5 Observação na seleção e levantamento fotográfico das espécies frutíferas*

Assim, sendo que as espécies frutíferas foram selecionadas pela presença no CEASA da cidade de Brasília no Distrito Federal e pela peculiaridade geométrica das formas da parte exterior dos frutos e; que foi observado que todas as espécies frutíferas possuem uma forma

não euclidiana, que na sua maioria possuem forma regular com gomos de diferente tamanho e forma, com gomos de menor tamanho onde as curvaturas são mais agudas; que as espécies frutíferas foram digitalizadas para determinar o padrão dos módulos e a conformação das superfícies; que os módulos modificam seu tamanho e forma em função da forma da superfície de dupla curvatura; em tais observações, nesta tese, será adotado que as espécies frutíferas foram selecionadas pela sua presença na região centro-oeste do Brasil e pela peculiaridade geométrica não euclidiana das formas na parte exterior dos frutos. Onde os módulos modificam seu tamanho e forma segundo as curvaturas da superfície que conformam.

#### *2.1.5.2 Maquetes rápidas de papel para estudo das geometrias das superfícies de dupla curvatura*

As maquetes rápidas de papel permitiram o estudo das geometrias não euclidianas das formas de superfícies de dupla curvatura. As maquetes foram construídas com dobraduras, (origami) de formas regulares e dobraduras de formas irregulares (papel amassado). Onde as maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas irregulares - papel amassado - apresentaram uma maior possibilidade na definição de formas de superfície de dupla curvatura, mas os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram uma possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces.

##### *2.1.5.2.1 Maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura*

A maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares, do mesmo tamanho, de formas quadradas, triangulares e quadrado-triangulares apresentaram limitações para a definição de uma forma de superfície de dupla curvatura. As dobraduras de formas regulares,

do mesmo tamanho, de formas quadradas apresentaram limitação para a definição de uma superfície de dupla curvatura. As dobraduras de formas regulares, do mesmo tamanho, de formas triangulares apresentaram limitação na definição de uma superfície de dupla curvatura. As dobraduras de formas regulares, do mesmo tamanho, de formas quadradas e triangulares apresentaram limitação na definição de uma superfície de dupla curvatura.



Figura 5: Maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.2.2 Maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura*

A maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares, papel amassado, apresentou a possibilidade da definição de uma forma de superfície de dupla curvatura. O papel amassado apresentou dobraduras com diferentes tamanhos e com tamanhos menores nas curvaturas mais agudas.



Figura 6: Maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria

### *2.1.5.2.3 Maquetes rápidas de papel de módulos construídos com dobraduras de formas regulares*

Os módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos apresentaram a possibilidade da definição de formas de superfícies de dupla curvatura, mas com pouca resistência quando comparados com os módulos que se conectam pelas faces.

#### *2.1.5.2.3.1 Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de igual tamanho*

Os módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de igual tamanho apresentaram limitação na definição de formas de superfícies de dupla curvatura. A limitação foi devido a que as dobraduras foram ortogonais e isso só permitiu a possibilidade de definição de formas ortogonais. Ver figura abaixo no item (a).

#### *2.1.5.2.3.2 Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferente tamanho*

Os módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferente tamanho apresentaram menos limitação na definição de formas de superfícies de dupla curvatura. Este tipo de dobradura permitiu a definição de formas de superfícies de dupla curvatura com a variação do tamanho de algumas dobraduras, mas foi observado que isso demandava um maior período de tempo no *desing* de toda uma superfície de dupla curvatura em função de que cada módulo foi de uma forma e tamanho, único. Ver figura abaixo no item (b).

### 2.1.5.2.3.3 *Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferente tamanho*

Os módulos construídos com dobraduras de formas regulares, quadrados e triângulos, de diferente tamanho com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram possibilidade de definir formas de superfícies de dupla curvatura, mas com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces. A possibilidade de definir formas de superfícies de dupla curvatura tem a restrição da resistência devido a que a conexão entre os módulos é por um dispositivo articulado pelas arestas. Ver figura logo abaixo no item (c).

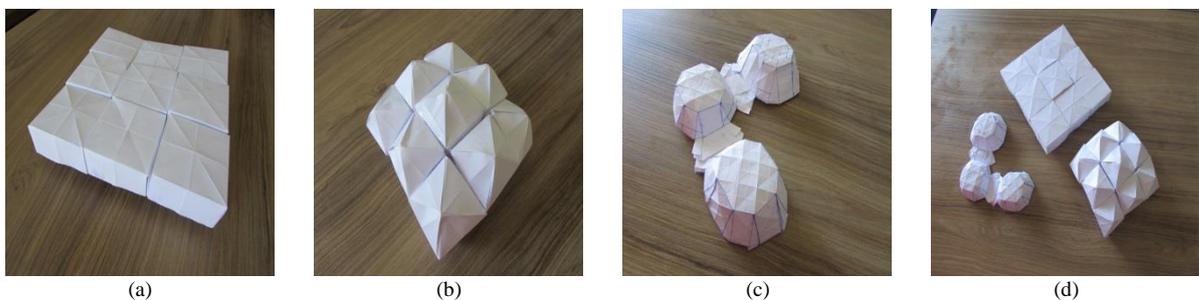


Figura 7: Maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares dos módulos. (a) Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de igual tamanho de quadrados e triângulos. (b) Módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de diferente tamanho de quadrados e triângulos. (c) Módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos, de diferente tamanho com dispositivos de conexão pelas arestas. (d) Maquetes rápidas de papel dos módulos. Fonte: Própria

### 2.1.5.2.3.4 *Observação nas maquetes rápidas de papel de módulos construídos com dobraduras de formas regulares*

Assim, sendo que os módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de igual tamanho apresentaram limitação na definição de formas de superfícies de dupla curvatura; os módulos construídos com papel com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos apresentam menos limitação na definição de formas de superfícies de dupla curvatura; os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram uma possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura, mas com pouca resistência se comparados com os módulos

que se conectam pelas faces; em tais observações, nesta tese, será adotado que os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura, mas com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces.

#### *2.1.5.2.4 Observação nas maquetes rápidas de papel para estudo das geometrias das superfícies de dupla curvatura*

Assim, sendo que a maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares do mesmo tamanho de formas quadradas, triangulares e quadrado-triangulares apresenta limitação na definição de uma de superfície de dupla curvatura; que a maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares, papel amassado, apresenta uma possibilidade de definição de uma forma de superfície de dupla curvatura; que os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram uma possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura, mas com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces; em tais observações, nesta tese, será adotado que as maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas irregulares (papel amassado) apresentam uma maior possibilidade na definição de formas de superfície de dupla curvatura, mas os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram uma possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces.

### 2.1.5.3 *Digitalização e restituição fotogramétrica das maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura*

As maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura foram digitalizadas utilizando uma câmera fotográfica de marca DSLR Nikon de modelo D600 e o *software Autodesk ReCap*. O levantamento fotográfico foi realizado com 20 fotografias tiradas com uma lente de marca *SIGMA* para câmera fotográfica DSLR Nikon, de 18 mm, e com controle de foco manual. A restituição fotogramétrica foi realizada com uma sequência de 6 passos. 1) Abrir uma conta na *Autodesk*, 2) Descarregar o *software ReCap* da página da *Autodesk*, 3) Instalar o *software ReCap* no Computador Pessoal, 4) Tirar as fotografias das maquetes rápidas de papel, 5) Abrir o *software ReCap*, criar um projeto de restituição, carregar as fotografias tiradas e, enviar o material fotográfico para o servidor central da *Autodesk* para realizar a restituição e esperar o retorno do arquivo restituído e, 6) Descarga do arquivo restituído.

A restituição fotogramétrica das maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura permitiu obter um arquivo de extensão “*obj*” possível de ser aberto e realizar edições em *softwares* de modelagem 3D como no *software Rhinoceros*.

#### 2.1.5.3.1 *Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares*

A restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares, quadrado-triangulares do mesmo tamanho da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com curvaturas menos acentuadas.

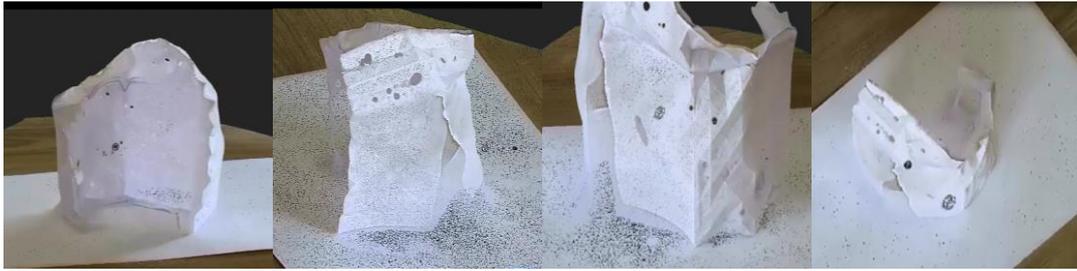


Figura 8: Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.3.2 *Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares*

A restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares, papel amassado, da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com curvaturas mais acentuadas.

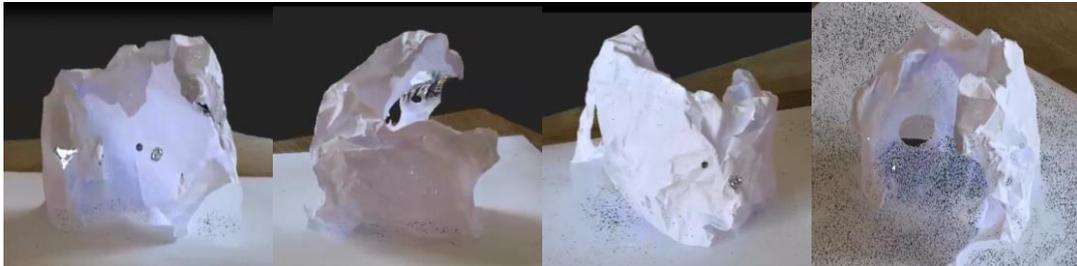


Figura 9: Restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.3.3 *Observação na digitalização e restituição fotogramétrica das maquetes rápidas de papel com dobraduras regulares e irregulares da superfície de dupla curvatura*

Assim, sendo que a restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas regulares de quadrado-triangulares do mesmo tamanho da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com curvaturas menos acentuadas e; a restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares, papel

amassado, da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com maiores curvaturas; em tais observações, nesta tese, será adotado que a restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras irregulares, papel amassado, da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com maiores curvaturas e foi selecionada para ser parametrizada.

#### 2.1.5.4 *Parametrização da restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares*

A restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares foi parametrizada utilizando o *software* de modelagem 3D, *Rhinoceros 5.0*, e o *plugin Grasshopper*.

##### 2.1.5.4.1 *Parametrização da superfície de dupla curvatura*

O processo de parametrização foi desde a importação da restituição fotogramétrica dentro do ambiente de modelagem 3D até a geração da superfície de dupla curvatura. Esse processo foi estruturado em 4 passos: 1) Importação da restituição fotogramétrica de extensão “*obj*” para o ambiente de modelagem 3D do *software Rhinoceros 5.0*, 2) Inserção de pontos no perímetro da superfície de dupla curvatura e construção de curvas interpoladas passando pelos pontos anteriormente inseridos, 3) Definição gráfica do algoritmo generativo da superfície de dupla curvatura utilizando o *plugin Grasshopper* e, 4) Geração da superfície de dupla curvatura regradada ou parametrizada.

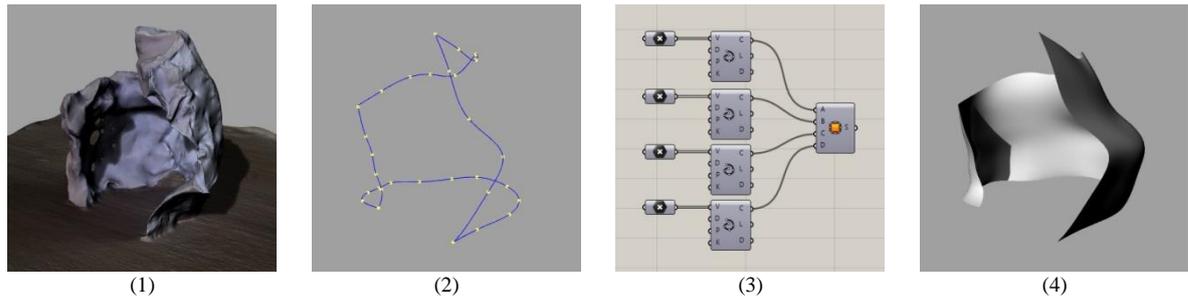


Figura 10: Parametrização da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria

#### 2.1.5.4.2 Panelização da superfície de dupla curvatura

Após a geração da superfície de dupla curvatura, o processo seguinte foi a panelização da superfície utilizando o *plugin Grasshopper*. A panelização foi realizada em um processo de 3 passos: 1) Criação de um domínio ou limites de uma superfície a partir de 4 pontos, 2) Subdivisão do domínio nos eixos horizontal e vertical e, 3) Criação de uma caixa torcida em uma porção da superfície subdividida.

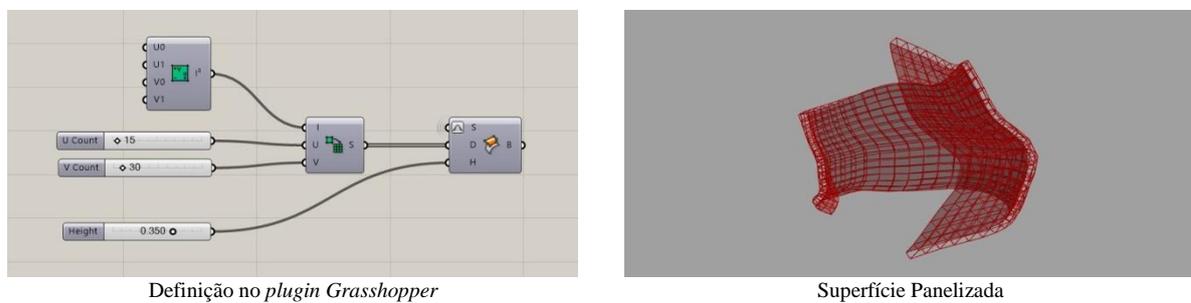


Figura 11: Panelização da superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.4.3 Parametrização do módulo

Após a panelização da superfície de dupla curvatura, o processo seguinte foi a parametrização do módulo utilizando o *plugin Grasshopper*. O processo de parametrização do módulo foi estruturado em 5 passos: 1) Inserção de pontos nos vértices do módulo, 2) Inserção de linhas unindo os pontos para a definição das faces do módulo, 3) Criação das superfícies das faces

do módulo, 4) Criação das superfícies para subtração utilizando as ferramentas *offset* de curva em superfície e *fillet e*, 5) Subtração de superfícies.

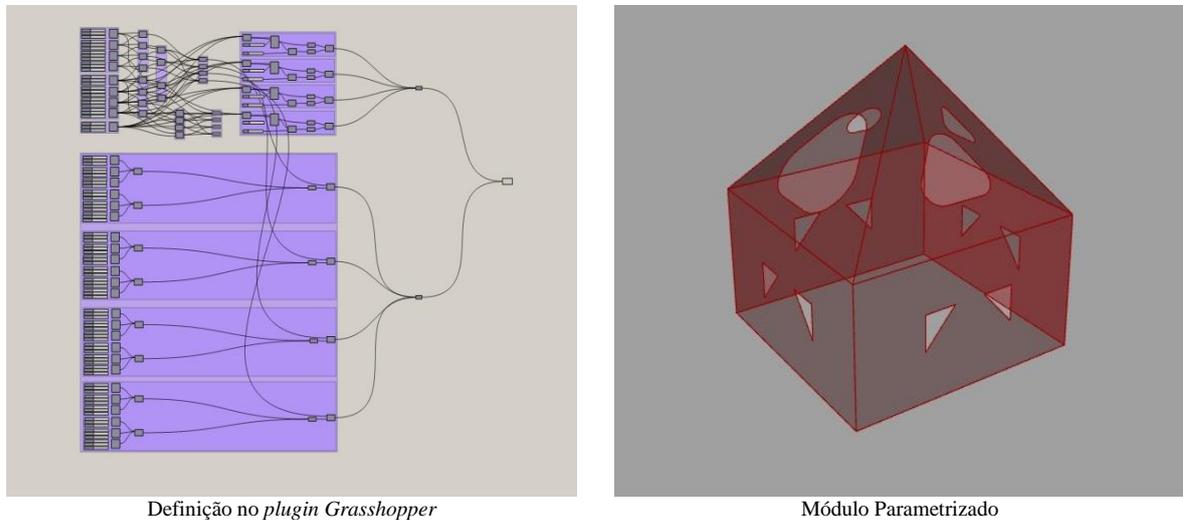
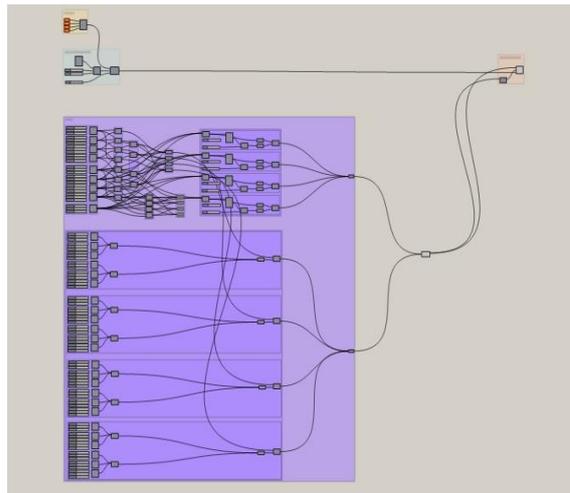


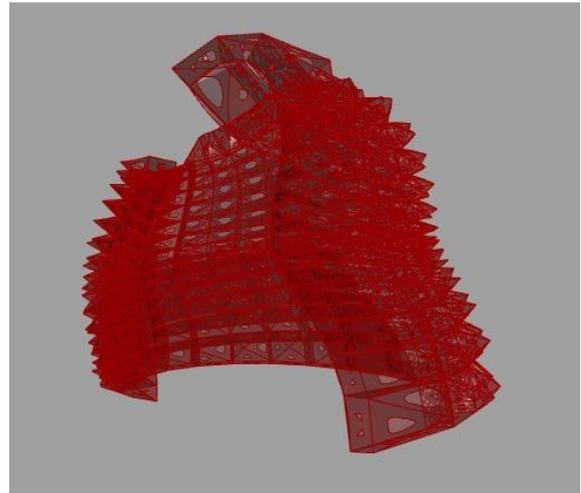
Figura 12: Parametrização do módulo para distribuição na superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.4.4 Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção

Após a parametrização do módulo, o processo seguinte foi a parametrização do protótipo do pavilhão para fabricação digital por seção, utilizando o *plugin Grasshopper*. O processo de parametrização foi estruturado em 4 passos: 1) Inserção do código gráfico da parametrização da superfície de dupla curvatura, 2) Inserção do código gráfico da panelização da superfície de dupla curvatura, 3) Inserção do código gráfico da parametrização do módulo e. 4) parametrização da transformação do módulo na superfície de dupla curvatura.



Definição com *plugin Grasshopper*

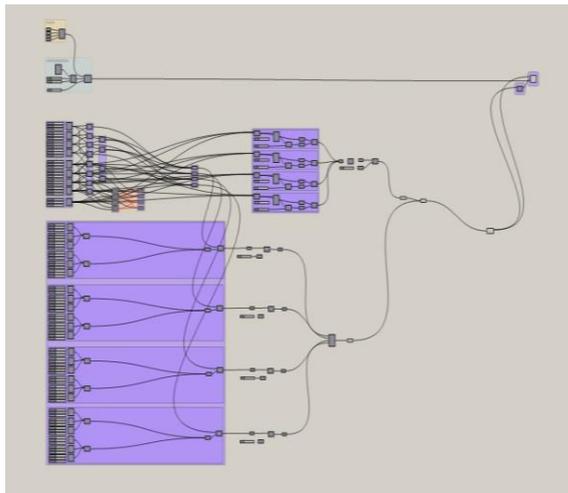


Superfície Modulada

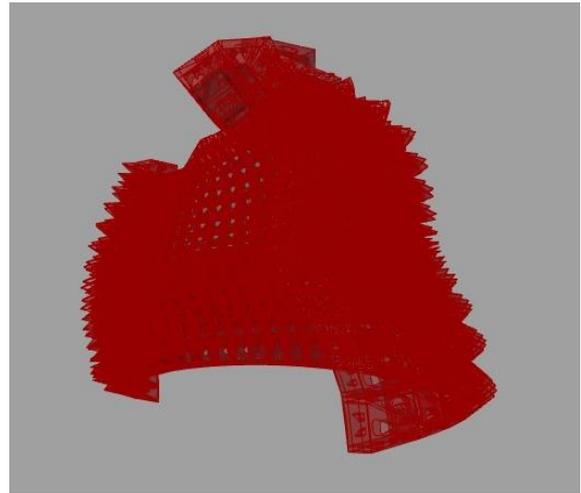
Figura 13: Parametrização do protótipo do pavilhão Biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.4.5 *Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição*

Após a parametrização do protótipo do pavilhão para fabricação digital por seção, o processo seguinte foi a parametrização do protótipo do pavilhão para fabricação digital por adição, utilizando o *plugin Grasshopper*. O processo de parametrização foi estruturado em 5 passos: 1) Inserção do código gráfico da parametrização da superfície de dupla curvatura, 2) Inserção do código gráfico da panelização da superfície de dupla curvatura, 3) Inserção do código gráfico da parametrização do módulo. 4) Parametrização da espessura das faces do módulo utilizando as ferramentas de *brep*, *join brep*, *brep*, *extrude of surface*, *vector*, *number slider*, *brep*, *solid union*, *brep join e*, 5) Parametrização da transformação do módulo na superfície de dupla curvatura utilizando as ferramentas *bounding box* e *Box Morph*.



Definição com *plugin Grasshopper*



Superfície Modulada

Figura 14: Parametrização do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.4.6 *Geração dos protótipos do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção e adição*

Os protótipos do pavilhão biônico de forma complexa foram preparados considerando os usos finais. Um protótipo foi preparado para ser fabricado digitalmente pela estratégia de corte de seção ou corte 2D a laser dos módulos desdobrados na escala 1:1 e; o outro protótipo foi preparado para ser fabricado digitalmente pela estratégia de impressão 3D por filamento fundido (FFF) em escala reduzida.

##### 2.1.5.4.6.1 *Protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção*

Após a parametrização do pavilhão para fabricação digital por seção, o passo seguinte foi a geração do protótipo para fabricação digital por seção. O protótipo para fabricação digital por seção foi preparado considerando que os módulos seriam fabricados pelo corte 2D ou corte a laser pelo contorno do módulo desdobrado. Essa estratégia de fabricação não demanda

espessura das faces que seriam cortadas pelo contorno. Nesse sentido, não foi necessário que as faces tivessem espessura. O protótipo teve por uso final a construção física na escala 1:1.

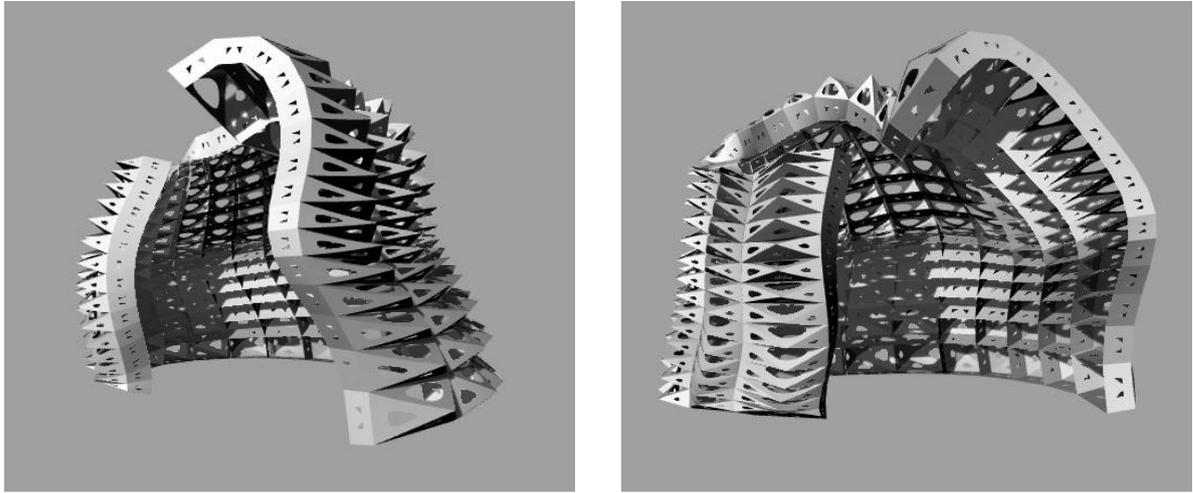


Figura 15: Vistas do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por seção. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.4.6.2 Protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição*

Após a parametrização do pavilhão para fabricação digital por seção, o passo seguinte foi a geração do protótipo para fabricação digital por adição. O protótipo para fabricação digital por adição foi preparado considerando que os módulos seriam fabricados por impressão 3D utilizando as impressoras 3D Delta e *RepRap Uberblock*. Essa estratégia de fabricação demanda espessura nas faces dos módulos e eles são construídos camada por camada. Nesse sentido, foi necessário que as faces tivessem espessura. O protótipo teve por uso final o estudo do planejamento do processo de fabricação, a própria fabricação e a montagem do pavilhão.

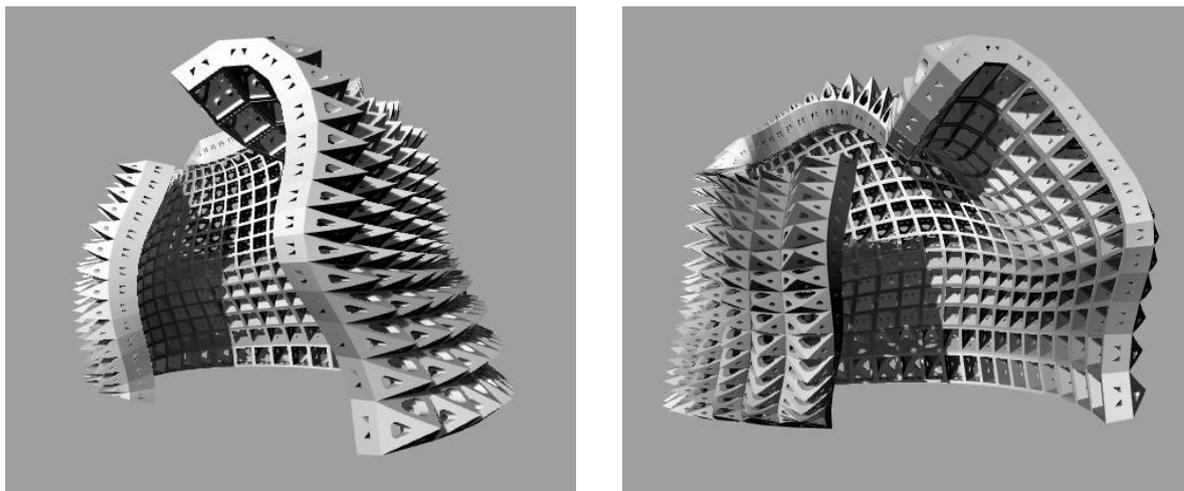


Figura 16: Vistas do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa com módulos preparados para fabricação digital por adição. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.4.7 Observação na parametrização da restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras de formas irregulares*

Assim, sendo que o protótipo parametrizado da superfície de dupla curvatura foi preparado considerando a estratégia de fabricação digital por seção e, que o protótipo parametrizado da superfície de dupla curvatura foi preparado considerando a estratégia de fabricação digital por adição; em tal observação, nesta tese, será adotado que os dois protótipos parametrizados do pavilhão biônico de forma complexa foram preparados considerando as estratégias de fabricação digital e uso final, estudo do planejamento da fabricação, a própria fabricação e a montagem do pavilhão.

#### *2.1.5.5 Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico*

Os protótipos 3D físicos do pavilhão foram produzidos em modelo reduzido para estudar a forma final, estudar o planejamento da fabricação, a fabricação própria e a montagem do pavilhão.

A produção foi realizada com o processo de adição ou impressão 3D por deposição de filamento fundido. Um protótipo foi produzido com módulos de faces finas para representar o pavilhão fabricado digitalmente por seção ou corte 2D a laser em escala 1:1. E, o outro protótipo foi produzido com módulos de faces com maior espessura para representar o pavilhão fabricado digitalmente por adição ou Impressão 3D por deposição de filamento fundido.

#### *2.1.5.5.1 Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por seção*

O protótipo 3D físico do pavilhão biônico, para ser produzido pelo processo de seção, foi prototipado em uma impressora 3D Delta. O protótipo foi dividido em 8 partes ou panos para serem fabricados no tamanho máximo permitido pelo tamanho da mesa da impressora.

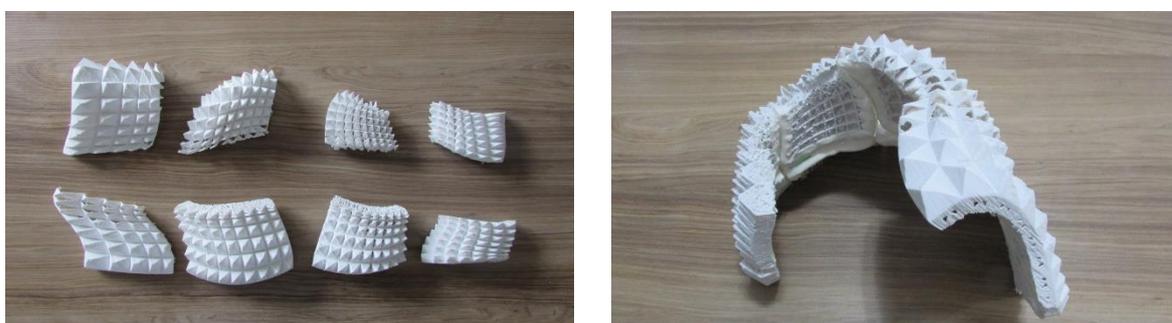


Figura 17: Protótipo 3D físico da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por seção. Fonte Própria

No protótipo, em termos de forma, foi observado: a mesma espessura em todas as faces dos módulos independentemente do tamanho, pouca resistência do pavilhão à torção e compressão e, maior resistência onde os módulos são de pequeno porte e, menor resistência onde os módulos são de grande porte.

No protótipo, em termos do planejamento da fabricação, foi observada a necessidade de dividir a fabricação em 8 partes ou panos. Devido às questões de logística como são: espaço para armazenagem do material para corte, espaço para a realização do corte, espaço para armazenagem do material já cortado, espaço para a linha de montagem dos módulos e panos e, espaço para previa da montagem e montagem dos panos ou pavilhão.

No protótipo, em termos da própria fabricação, foi observado: a necessidade de desdobrar os módulos, definir os contornos para o corte, marcação das arestas para fazer a dobragem, codificação das arestas para montagem dos módulos, codificação dos módulos para montagem dos painéis e, planejamento da quantidade de pessoas para realizar a fabricação.

No protótipo, em termos da montagem do pavilhão, foi observado: a necessidade de iniciar a montagem pelos painéis da base e, o planejamento da quantidade de pessoas para realizar a montagem do pavilhão.

#### *2.1.5.5.2 Prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por adição*

O protótipo 3D físico do pavilhão biônico, para ser produzido pelo processo de adição, foi prototipado em uma impressora *RepRap Ubersblock*. O protótipo foi dividido em 8 partes ou painéis para ser fabricado no tamanho máximo permitido pela mesa da impressora.



Figura 18: Protótipo 3D físico da parametrização do pavilhão biônico para fabricação digital por adição. Fonte Própria.

No protótipo, em termos de forma, foi observado: a variação da espessura em todas as faces dos módulos em forma proporcional ao tamanho, maior resistência do pavilhão à torção e compressão e, maior resistência dos módulos independente do tamanho.

No protótipo, em termos do planejamento da fabricação, foi observada a necessidade de dividir a fabricação em 8 partes ou painéis. Devido às questões de logística como são: espaço para armazenagem do material para impressão, espaço para as máquinas de impressão, espaço

para armazenagem do material imprimido, espaço para a linha de montagem dos panos e, espaço para previa da montagem e montagem dos panos ou pavilhão.

No protótipo, em termos da própria fabricação, foi observado: codificação dos módulos para montagem dos panos e, planejamento da quantidade de pessoas para realizar a fabricação.

No protótipo, em termos da montagem do pavilhão, foi observada: a necessidade de iniciar a montagem pelos panos da base e, o planejamento da quantidade de pessoas para realizar a montagem do pavilhão.

#### *2.1.5.5.3 Observação na prototipagem 3D física da parametrização do pavilhão biônico*

Assim, sendo que o protótipo de tamanho reduzido do pavilhão biônico, para ser produzido pelo processo de fabricação digital por seção ou corte 2D a laser na escala 1:1, mostrou a importância de se produzir o protótipo para: estudar a forma final, o planejamento da fabricação, a própria fabricação e, a montagem dos panos e pavilhão; que o protótipo de tamanho reduzido do pavilhão biônico, para ser produzido pelo processo de fabricação digital por adição ou Impressão 3D por deposição de filamento fundido, mostrou a importância de se produzir o protótipo para estudar a forma final, o planejamento da fabricação, a própria fabricação e, a montagem dos panos e pavilhão; em tais observações, nesta tese, será adotado que a prototipagem 3D física do pavilhão biônico em tamanho reduzido - para ser produzido pelo processo de fabricação digital por seção na escala 1:1 ou pelo processo de fabricação digital de adição em tamanho reduzido - é necessária para o estudo da forma final, estudo do planejamento da fabricação, estudo do próprio processo de fabricação e, o estudo da montagem do pavilhão.

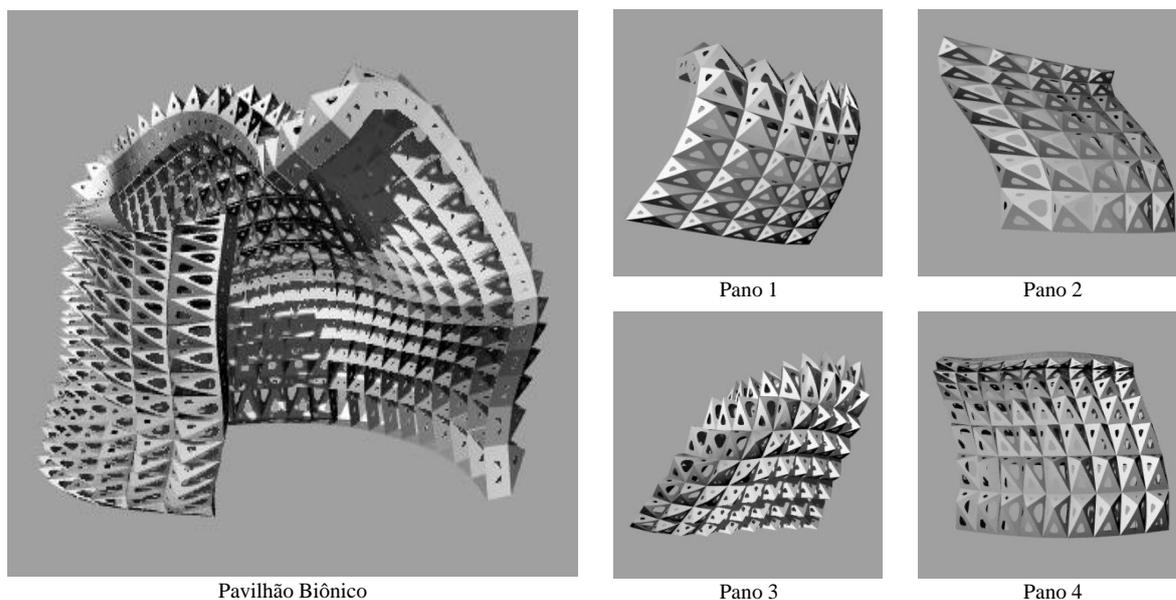
### 2.1.5.6 Preparação para o processo de fabricação

A preparação para o processo de fabricação do pavilhão biônico foi estruturado em 3 fases: 1) Preparação dos arquivos digitais, 2) Seleção do material para fabricação e, 3) Edição dos arquivos digitais.

Onde, o pavilhão biônico, de dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m, foi dividido em 8 partes ou panos para operacionalizar sua fabricação. O material selecionado para a fabricação foi o papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,00m. Os arquivos digitais passaram por 2 edições para realizar o corte 2D a laser: 1) Edição de desdobramento e organização dos módulos e, 2) Edição para definição das linhas para corte e as linhas para marcação.

#### 2.1.5.6.1 Preparação dos arquivos

O pavilhão biônico foi dividido em 8 partes ou panos em função da logística disponível para realizar a fabricação, sendo que as dimensões do pavilhão em escala 1:1 são: 2,5m x 2,5m x 2,5m e, é composto por 450 módulos, todos os módulos são diferentes.



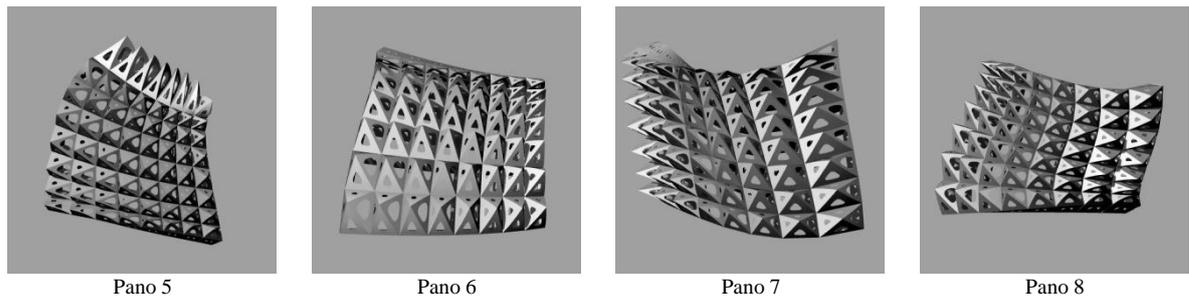


Figura 19: Arquivos do pavilhão e divisão em panos. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.6.2 Seleção do material

O material selecionado para a fabricação foi o papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,20m. O papelão foi selecionado pelo seu baixo custo e disponibilidade no mercado de papelaria da cidade de Brasília.



Figura 20: Papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,00m. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.6.3 Edição dos arquivos

Após o divisão do pavilhão em panos foi realizada a edição dos módulos para envio para o corte a laser. Os módulos passaram por 2 fases de edição em sequência. 1) Desdobramento e transformação das superfícies para linhas e, organização das peças no formato da mesa de

corte da máquina cortadora a laser e, 2) Revisão das linhas para corte e das linhas para marcação. Onde, o pavilhão biônico de dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m foi dividido em 8 panos para operacionalizar sua fabricação com papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,20m. O papelão foi escolhido pelo seu baixo custo e disponibilidade no mercado de papelaria local. E, os arquivos digitais para o corte a laser devem passar por duas edições: edição de desdobramento e organização dos módulos e, edição para definição de linhas para corte e linhas para dobragem.

#### *2.1.5.6.3.1 Edição de desdobramento-transformação-organização para corte a laser*

Na primeira edição, os módulos passaram por 2 momentos de edição. Um momento de separação das faces de arestas curvas das faces de arestas retas. E, outro momento de junção das faces de arestas curvas com as faces de arestas retas.

No primeiro momento, da separação das faces, nos panos 1-2-3-4, cada pano passou pelo desdobramento de cada módulo seguindo a ordem das filas e dos módulos em cada fila. O desdobramento dos módulos de cada fila foi realizado na ordem de cada fila para não confundir os módulos na organização.

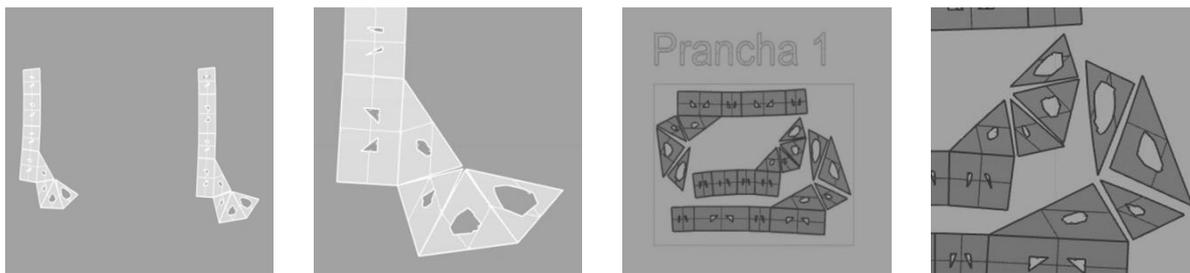


Figura 21: Separação das faces de arestas curvas das faces de arestas retas. Fonte Própria.

No segundo momento, da junção das faces, nos panos 5-6-7-8, cada pano passou pelo desdobramento de cada módulo obedecendo à ordem das filas e dos módulos em cada fila. O desdobramento dos módulos de cada fila foi realizado na ordem de cada fila para não confundir os módulos no momento da organização e, a codificação dos módulos fazendo referência ao pano, fila e posição na fila e prancha.

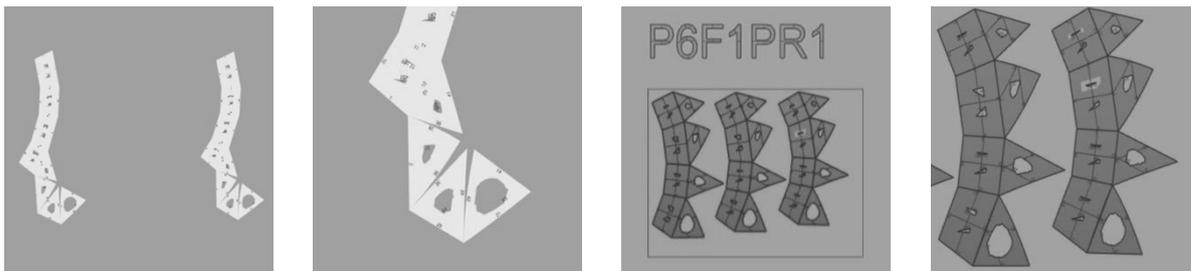


Figura 22: Junção das faces de arestas curvas com as faces de arestas retas. Fonte: Própria

#### 2.1.5.6.3.2 Edição da revisão das linhas para corte e as linhas para marcação e dobragem

Na segunda edição, os módulos passaram por 2 momentos de edição. Um momento de revisão e definição das linhas de contorno e das linhas para dobragem sem diferenciação. E, outro momento de revisão e definição das linhas de contorno para dobragem com diferenciação.

No primeiro momento foram revisadas e definidas as linhas de contorno para corte e as linhas para dobragem. Neste momento foi observada a necessidade de ser feita uma diferenciação no tipo de linha para que a máquina de corte a laser identifique as linhas para corte e as linhas para dobragem.

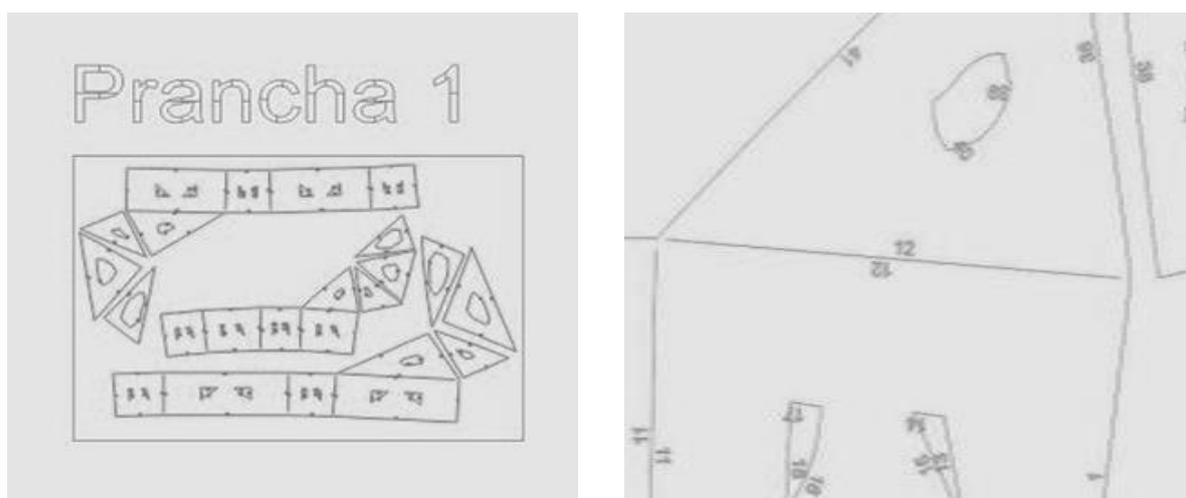


Figura 23: Revisão das linhas para corte e das linhas para dobragem sem fazer a diferenciação do tipo de linha. Fonte: Própria.

No segundo momento foram revisadas e definidas as linhas de contorno para corte e as linhas para dobragem. Neste momento foi realizada a diferenciação das linhas para corte e as linhas para dobragem. As linhas para corte foram de traço contínuo e as linhas para dobragem foram

tracejadas. E, também foi realizada uma codificação para diferenciar os módulos e panos. O código identificou o pano, a fila, a posição na fila e prancha.

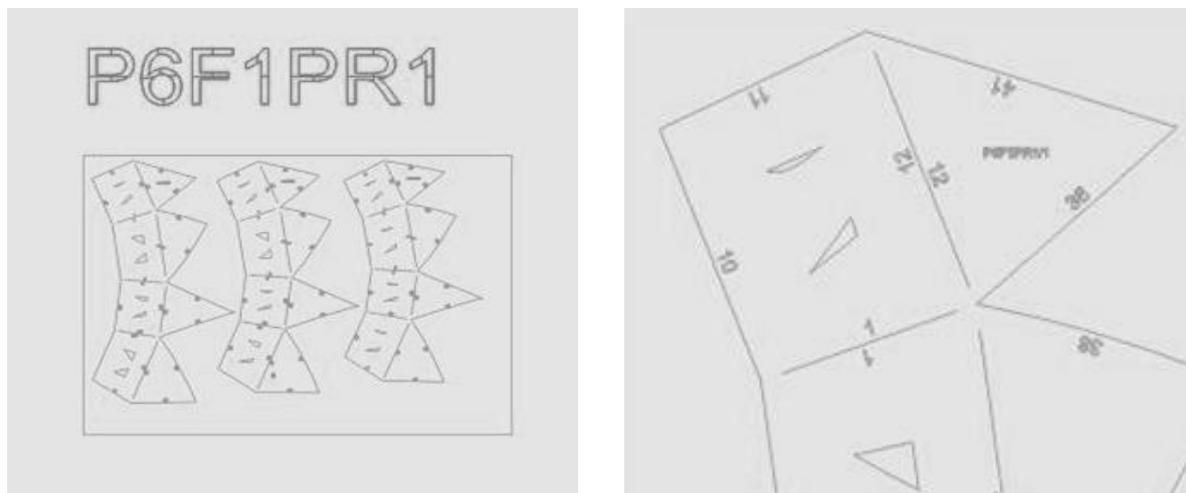


Figura 24: Revisão das linhas para corte e as linhas para dobragem com diferenciação do tipo de linha. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.6.3.3 Observação no processo de edição dos arquivos

Assim, sendo que na primeira fase da edição - do desdobramento-transformação das superfícies para linhas e organização das peças no formato da mesa de corte da máquina cortadora a laser - foi observada a necessidade da codificação dos panos e módulos; que na segunda fase da edição - da revisão das linhas para corte e as linhas para dobragem, foi observada a necessidade da codificação identificando o pano, fila, posição na fila e prancha; em tais observações, nesta tese, será adotado que a edição dos módulos para corte deve passar pelo desdobramento, transformação das superfícies para linhas de contorno, organização dos módulos no formato da mesa de corte da máquina cortadora a laser, revisão dos módulos desdobrados, diferenciação das linhas para corte e as linhas para dobragem.

#### *2.1.5.6.4 Observação no processo de preparação do corte e dobragem dos módulos para fabricação*

Assim, sendo que o pavilhão de dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m foi dividido em 8 panos para operacionalizar o processo de fabricação; que o papelão de onda simples foi escolhido para realizar a fabricação pelo baixo custo e disponibilidade no mercado local; que a edição dos módulos para corte deve passar pelo desdobramento, transformação das superfícies para linhas de contorno, organização dos módulos no formato da mesa de corte da máquina cortadora a laser, revisão dos módulos desdobrados e, diferenciação das linhas para corte e as linhas para dobragem; em tais observações, nesta tese, será adotado que o pavilhão biônico de dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m foi dividido em 8 panos para operacionalizar sua fabricação com papelão de onda simples de 6mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,20m. O papelão foi escolhido pelo seu baixo custo e disponibilidade no mercado de papelaria local. E, os arquivos digitais para o corte a laser devem passar por duas edições: edição de desdobramento e organização dos módulos e, edição para definição de linhas para corte e linhas para dobragem.

#### *2.1.5.7 Fabricação*

A fabricação do pavilhão biônico em papelão de onda simples na escala de 1:1 foi realizada em 2 fases: 1) Corte a laser dos módulos e, 2) Montagem dos módulos e panos.

A fabricação foi um processo híbrido (fabricação digital e fabricação manual) no qual foi observado o alto nível de deformação e investimento de tempo na produção dos artefatos quando comparado com o processo de fabricação digital.

#### *2.1.5.7.1 Corte a laser dos módulos*

O corte a laser dos módulos foi um processo de fabricação digital realizado de 2 diferentes formas: 1) As partes dos módulos foram cortadas independentemente para logo serem unidas e, 2) As partes dos módulos foram cortadas em uma única peça. O corte dos módulos em uma peça única se apresentou como a forma que diminui a deformação na montagem do módulo além de menos tempo para realizar a montagem.

Na primeira fase, do corte a laser dos módulos, foram utilizadas máquinas de corte a laser das marcas, *Thunder Laser* - modelo NOVA 51 e *Engraving & Cutting Machine*. Onde, a máquina de marca *Thunder Laser* - modelo NOVA 51 foi encontrada na empresa “Recortes a Laser” na região administrativa de Taguatinga no Distrito Federal e, a máquina de marca *Engraving & Cutting Machine* foi encontrada no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás na cidade de Goiânia. As mesas de corte das máquinas foram de 1400mm x 1030mm.

##### *2.1.5.7.1.1 Corte a laser dos módulos por partes*

O corte digital dos módulos por partes apresentou dificuldades no tempo para montagem e na montagem mesma. Foi necessário investir maior tempo na organização das partes dos módulos.

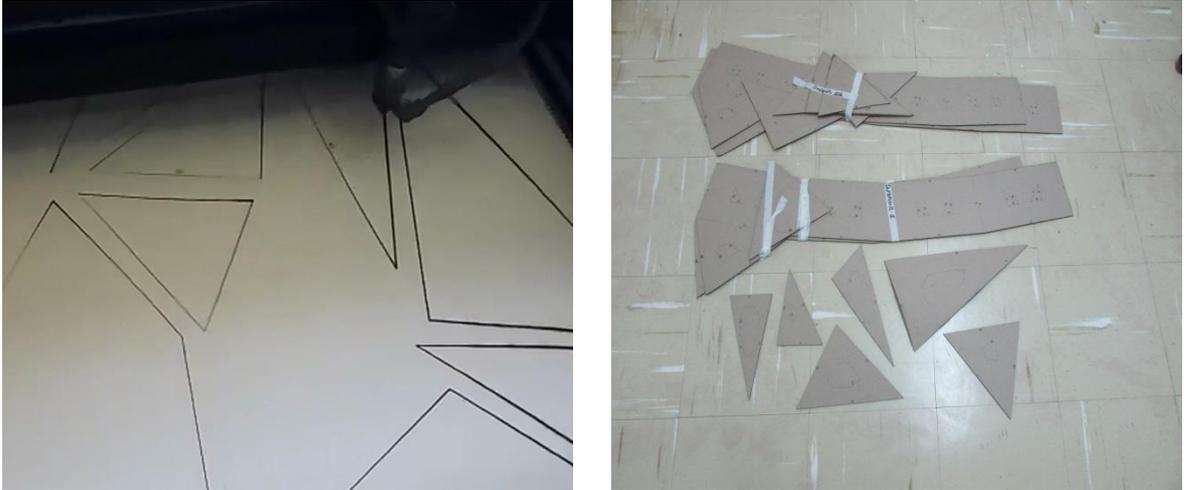


Figura 25: Corte a laser e organização das partes dos módulos. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.7.1.2 Corte a laser dos módulos em peça única*

O corte digital dos módulos em uma peça única apresentou diminuição no tempo para montagem. Neste corte, a organização dos módulos foi rápida.



Figura 26: Corte a laser dos módulos em peça única. Fonte: Própria.

#### *2.1.5.7.1.3 Observação no corte a laser dos módulos*

Assim, sendo que o corte digital dos módulos por partes demandou maior tempo para organização das partes e para a montagem mesma dos módulos, que o corte digital por peça única dos módulos demandou menos tempo para a organização e a montagem mesma dos módulos; em tais observações, nesta tese, será adotado que o corte digital a laser dos módulos por peça única demanda menos tempo na organização e montagem dos módulos, além de diminuir a deformação dos módulos.

#### *2.1.5.7.2 Montagem dos módulos e panos*

A montagem foi realizada no período de 2 anos e 8 meses com o apoio de alunos de graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília e alunos de graduação do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiânia. A montagem foi iniciada no mês de outubro de 2016 e finalizada no mês de junho de 2019.

A montagem dos módulos e panos foi realizada em 2 momentos: 1) Montagem dos módulos e, 2) Montagem dos panos. A montagem foi um processo de fabricação manual no qual tem se observado maior deformação nos artefatos e maior tempo de produção dos mesmos, que no processo de fabricação digital.

##### *2.1.5.7.2.1 Montagem dos módulos*

No primeiro momento, o processo de montagem dos módulos foi estruturado em 3 passos: 1) Fechamento dos módulos, 2) Reforço interno dos módulos e, 3) Reforço externo dos módulos. Neste momento o processo de fabricação foi unicamente manual e nele foi observado que quanto maior o tamanho do módulo, maior foi a deformação e menor a resistência.

#### 2.1.5.7.2.1.1 Fechamento dos módulos

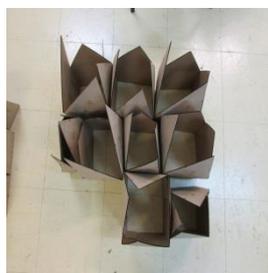
Neste primeiro passo, os módulos foram fechados manualmente com cola branca e pedaços de papelão de onda simples pela parte interna. A primeira ação foi o fechamento da parte inferior e logo foi o fechamento da parte superior. A parte superior do módulo foi fechada por último devido a que dela dependia a forma final do módulo. Neste passo foi confirmado que a montagem dos módulos que foram cortados em uma peça única demandou menos tempo na montagem e apresentou menos deformação na forma final do módulo.



Módulo cortado por partes



Módulo cortado por partes  
fechado



Módulos cortados como peça  
única



Módulos cortados como peças  
Únicas fechados

Figura 27: Fechamento dos módulos. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.7.2.1.2 Reforço interno dos módulos

Neste segundo passo, os módulos foram reforçados manualmente na parte inferior interna com cola branca e pedaços de papelão de onda simples com o propósito de fixar a forma final do módulo. Neste passo foi observada a necessidade de reforçar a parte inferior do módulo para conseguir maior resistência, principalmente nos módulos de grande porte, sendo que quando se aumenta o tamanho do módulo e se preserva constante a espessura das faces do módulo, diminui a resistência. Assim, com o aumento do tamanho do módulo e sem acréscimo da espessura das faces do módulo, o módulo se torna menos resistente.



Módulo cortado por partes reforçado internamente



Módulos cortados por partes reforçados internamente



Módulo cortado como peça única reforçado internamente



Módulos cortados como peças únicas e reforçados internamente

Figura 28: Reforço interno dos módulos. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.7.2.1.3 Reforço externo dos módulos

Neste terceiro passo, os módulos foram reforçados exteriormente manualmente na parte inferior e superior com fita adesiva de papel com o propósito de dar maior resistência na parte superior do módulo. Neste passo foi confirmada uma maior resistência nos módulos em geral, mas os módulos de tamanho intermediário e os de pequeno porte apresentaram maior resistência.



Módulo cortado por partes reforçado externamente



Módulos cortados por partes reforçados externamente



Módulo cortado como peça única reforçado externamente



Módulos cortados como peças únicas e reforçados externamente

Figura 29: Reforço externo dos módulos. Fonte: Própria

#### 2.1.5.7.2.1.4 Observação na montagem dos módulos

Assim, sendo que foi observado no fechamento manual dos módulos que com o aumento do tamanho do módulo e sem o acréscimo da espessura das faces, o módulo se torna menos resistente; que no reforço interno manualmente dos módulos foi confirmado que quanto maior

é o tamanho do módulo, menor é a resistência; que no reforço externo manualmente dos módulos foi confirmado que quanto menor é o tamanho do módulo, maior é a resistência e menor é a deformação; em tais observações, nesta tese; será adotado que o processo de fabricação dos módulos foi inteiramente manual e que quanto maior é o tamanho do módulo, maior é a deformação e menor a resistência.

#### *2.1.5.7.2.2 Montagem dos panos*

No segundo momento, da montagem dos panos, a montagem dos panos foi estruturada em 6 passos: 1) Organização e apresentação prévia dos módulos que conformam o pano, 2) Montagem do pano, 3) Apresentação do pano, 4) Comparação dos panos de papelão com os panos fabricados com impressão 3D, 5) Aplicação de resina nos panos e, 6) Emborrachado dos panos da base. Neste momento o processo de fabricação foi unicamente manual e nele foi observado que os panos de dupla curvatura apresentaram maiores deformações e demandaram maior de tempo de fabricação que no caso da fabricação digital.

##### *2.1.5.7.2.2.1 Organização e apresentação prévia dos módulos que conformam o pano*

No primeiro passo, os módulos de cada pano foram organizados por fila e posição dentro da fila. Este passo teve como finalidade a verificação da produção de todos os módulos, e guiar o processo de montagem do pano. Neste passo foi observada a importância da codificação dos módulos. Nos panos 1-2-3-4, nos quais os módulos não foram codificados, se apresentaram dificuldades na organização das filas e a posição dos módulos dentro das filas. Nos panos 5-6-7-8, nos quais os módulos foram codificados, a organização das filas e a posição dos módulos dentro das filas foram realizadas sem dificuldade e em menor tempo.

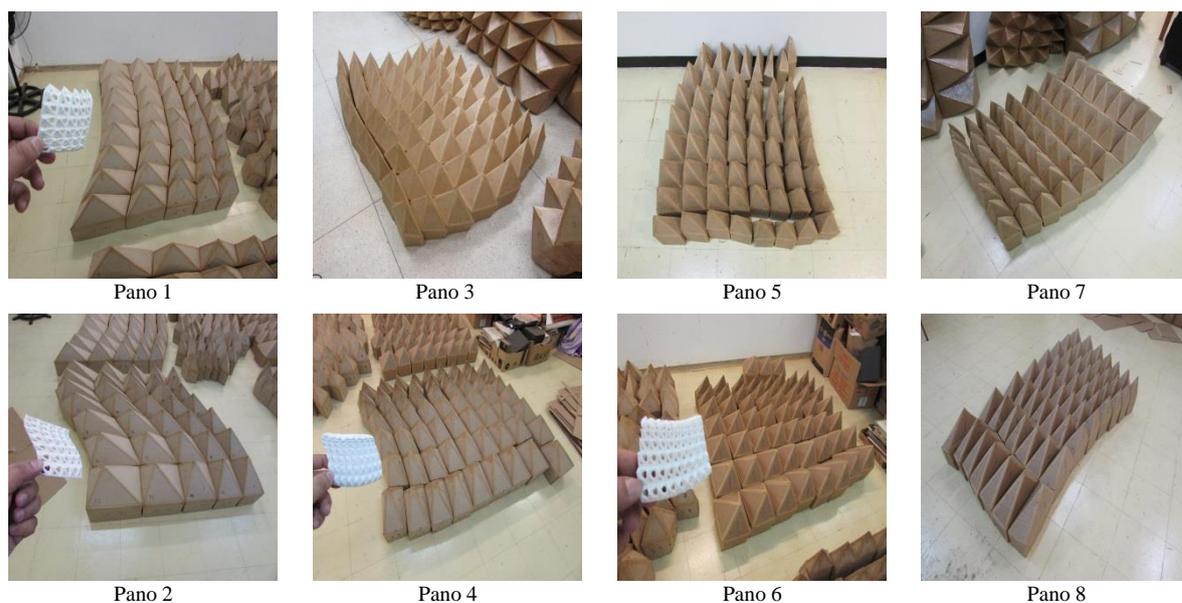
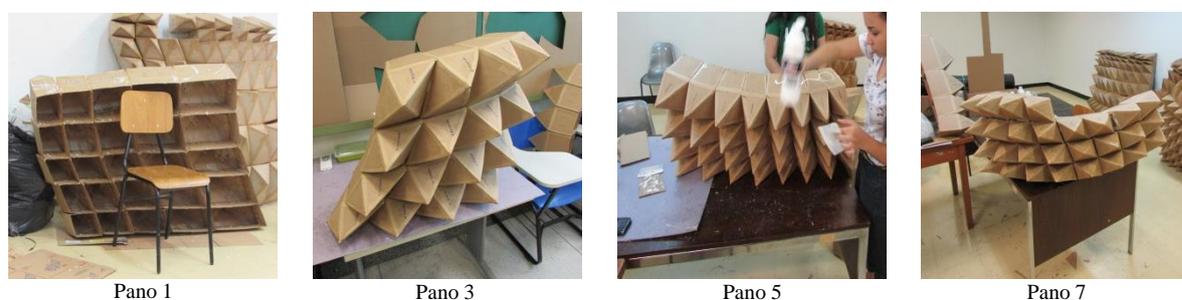


Figura 30: Organização e apresentação dos módulos que conformam os painos. Fonte: Própria

#### 2.1.5.7.2.2.2 Montagem do pano

No segundo passo, os módulos foram unidos utilizando cola branca seguindo a organização e apresentação prévia. Neste passo foi observado o nível de deformação e resistência dos módulos em função do tamanho, quanto maior o tamanho do módulo, maior a deformação e menor a resistência e; quanto menor o tamanho do módulo, menor a deformação e maior a resistência. Os módulos dos painos 1-2-3-4 apresentaram maior deformação e menor resistência e, os módulos dos painos 5-6-7-8 apresentaram menor deformação e maior resistência.



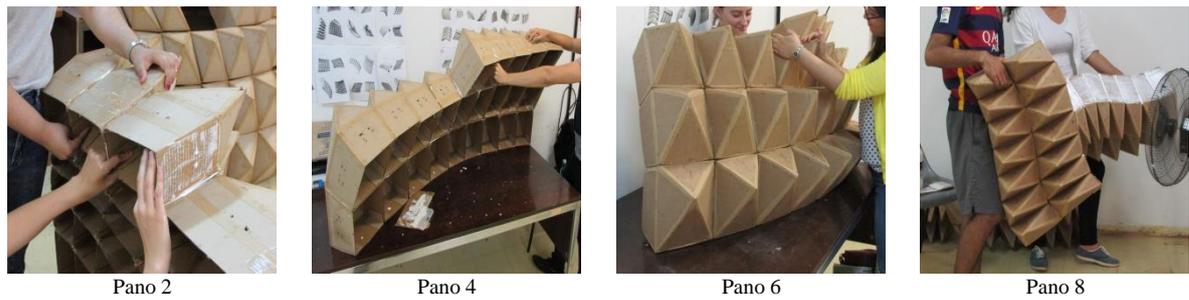


Figura 31: Montagem dos painos. Fonte: Própria

### 2.1.5.7.2.2.3 Apresentação do pino

No terceiro passo, os painos foram apresentados na sua forma final. O pino 1 foi dividido em duas partes devido a sua forma e tamanho para uma melhor operacionalização. Neste passo foi confirmada a deformação em maior ou menor grau nos módulos e nos painos e; também foi observado que os painos com duplas curvaturas mais acentuadas apresentam maiores deformações, como por exemplo, no pino 3. As maiores deformações poderiam ser superadas com módulos de pequeno porte onde as curvaturas são mais acentuadas.

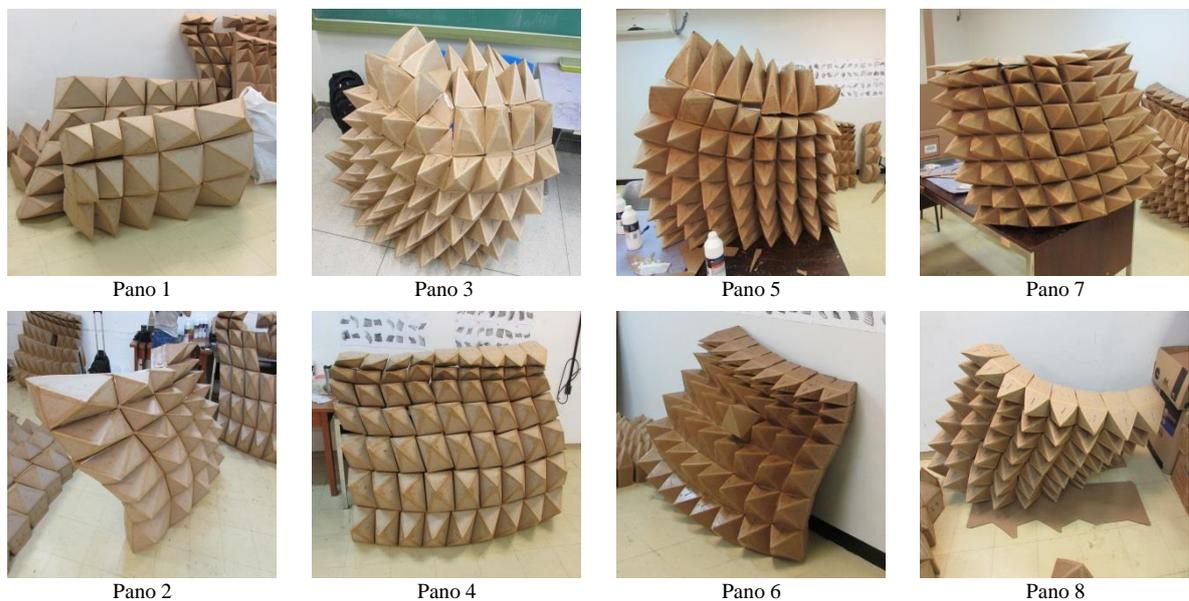


Figura 32: Apresentação dos painos. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.7.2.2.4 Comparação dos painéis de papelão com os painéis fabricados com impressão 3D

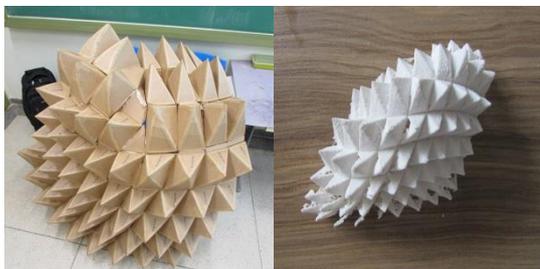
No quarto passo, os painéis do pavilhão em papelão na escala de 1:1 foram comparados com os painéis fabricados com impressão 3D em modelo reduzido. Neste passo foi observado que existe deformação em ambos os processos de fabricação e entre os processos de fabricação. No processo de fabricação híbrida (fabricação digital e manual) por seção ou corte 2D a laser existe deformação e maior tempo de fabricação dos módulos e dos painéis (2 anos e 8 meses) e; na fabricação digital por Impressão 3D por deposição de filamento fundido, existe menor deformação. Na comparação entre os dois processos, foi observado que a fabricação digital por impressão 3D por deposição de filamento fundido apresentou menor deformação.



Painel 1



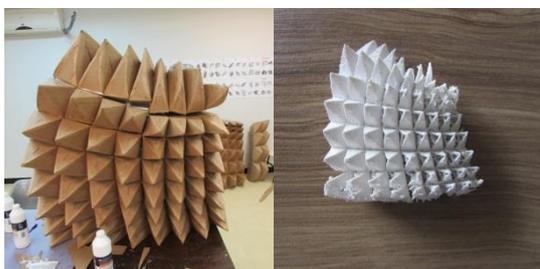
Painel 2



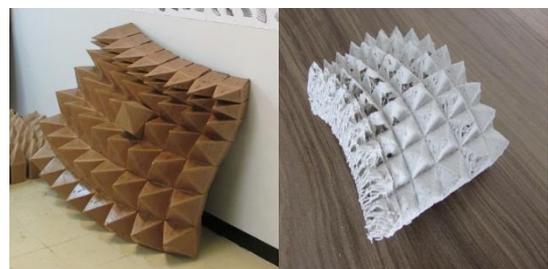
Painel 3



Painel 4



Painel 5



Painel 6

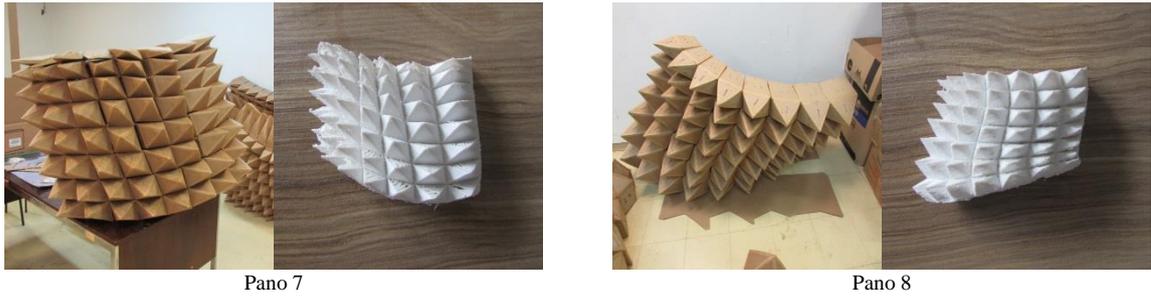


Figura 33: Comparação dos panos de papelão com os panos fabricados com impressão 3D. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.7.2.2.5 Aplicação de resina nos panos

No quinto passo, os panos foram impermeabilizados com resina a base d'água na parte externa a fim de criar uma proteção contra a umidade e ao mesmo tempo aumentar a resistência. A resina foi aplicada em 3 demãos com intervalos de aplicação de 24 horas. Neste passo foi observado que 3 demãos foram suficientes para impermeabilizar os panos e aumentar um pouco a resistência mas para atingir melhores resultados em trabalhos futuros foi observada a necessidade de aplicar a resina, também, na parte interior dos módulos com pelo menos 5 demãos nas partes exteriores e interiores.

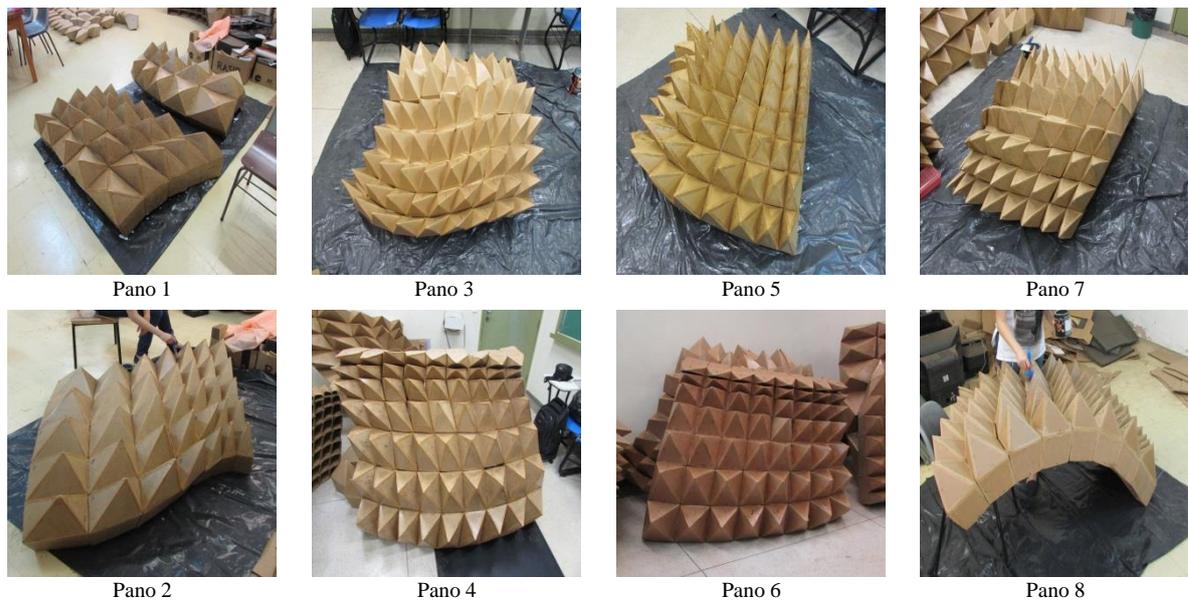


Figura 34: Aplicação de resina a base d'água nos panos. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.7.2.2.6 Emborrachado dos panos da base

No sexto passo, os panos da base receberam uma proteção de borracha para proteção de desgaste do papelão. O emborrachado foi uma tarefa realizada manualmente devido a que a forma final teve uma deformação em relação ao arquivo digital.

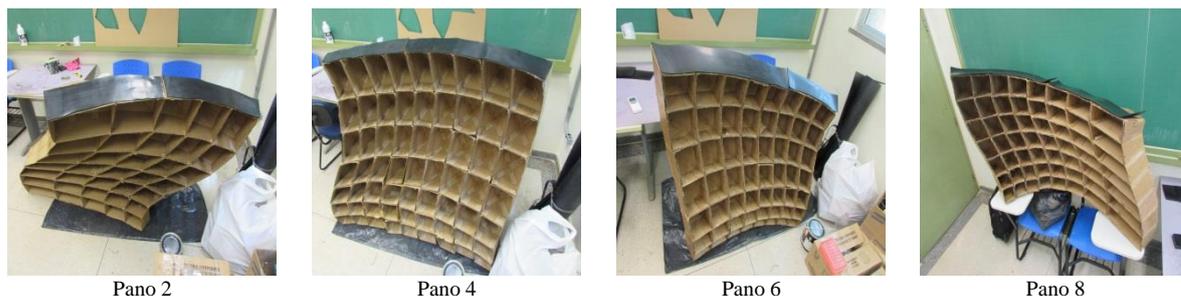


Figura 35: Emborrachado dos panos da base 2-4-6-8. Fonte Própria.

#### 2.1.5.7.2.2.7 Observação na montagem dos panos

Assim, sendo que a deformação e resistência dos módulos dependem do tamanho, que os panos com superfícies com dupla curvatura mais acentuada apresentam maiores deformações, que o processo de fabricação digital apresenta menos deformação nos artefatos, que a aplicação de resina a base d'água aumenta a resistência nos artefatos construídos em papelão, que a proteção de borracha teve que ser realizada manualmente pela deformação dos artefatos; em tais observações, nesta tese, será adotado que a montagem dos panos foi um processo de fabricação inteiramente manual e limitado em termos de produção dos artefatos conforme os modelos digitais.

#### 2.1.5.7.2.3 Observação na montagem dos módulos e panos

Assim, sendo que o processo de fabricação dos módulos foi inteiramente manual e que quanto maior é o tamanho do módulo, maior é a deformação e menor a resistência e; que a montagem

dos panos foi um processo de fabricação inteiramente manual e limitado em termos de produção dos artefatos conforme os modelos digitais; em tais observações, nesta tese, será adotado que a montagem dos módulos e panos é um processo manual e apresenta maiores deformações e menores resistências quanto maiores sejam os artefatos produzidos.

#### *2.1.5.7.3 Observação na fabricação*

Assim, sendo que o corte digital a laser dos módulos por peça única demanda menos tempo na organização e montagem dos módulos, além de diminuir a deformação dos módulos; que a montagem dos módulos e panos é um processo manual e apresenta maiores deformações e menores resistências quanto maiores sejam os artefatos produzidos; em tais observações, nesta tese, será adotado que a fabricação dos módulos e panos é um processo de produção manual que apresenta limitação em termos de correspondência do artefato produzido e o modelo digital e, redução da resistência dos módulos e panos em função do tamanho e preservação da espessura das faces dos módulos.

#### *2.1.5.8 Montagem do pavilhão*

A montagem do Pavilhão foi estruturada em 4 fases: 1) A fixação dos panos do pavilhão, 2) A colocação dos dispositivos de ligação, 3) A montagem do pavilhão e, 4) Comparação do pavilhão fabricado com papelão de onda simples com os modelos reduzidos produzidos com impressão 3D. Onde foi observado que o pavilhão pode ser fabricado hibridamente com papelão de onda simples sempre que as curvaturas da superfície sejam suaves e, os tamanhos dos módulos guardem relação com a espessura da matéria prima para alcançar uma resistência adequada. E, ao mesmo tempo, considerar que o processo de fabricação híbrida apresenta maior deformação nos artefatos quando comparado com o processo de fabricação digital.

#### 2.1.5.8.1 União dos panos

A união dos panos foi realizada com dispositivos de ligação construídos manualmente. O dispositivo de ligação foi construído utilizando 3 plaquinhas de borracha, um parafuso, 2 arruelas e uma porca borboleta. As plaquinhas de borracha foram projetadas para exercer pressão em uma pequena área dos módulos de papelão sem que o parafuso rasgasse o papelão e, serem colocadas em forma intercalada entre as faces dos módulos dos panos. O parafuso, arruelas e porca borboleta foram utilizados para realizar a ligação e imobilização entre as plaquinhas de borracha e as faces dos módulos.



Figura 36: Fabricação dos dispositivos de fixação dos panos. Fonte: Própria

#### 2.1.5.8.2 Dispositivos de ligação

Os dispositivos de ligação dos panos foram colocados com reforço para evitar a deterioração do papelão. O reforço consistiu na aplicação de uma fita adesiva de tecido com o propósito de fornecer maior resistência ao papelão na área de aplicação do dispositivo de ligação.



Reforço para colocação de dispositivos de fixação



Colocação de dispositivos de fixação

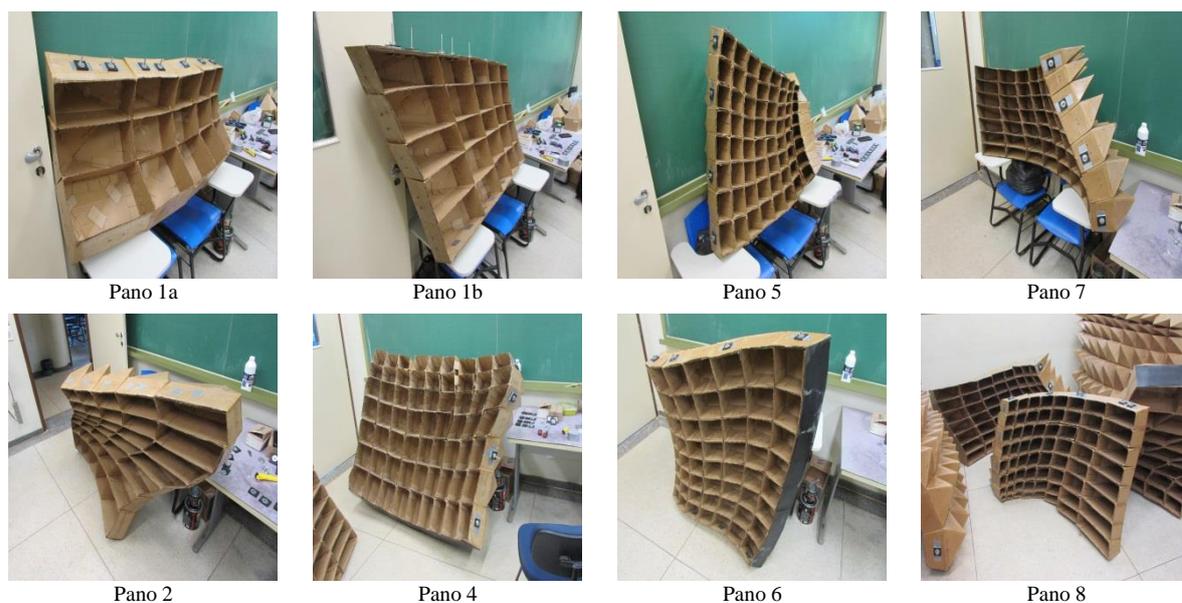


Figura 37: Colocação dos dispositivos de ligação nos painos. Fonte: Própria.

### 2.1.5.8.3 Montagem

O pavilhão foi montado em uma plataforma acima do piso para evitar deterioração. A montagem do pavilhão foi realizada acima de 4 palletes de 1,20m x 1,60m. Os painos da base (painos 2-4-6-8) foram montados primeiro e logo os painos da parte superior (painos 1-3-5-7). A montagem dos painos superiores foi iniciada pelo pino 7, o pino de menor altura, até chegar no pino 1, pino de maior altura. Na montagem do pavilhão foi observado que o pino 3 tinha sofrido muita deformação e isso não permitiu encaixar ele na respectiva posição. A deformação foi consequência de 2 fatores. O primeiro fator foi a curvatura acentuada do pino 3 e, o segundo fator foi a estratégia de fabricação utilizada, por seção ou corte 2D, que apresentou maior deformação nos artefatos produzidos.

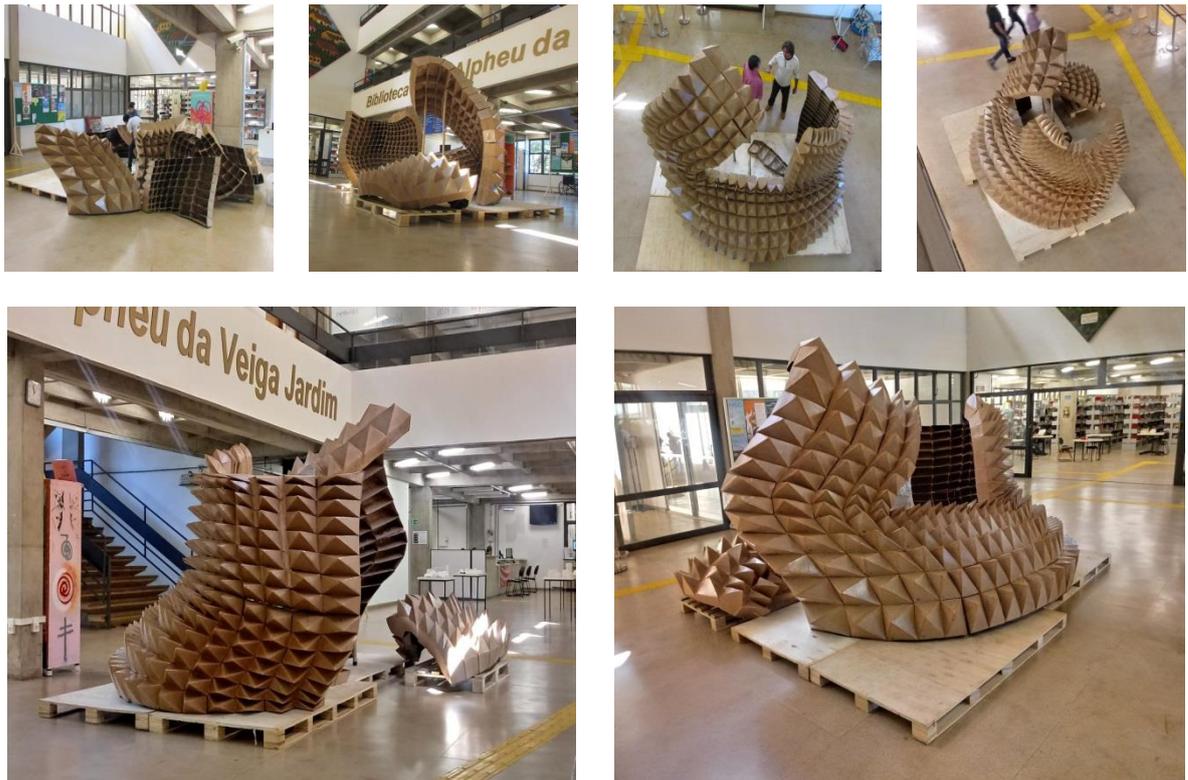


Figura 38: Pavilhão biônico de forma complexa na escala 1:1. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.8.4 Comparação com modelos de tamanho reduzido

O pavilhão na escala 1:1 fabricado em papelão foi comparado com os modelos de tamanho reduzido fabricados digitalmente com impressão 3D de deposição de filamento fundido e foi observado que o pavilhão sofreu deformações – nos módulos e panos – no pano que apresentou uma dupla curvatura mais acentuada.

Na comparação do pavilhão de papelão com o modelo de tamanho reduzido de faces finas foi observado que o pavilhão sofreu deformações nos módulos e nas curvaturas dos panos. A principal deformação - nos módulos e panos - foi no pano 3 devido a que esse pano foi de uma dupla curvatura mais acentuada.

Na comparação do pavilhão com o modelo reduzido de faces de maior espessura também foi observado que o pavilhão sofreu deformações nos módulos e na curvatura dos panos. A principal deformação - nos módulos e nos panos - foi no pano 3 devido à dupla curvatura mais acentuada.

E, na comparação entre os panos dos dois modelos de tamanho reduzido foi observado que eles apresentaram diferentes curvaturas. As curvaturas nos panos do modelo de tamanho reduzido de faces com maior espessura foram mais acentuadas que nos panos do modelo de tamanho reduzido de faces finas. Essa diferença foi devido à máquina de impressão 3D e o material, utilizados. O modelo de tamanho reduzido de faces finas foi produzido em uma impressora 3D Delta utilizando o filamento de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (*ABS*) derivado do petróleo. E, o modelo de tamanho reduzido de faces de maior espessura foi produzido em uma impressora 3D *RepRap Uberblock* utilizando o filamento de ácido poliláctico (*PLA*) derivado do amido de milho ou cana de açúcar.



Pavilhão na esc. 1:1



Pavilhão em esc. reduzida de faces finas



Pavilhão em esc. reduzida de faces com maior espessura

Figura 39: Comparação do pavilhão na escala 1:1 de papelão com os pavilhões em tamanho reduzido fabricados com impressão 3D. Fonte: Própria.

#### 2.1.5.8.5 Observação na montagem do pavilhão

Assim, sendo que os panos foram unidos com dispositivos de ligação construídos manualmente, que os dispositivos de ligação foram colocados com reforços para evitar a deterioração do papelão, que o pavilhão foi montado em uma plataforma acima do piso para evitar a deterioração, que o pavilhão foi comparado com os modelos de tamanho reduzido fabricados digitalmente com impressão 3D de deposição de filamento fundido e foi observado que o pavilhão sofreu deformações – nos módulos e panos – no pano que apresentou uma dupla curvatura mais acentuada; em tais observações, nesta tese, será adotado que o pavilhão pode ser fabricado hibridamente (misturando processos de fabricação digital e processos de fabricação manual) utilizando o papelão de onda simples. Procurando que as curvaturas da superfície sejam suaves e o tamanho dos módulos guarde relação com a resistência do

papelão. E, considerando que o processo de fabricação híbrido apresenta maior deformação se comparado com o processo de fabricação digital.

#### 2.1.6 Síntese

Nesta tese será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se a hipótese guia do experimento: As tecnologias digitais – fotografia digital, *software Autodesk recap pro*, *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem digitalizar e projetar um protótipo de pavilhão de forma complexa ou de geometrias não euclidianas na escala 1:1, inspirado nas formas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software coreldraw 7.0*, *impressora 3D Delta*, *software cura 15.04.6*, *impressora repprap uberblock*, *impressora repprap anet a8*, *thunder laser*, *lasercut 5.3*, cortadora a laser de marca *thunder laser* modelo nova 51 mesa de corte de 1400mm x1030mm, cortadora a laser de marca *laser engraving & cutting machine* mesa de corte de 1400mm x1030mm. - permitem a produção do protótipo utilizando papelão de onda simples. Nas cidades de Brasília no Distrito Federal (DF) e Goiânia no Estado de Goiás (GO).

A partir das observações listadas na tabela a seguir:

Tabela 2: Observações no Protocolo do Experimento 1

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Levantamento Fotográfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Câmera Fotográfica de marca DSLR Nikon modelo D600.</li> </ul>	<p>As espécies frutíferas foram selecionadas pela sua presença na cidade de Brasília no DF e pela peculiaridade geométrica não euclidiana das formas na parte exterior dos frutos. Onde os módulos modificam seu tamanho e forma segundo as curvaturas da superfície que conformam.</p>
2	Maquete Rápida de Papel	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papel Chamex Branco, formato A4, 75 gr.</li> </ul>	<p>As maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas irregulares (papel amassado) apresentam uma maior possibilidade na definição de formas de superfície de dupla curvatura, mas os módulos construídos com dobraduras de formas regulares de quadrados e triângulos de diferentes tamanhos com dispositivos de conexão pelas arestas apresentaram uma possibilidade de definição de formas de superfícies de dupla curvatura com pouca resistência se comparados com os módulos que se conectam pelas faces.</p>
3	Restituição Fotogramétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Autodesk ReCap Pro.</i></li> </ul>	<p>A restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras irregulares, papel amassado, da superfície de dupla curvatura apresentou arestas perimétricas com maiores curvaturas e foi selecionada para ser parametrizada.</p>
4	Parametrização	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper.</i></li> </ul>	<p>Os protótipos parametrizados do pavilhão biônico de forma complexa foram preparados considerando as estratégias de fabricação digital e uso final, estudo do planejamento da fabricação, a própria fabricação e a montagem do pavilhão.</p>

5	Prototipagem Rápida 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora 3D <i>Delta</i>;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Uberblock</i>;</li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6</i>.</li> </ul>	<p>A prototipagem 3D física do pavilhão biônico em tamanho reduzido - para ser produzido pelo processo de fabricação digital por seção na escala 1:1 ou pelo processo de fabricação digital de adição em tamanho reduzido - é necessária para o estudo da forma final, estudo do planejamento da fabricação, estudo do próprio processo de fabricação e, estudo da montagem do pavilhão.</p>
6	Planejamento da Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Coreldraw 7.0</i>;</li> <li>▪ Edição do desdobramento;</li> <li>▪ Edição para corte.</li> </ul>	<p>O pavilhão biônico de dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m foi dividido em 8 panos para operacionalizar sua fabricação com papelão de onda simples de 6 mm de espessura em pranchas de 1,40m x 1,20m. O papelão foi escolhido pelo seu baixo custo e disponibilidade no mercado de papelaria local. E, os arquivos digitais para o corte a laser devem passar por duas edições: edição de desdobramento e organização dos módulos e, edição para definição de linhas para corte e linhas para dobragem.</p>
7	Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papelão de onda simples, formato de 1,40 m x 1,00 m;</li> <li>▪ Cortadora a Laser de marca <i>Thunder Laser</i>, modelo Nova 51, mesa de corte de 1400mm x1030mm;</li> <li>▪ Cortadora a Laser de marca <i>Laser Engraving &amp; Cutting Machine</i>, mesa de corte de 1400mm x1030mm.</li> <li>▪ <i>Software Thunder Laser</i>;</li> <li>▪ <i>Software Lasercut 5.3</i>.</li> </ul>	<p>A fabricação dos módulos e panos é um processo de produção manual que apresenta limitação em termos de correspondência do artefato produzido e o modelo digital e, redução da resistência dos módulos e panos em função do tamanho e preservação da espessura das faces dos módulos.</p>
8	Montagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Montagem Manual;</li> </ul>	<p>O pavilhão pode ser fabricado hibridamente (misturando processos de fabricação digital e processos de fabricação manual) utilizando o papelão de onda simples. Procurando que as curvaturas da superfície sejam suaves e o tamanho dos</p>

			módulos guarda relação com a resistência do papelão. E, considerando que o processo de fabricação híbrido apresenta maior deformação se comparado com o processo de fabricação digital.
--	--	--	---

## 2.2 Experimento 2: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido

### 2.2.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de pavilhão biônico de forma complexa e celular inspirado nas estruturas naturais.

### 2.2.2 Hipótese

As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem projetar um protótipo de pavilhão de forma complexa ou de geometrias não euclidianas de tamanho reduzido e inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software ZPrinter*, *software cura 15.04.6*, impressora *ZCorp Printer 310*, impressora *reprap uberblock*, impressora *reprap anet a8* - permitem a produção do pavilhão pela fundição de pó *ZCast 500*, fundição de pó de gesso-maltodextrina-açúcar, fundição de filamento de acrilonitrila butadieno estireno – *ABS*, e fundição de filamento de ácido poliláctico – *PLA*. Nas cidades de Brasília (DF) e de Goiânia (GO).

### 2.2.3 Objetivo Geral

Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de pavilhão biônico de geometrias não euclidianas em tamanho reduzido inspirado nas formas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).

#### 2.2.3.1 Objetivos específicos

- Determinar a definição *Grasshopper* e modelagem 3D digital do pavilhão biônico;
- Determinar as fases da operacionalização da fabricação digital por adição do pavilhão biônico;
- Determinar a tecnologia de fabricação digital por adição;
- Determinar as fases da operacionalização da montagem do pavilhão biônico.

### 2.2.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo têm sido estruturado em 4 fases.

- Código gráfico e modelagem 3D digital do pavilhão biônico;
- Operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico;
- Seleção de tecnologia de fabricação digital por adição;
- Fabricação digital por adição.

## 2.2.5 Desenvolvimento do Experimento

### 2.2.5.1 Código gráfico e modelo 3D do pavilhão biônico

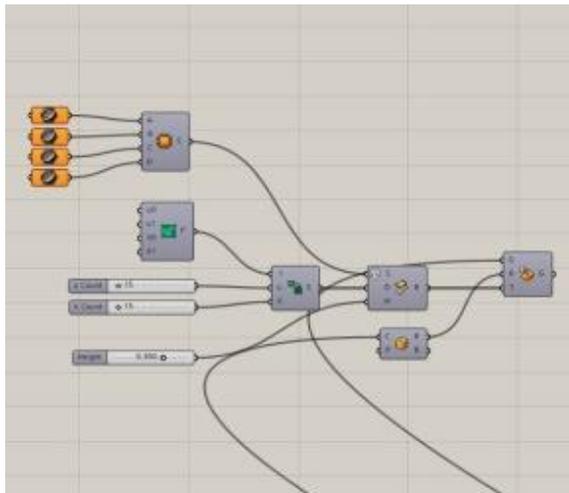
Esta fase foi estruturada em 4 momentos: 1) Código gráfico da superfície, 2) Código gráfico do módulo, 3) Código gráfico da superfície do pavilhão dividido em módulos e, 4) Modelagem 3D do pavilhão.

Onde a principal observação foi que o processo de projeção digital utilizando um código gráfico permite a customização em massa de qualquer tipo de geometria – não euclidiana e euclidiana, preservando as proporções estabelecidas no projeto dos componentes.

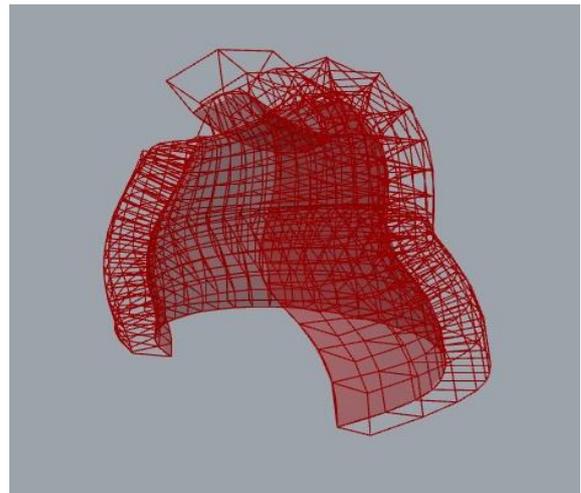
#### 2.2.5.1.1 Código gráfico da superfície

A superfície do pavilhão foi gerada a partir de um processo de 4 passos: 1) Definição das curvas *nurbs* tridimensionais, 2) Subdivisão da superfície, 3) Panelização da superfície e, 4) Torção dos módulos.

No primeiro passo da definição das curvas *nurbs tridimensionais*, a superfície foi modelada a partir de 4 curvas *nurbs* tridimensionais -previamente definidas. No segundo passo da subdivisão da superfície, a superfície foi subdividida em filas e colunas. No terceiro passo da panelização da superfície, a subdivisão da superfície foi convertida em painéis tridimensionais torcidos. E, no quarto passo da torção dos módulos, os painéis torcidos foram convertidos para conter um determinado módulo.



Definição com *plugin Grasshopper*



Superfície Panelizada

Figura 40: Código gráfico da superfície. Fonte: Própria.

Neste processo foi observada a versatilidade do código gráfico para o controle da geometria não euclidiana da superfície do pavilhão. O código permitiu a rápida modificação da forma da superfície, determinar o número de módulos distribuídos ao longo da superfície e, determinar o tamanho dos módulos.

Assim, o código se apresentou como a parte mais importante no controle do processo de projeção digital da superfície de geometria não euclidiana.

#### 2.2.5.1.2 Código gráfico do módulo

O módulo do pavilhão foi gerado a partir de um processo de 6 passos: 1) definição dos pontos, 2) Geração das linhas, 3) Geração das superfícies, 4) Geração das extrusões, 5) Execução das subtrações e, 6) Definição da forma sólida.

No primeiro passo, da definição dos pontos, os pontos foram criados para determinar os vértices do módulo. No segundo passo, da geração das linhas, os pontos foram conectados por linhas e foram definidas as arestas das superfícies e das áreas para perfuração. No terceiro passo, da geração das superfícies, as superfícies definiram a forma do módulo e as áreas das superfícies para perfuração. No quarto passo, da geração das extrusões, as superfícies foram engrossadas. No quinto passo, da execução das subtrações, as áreas para serem perfuradas

foram subtraídas e, No sexto passo, da definição da forma sólida, os componentes do módulo foram convertidos em uma forma sólida.

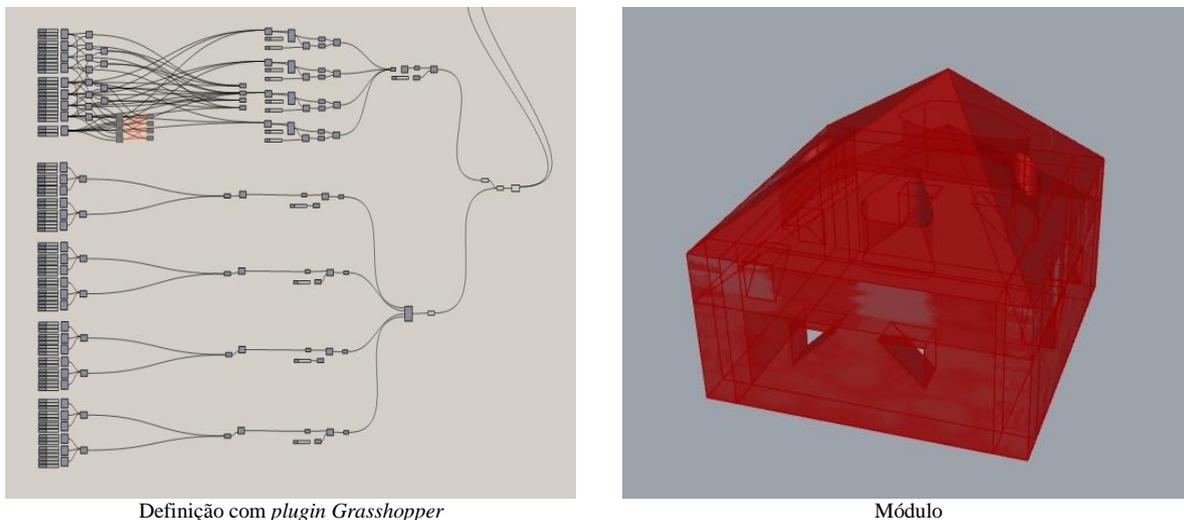


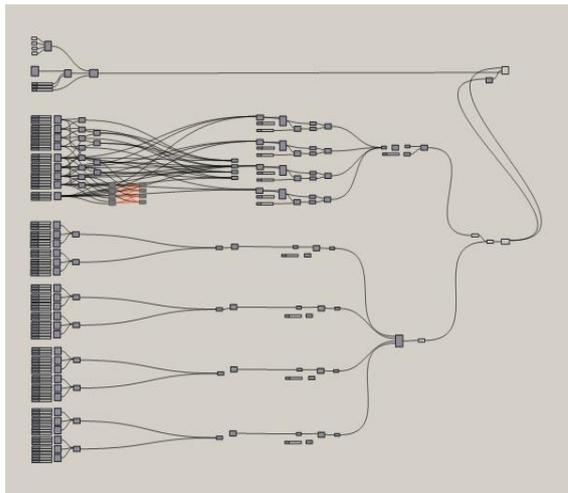
Figura 41: Código gráfico do módulo. Fonte: Própria.

Neste processo foi observada a versatilidade do código gráfico para o controle da geometria euclidiana do módulo e para realizar sua distribuição ao longo da superfície de geometria não euclidiana do pavilhão. O código permitiu a rápida modificação do tamanho do módulo, forma do módulo, espessura das faces e, o tamanho das perfurações.

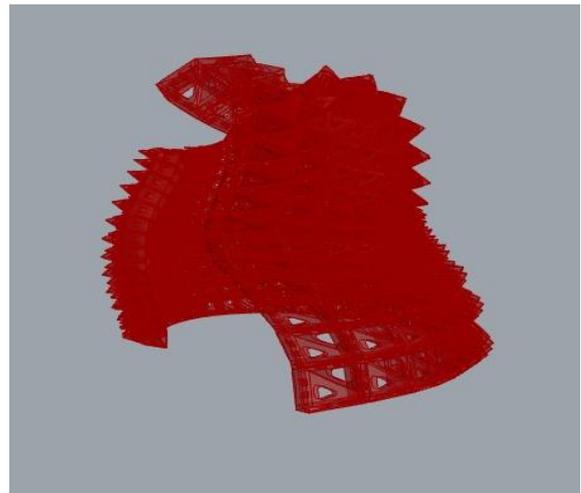
Assim, o código se apresentou como a parte mais importante do controle do processo de projeção digital do módulo de geometria euclidiana.

### 2.2.5.1.3 Código gráfico da superfície do pavilhão dividido em módulos

O código do pavilhão foi constituído por dois códigos gráficos: um código da programação da superfície e, outro código da programação do módulo. O código do módulo foi conectado com o código da superfície pelo painel da definição da forma sólida.



Definição com *plugin Grasshopper*



Superfície Modulada

Figura 42: Código gráfico da superfície do pavilhão dividido em módulos. Fonte: Própria.

Neste processo foi observado que o código do pavilhão é composto por uma parte que controla a superfície do pavilhão e, outra parte que controla o módulo. Ao mesmo tempo, também foi observado que ao ser modificada a superfície do pavilhão também foram modificados os módulos, mas ao ser modificado o módulo não foi modificada a forma da superfície não euclidiana do pavilhão. Também foi observado que o módulo sofreu uma transformação de sua geometria euclidiana para uma geometria não euclidiana da superfície do pavilhão e, que o módulo pode ser substituído por qualquer outro módulo sem modificar a forma da superfície do pavilhão.

Assim, o código do pavilhão permite controlar a forma e a textura da superfície por parâmetros: de forma das curvas do perímetro da superfície, de subdivisão da superfície, de panelização torcionada 3D da superfície, de posição dos pontos do vértice do módulo e extrusão das superfícies.

#### 2.2.5.1.4 Modelagem 3D do pavilhão

O pavilhão em escala 1:1 foi projetado nas dimensões de 2,5m x 2,5m x 2,5m e modelado tridimensionalmente com 450 módulos distribuídos em 15 filas e 30 colunas. Os módulos foram de diferentes dimensões, mas com a mesma altura.

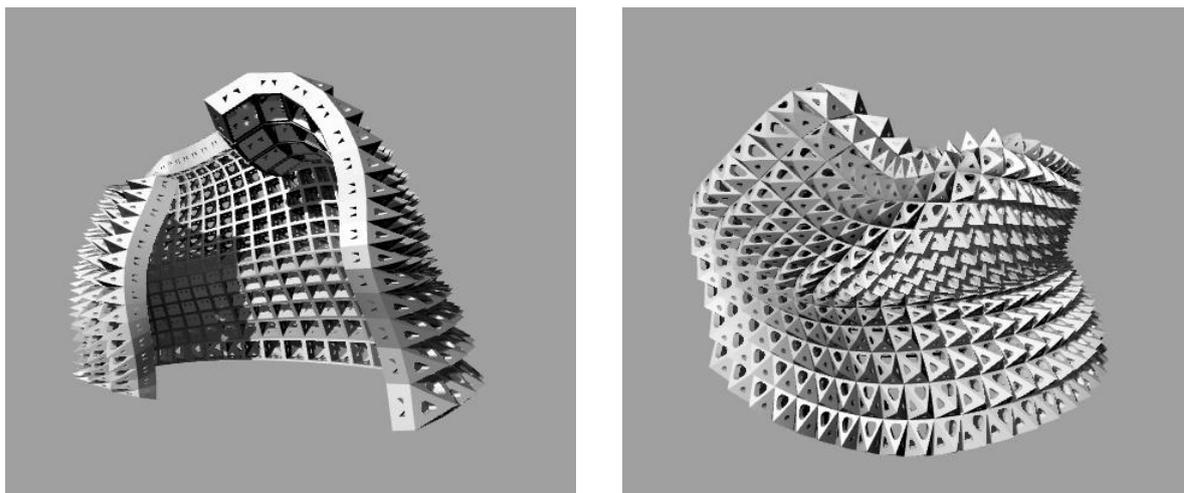


Figura 43: Modelagem 3D digital do pavilhão. Fonte: Própria.

No processo de modelagem foi observado que os módulos preservaram a proporção estabelecida na projeção da espessura das faces. Quanto maior foi o tamanho dos módulos, maiores foram as espessuras das suas faces e vice-versa, quanto menor o módulo menor as espessuras das faces.

Assim, a modelagem tridimensional do pavilhão pelo código gráfico permitiu a customização em massa automaticamente dos módulos guardando as proporções que foram estabelecidas na projeção da espessura das faces do módulo.

#### *2.2.5.1.5 Observação no código gráfico e modelo 3D do pavilhão biônico*

Assim, sendo que o código gráfico permitiu o controle do processo de projeção digital das superfícies não euclidianas e euclidianas, que o código gráfico permitiu controlar as formas e texturas, que o código gráfico permitiu a customização em massa automaticamente guardando as proporções estabelecidas na projeção; em tais observações, nesta tese, será adotado que o processo de projeção digital utilizando um código gráfico permite a customização de formas de geometrias não euclidianas e euclidianas em massa automaticamente e guardando as proporções estabelecidas na projeção dos componentes.

### *2.2.5.2 Operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico*

A operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico foi estruturada em duas fases: 1) Divisão do pavilhão em panos e, 2) Divisão dos panos em blocos. Onde foi observado que o tamanho máximo do pano e do módulo depende diretamente do tamanho da mesa de impressão da impressora disponível para realizar a fabricação.

#### *2.2.5.2.1 Divisão em panos*

O modelo 3D digital do pavilhão foi dividido em 8 panos para viabilizar a fabricação digital e organização dos módulos. O pano 1, localizado na parte superior do pavilhão, ficou conformado por 40 módulos. O pano 2, localizado na parte inferior do pavilhão logo abaixo do pano 1, ficou conformado por 35 módulos. O pano 3, localizado na parte superior do pavilhão do lado direito do pano 1, ficou conformado por 72 módulos. O pano 4, localizado na parte inferior do pavilhão do lado direito do pano 2, ficou conformado por 63 módulos. O pano 5, localizado na parte superior do pavilhão do lado direito do pano 3, ficou conformado por 64 módulos. O pano 6, localizado na parte inferior do pavilhão do lado direito do pano 4, ficou conformado por 56 módulos. O pano 7, localizado na parte superior do pavilhão do lado direito do pano 5, ficou conformado por 64 módulos. O pano 8, localizado na parte inferior do pavilhão do lado do pano 6, ficou conformado por 56 módulos. Ver figura logo abaixo.

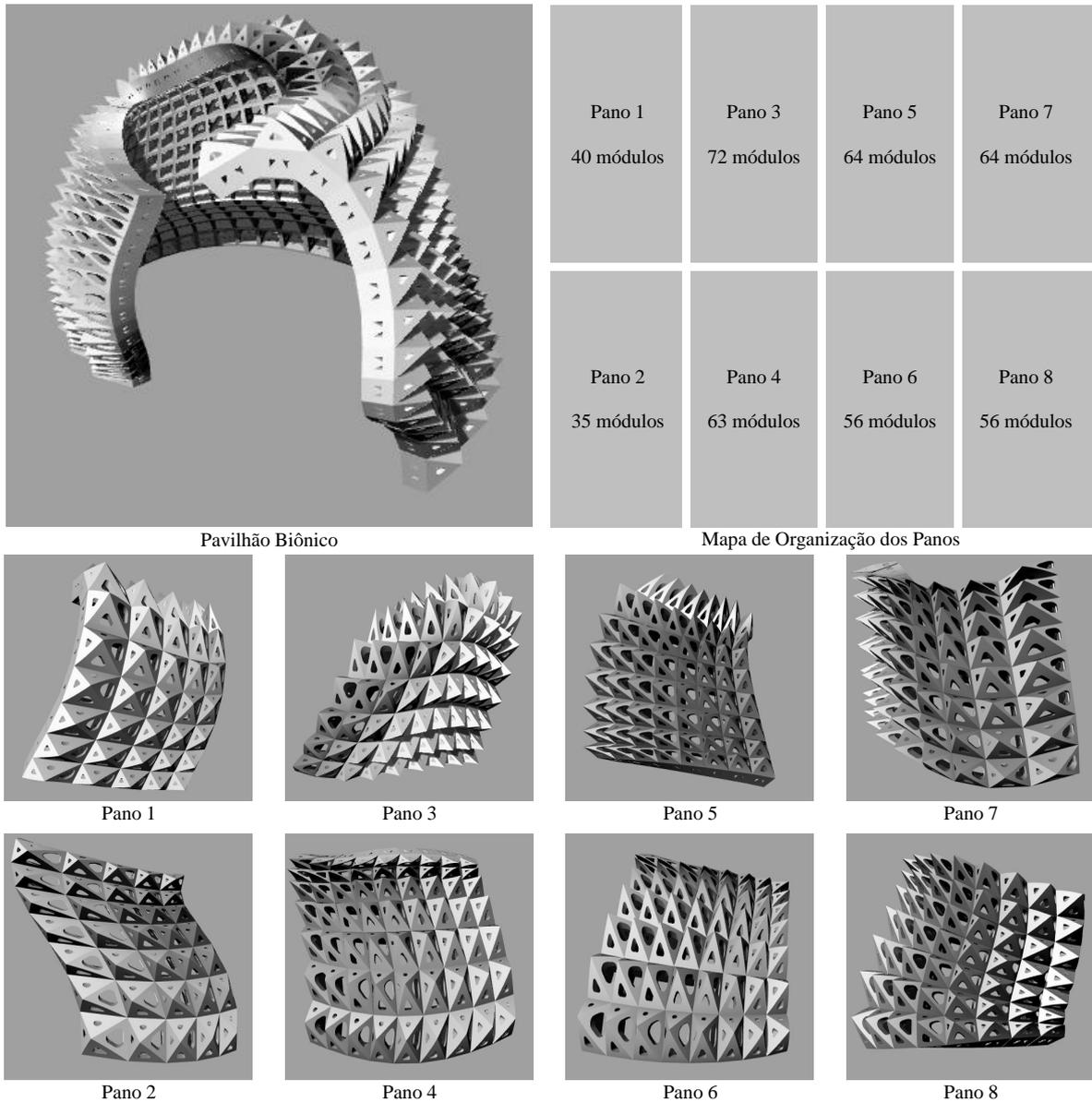


Figura 44: Divisão em panos do pavilhão. Fonte: Própria.

Neste processo foi observado que os panos poderiam ser fabricados em uma escala maior sempre que todos os panos guardassem a mesma proporção. E, que o tamanho máximo de impressão dos panos dependeria da escolha do módulo ou bloco (conjunto de módulos) possível de ser impresso na mesa de impressão da impressora 3D utilizada, além do tempo de impressão por cada peça. Outra observação importante foi a necessidade de codificar as peças para serem organizadas.

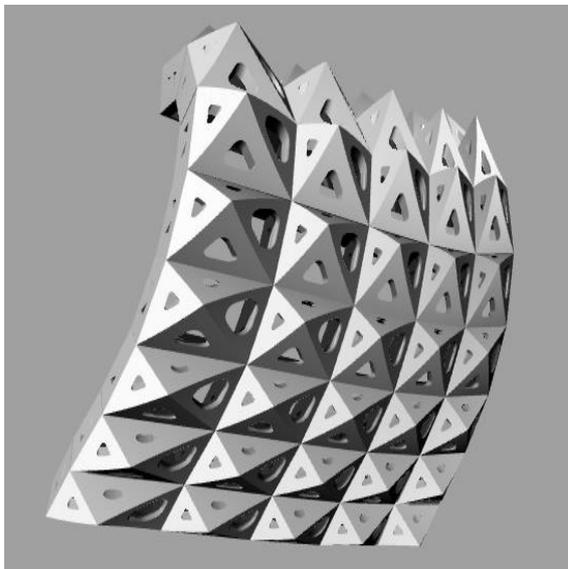
Assim, a divisão do pavilhão em panos viabiliza a fabricação e a organização dos módulos.

#### 2.2.5.2.2 Divisão dos panos em blocos para impressão

Os panos foram divididos em blocos em função do maior tamanho que podia ser impresso na impressora disponível e o tempo de impressão de 4 horas em média por cada peça. Após a criação dos blocos foi realizada a identificação do bloco de maior tamanho, dentre todos os panos, para determinar a proporção máxima para impressão dos blocos. O bloco de maior tamanho foi localizado no pano 2, bloco de código P2e. O pano 2 foi um dos panos de maior tamanho da divisão da superfície do pavilhão, embora seja o pano de menor quantidade de módulos.

##### 2.2.5.2.2.1 Pano 1 dividido em blocos

O pano 1 conformado por 40 módulos distribuídos em 8 filas e 5 colunas foi dividido em 8 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 2 colunas.



Pano 1

P1a 4 módulos	P1b 6 módulos
P1c 4 módulos	P1d 6 módulos
P1e 4 módulos	P1f 6 módulos
P1g 4 módulos	P1h 6 módulos

Mapa de Organização

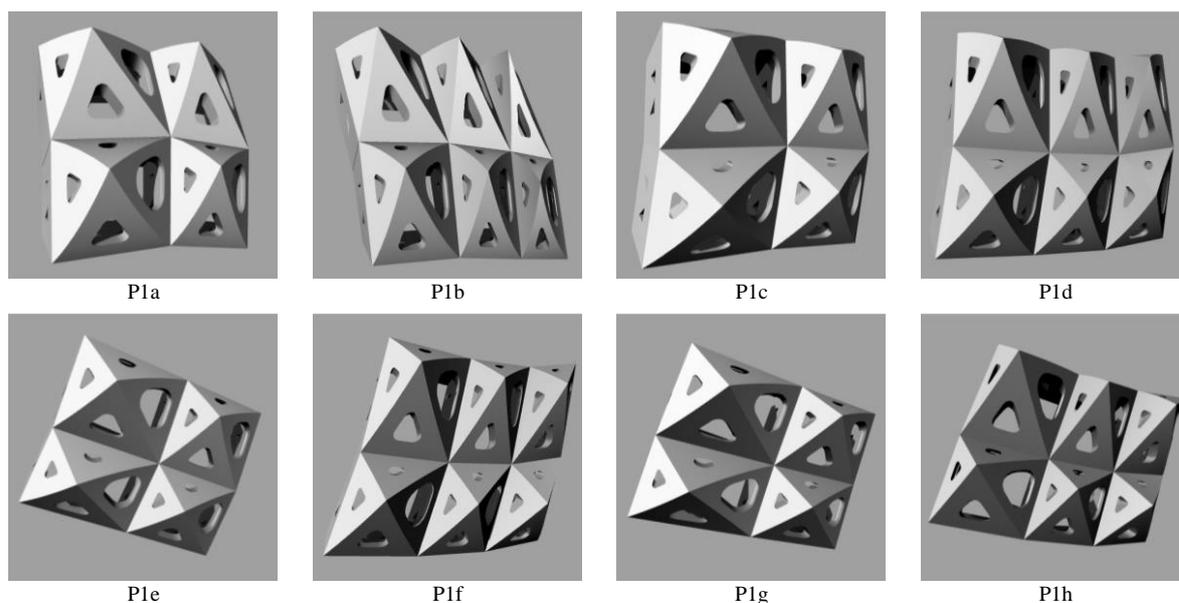
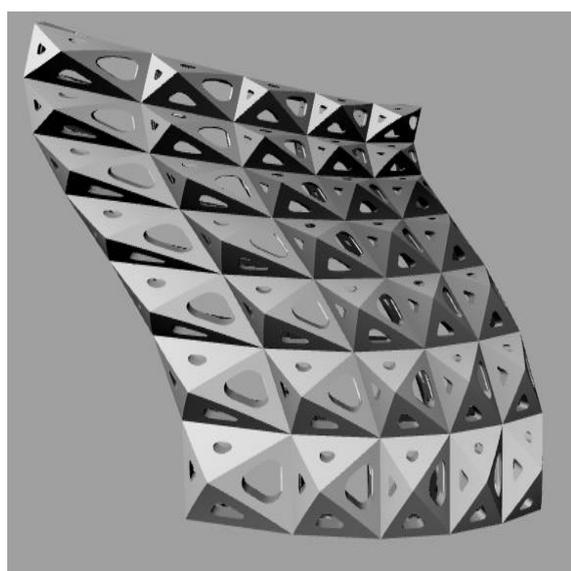


Figura 45: Divisão do pano 1 em blocos. Fonte: Própria.

#### 2.2.5.2.2.2 Pano 2 dividido em blocos

O pano 2 conformado por 35 módulos distribuídos em 7 filas e 5 colunas foi dividido em 8 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 2 colunas.



Pano 2

P2a 4 módulos	P2b 6 módulos
P2c 4 módulos	P2d 6 módulos
P2e 4 módulos	P2f 6 módulos
P2g 2 módulos	P2h 3 módulos

Mapa de Organização

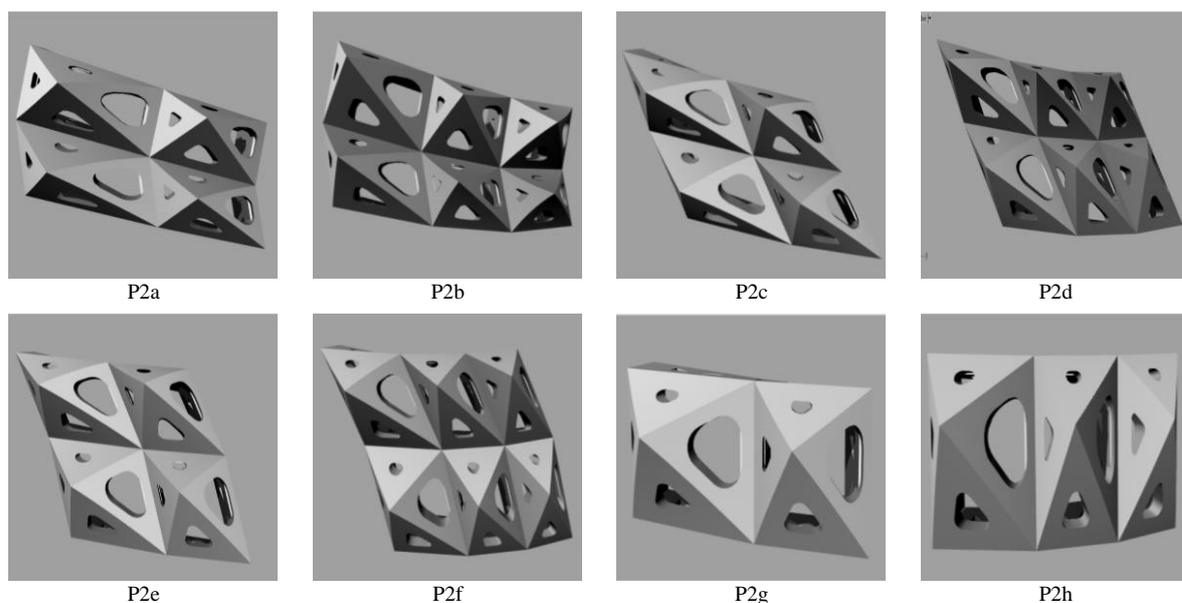
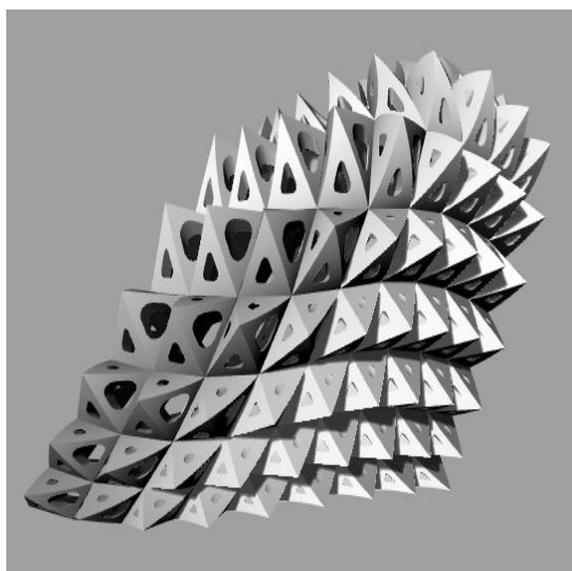


Figura 46: Divisão do pano 2 em blocos. Fonte: Própria.

### 2.2.5.2.2.3 Pano 3 dividido em blocos

O pano 3 conformado por 72 módulos distribuídos em 8 filas e 9 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.



Pano 3

P3a 6 módulos	P3b 4 módulos	P3c 4 módulos	P3d 4 módulos
P3e 6 módulos	P3f 4 módulos	P3g 4 módulos	P3h 4 módulos
P3i 6 módulos	P3j 4 módulos	P3k 4 módulos	P3l 4 módulos
P3m 6 módulos	P3n 4 módulos	P3o 4 módulos	P3p 4 módulos

Mapa de Organização

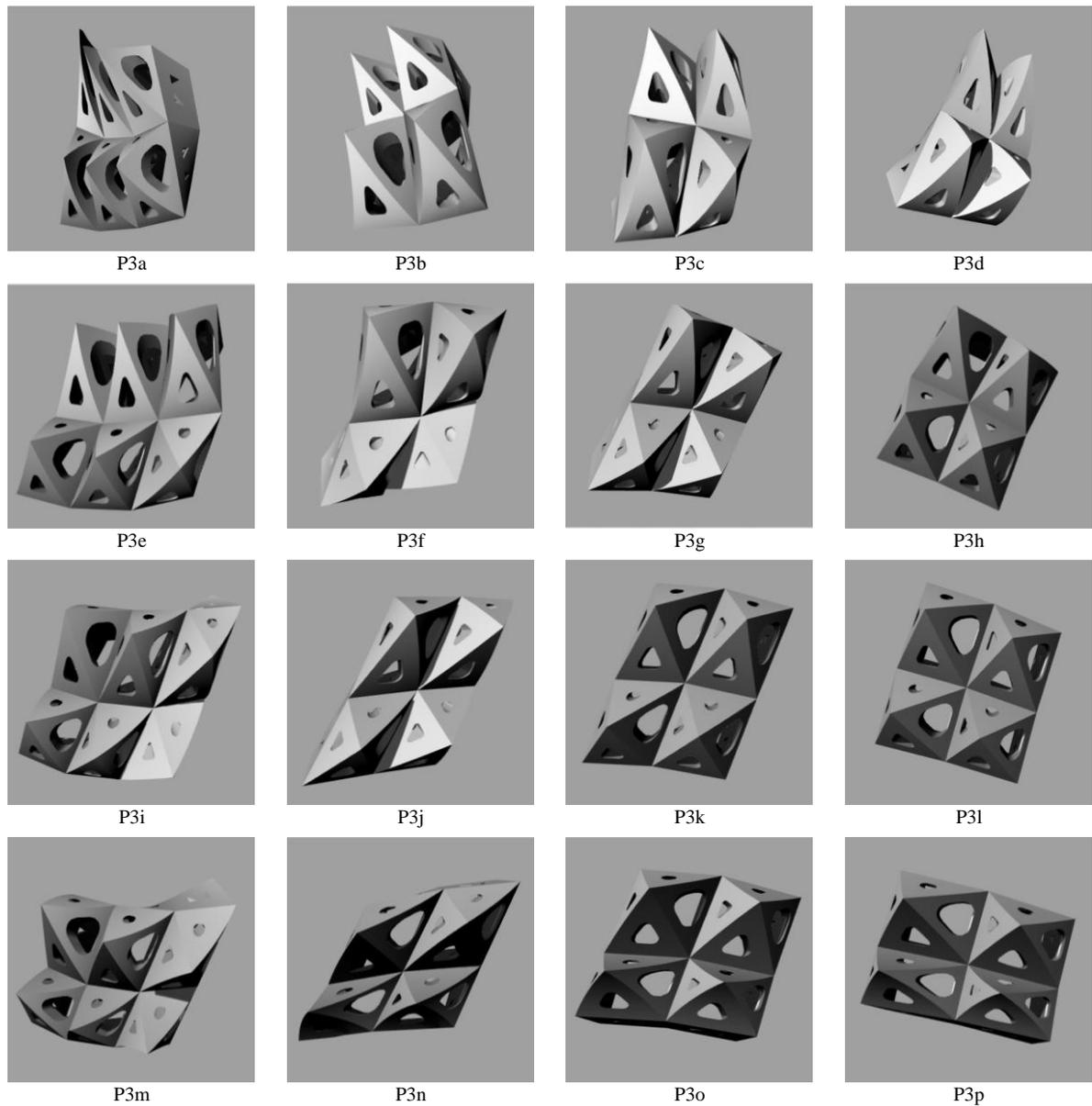
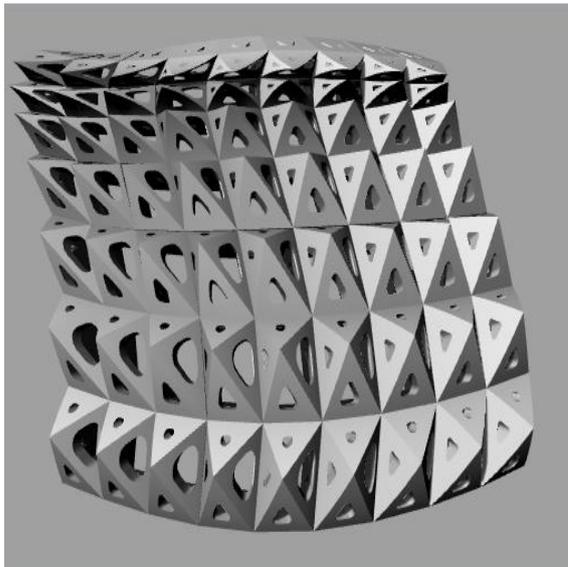


Figura 47: Divisão do pano 3 em blocos. Fonte: Própria.

#### 2.2.5.2.2.4 Pano 4 dividido em blocos

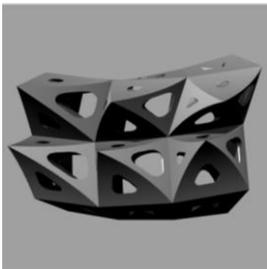
O pano 4 conformado por 63 módulos distribuídos em 7 filas e 9 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.



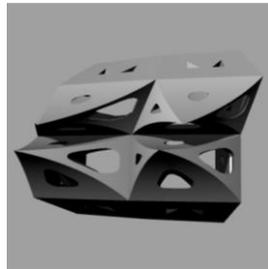
Pano 4

P4a 6 módulos	P4b 4 módulos	P4c 4 módulos	P4d 4 módulos
P4e 6 módulos	P4f 4 módulos	P4g 4 módulos	P4h 4 módulos
P4i 6 módulos	P4j 4 módulos	P4k 4 módulos	P4l 4 módulos
P4m 3 módulos	P4n 2 módulos	P4o 2 módulos	P4p 2 módulos

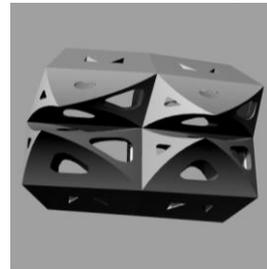
Mapa de Organização



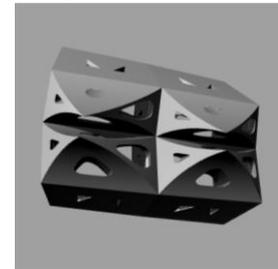
P4a



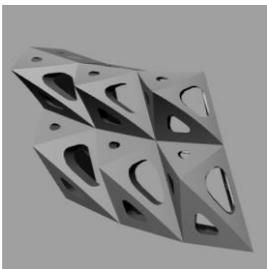
P4b



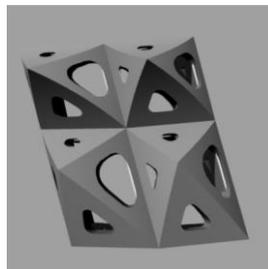
P4c



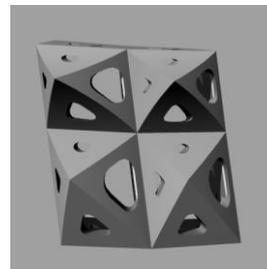
P4d



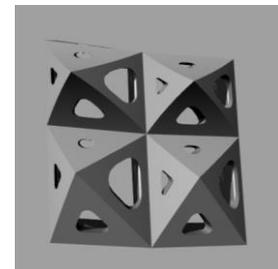
P4e



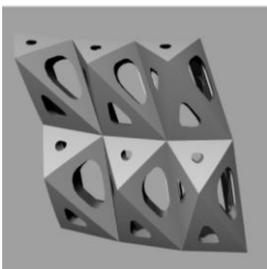
P4f



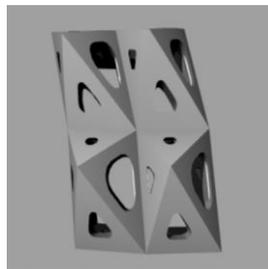
P4g



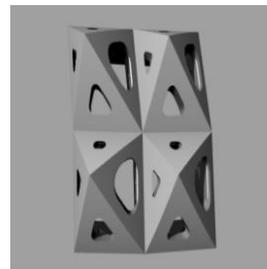
P4h



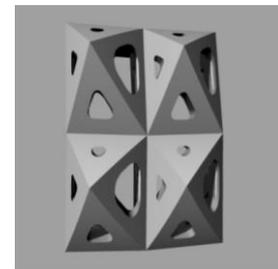
P4i



P4j



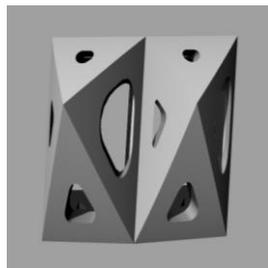
P4k



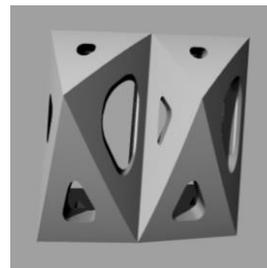
P4l



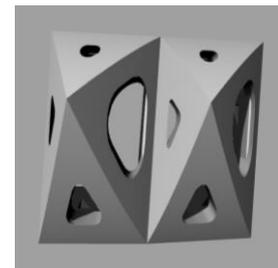
P4m



P4n



P4o

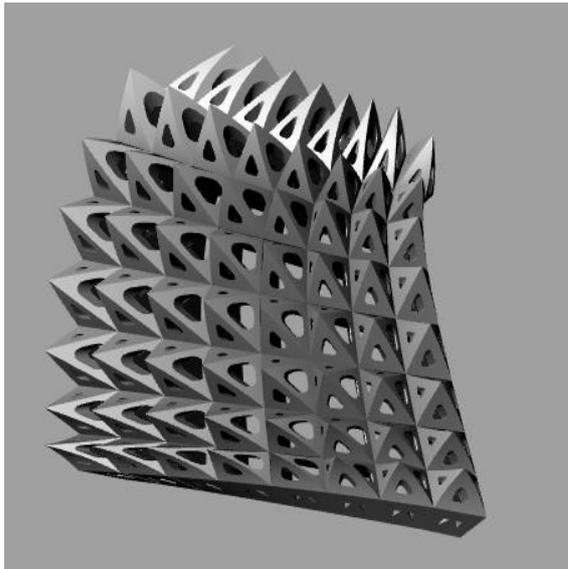


P4p

Figura 48: Divisão do pano 4 em blocos. Fonte: Própria.

2.2.5.2.2.5 Pano 5 dividido em blocos

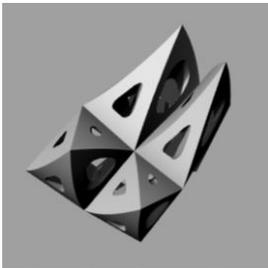
O pano 5 conformado por 64 módulos distribuídos em 8 filas e 8 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.



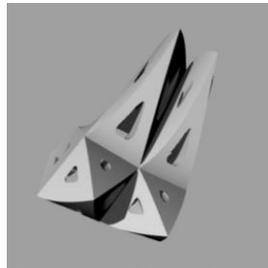
Pano 5

P5a 4 módulos	P5b 4 módulos	P5c 4 módulos	P5d 4 módulos
P5e 4 módulos	P5f 4 módulos	P5g 4 módulos	P5h 4 módulos
P5i 4 módulos	P5j 4 módulos	P5k 4 módulos	P5l 4 módulos
P5m 4 módulos	P5n 4 módulos	P5o 4 módulos	P5p 4 módulos

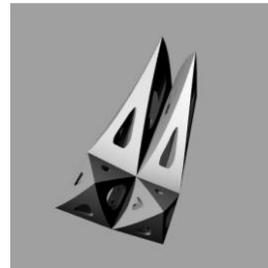
Mapa de Organização



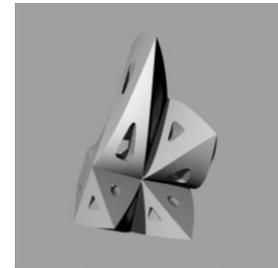
P5a



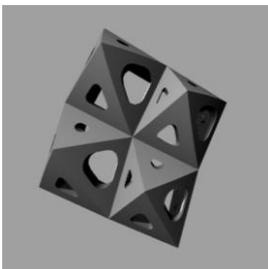
P5b



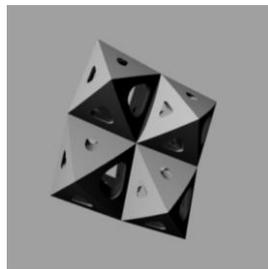
P5c



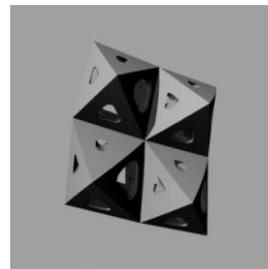
P5d



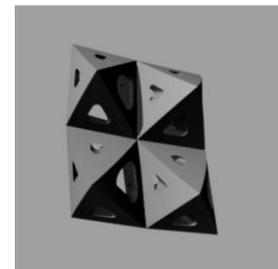
P5e



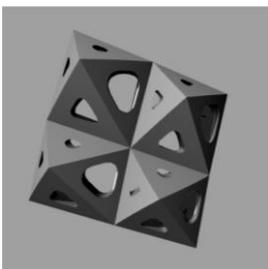
P5f



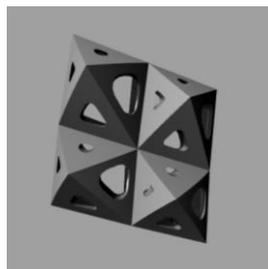
P5g



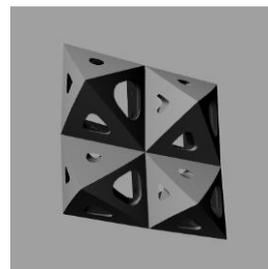
P5h



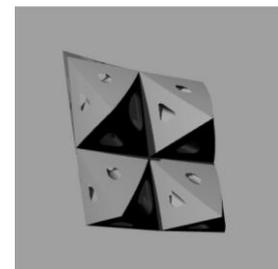
P5i



P5j



P5k



P5l

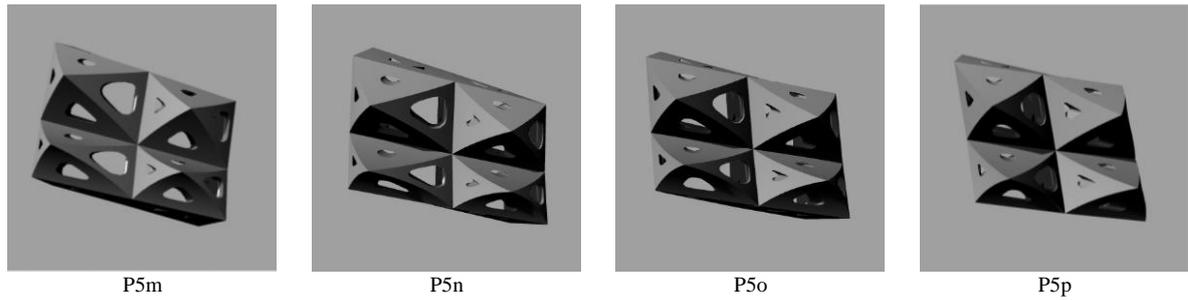
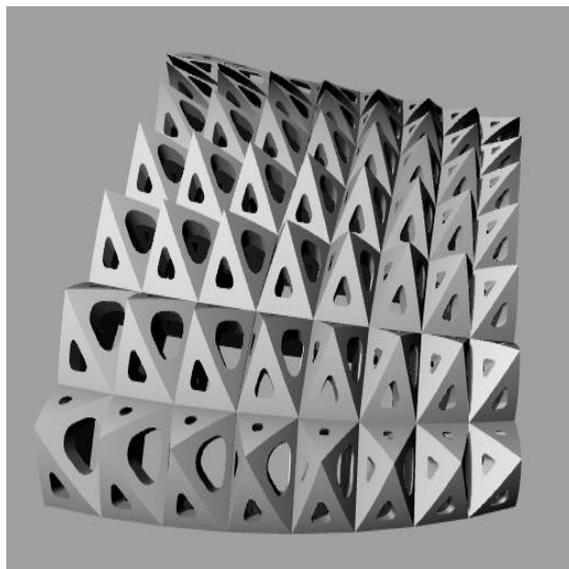


Figura 49: Divisão do pano 5 em blocos. Fonte: Própria.

#### 2.2.5.2.2.6 Pano 6 dividido em blocos

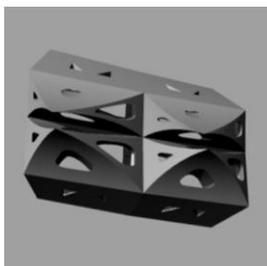
O pano 6 conformado por 56 módulos distribuídos em 7 filas e 8 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.



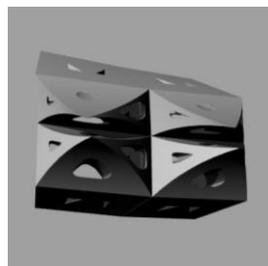
Pano 6

P6a 4 módulos	P6b 4 módulos	P6c 4 módulos	P6d 4 módulos
P6e 4 módulos	P6f 4 módulos	P6g 4 módulos	P6h 4 módulos
P6i 4 módulos	P6j 4 módulos	P6k 4 módulos	P6l 4 módulos
P6m 2 módulos	P6n 2 módulos	P6o 2 módulos	P6p 2 módulos

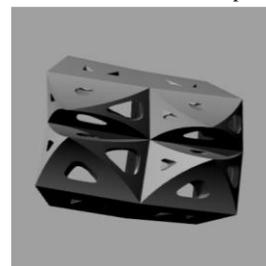
Mapa de Organização



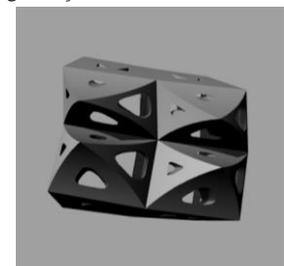
P6a



P6b



P6c



P6d

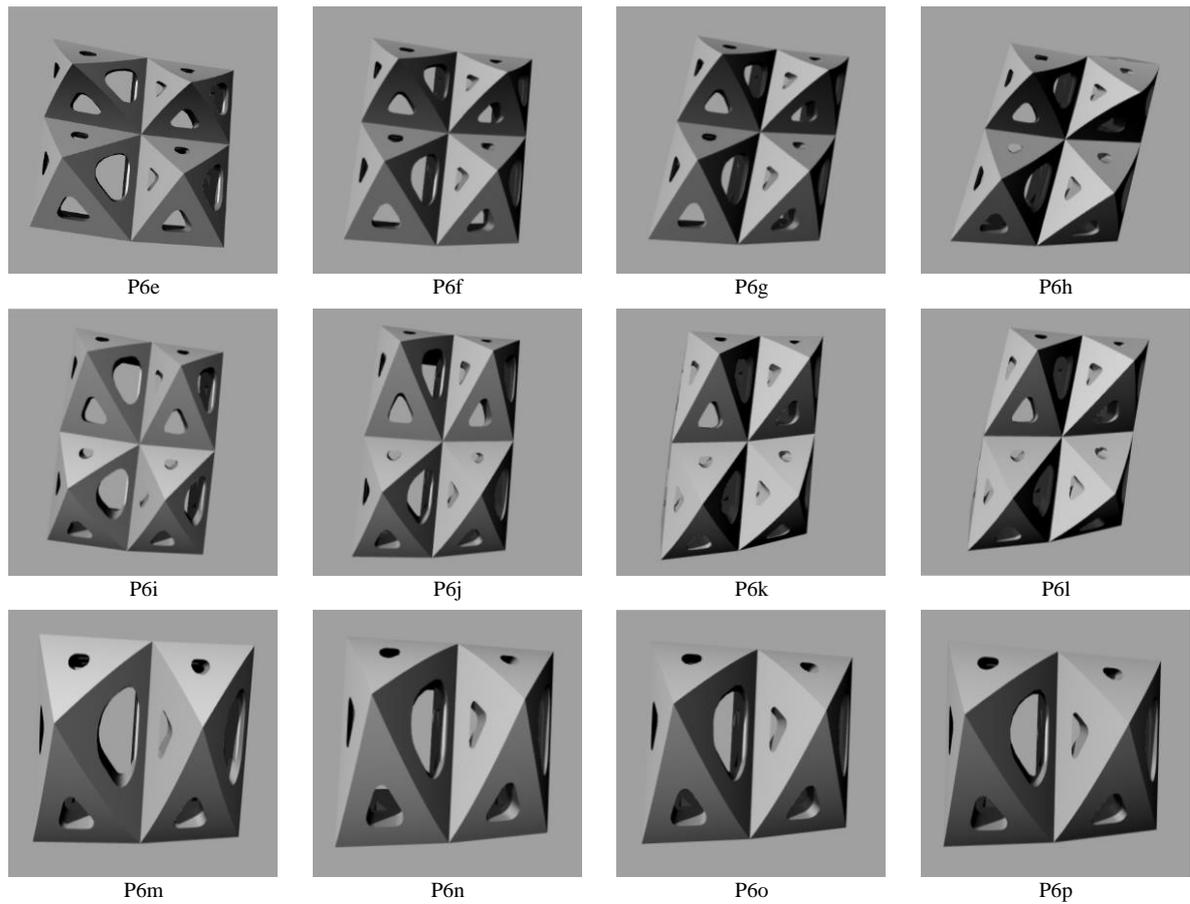
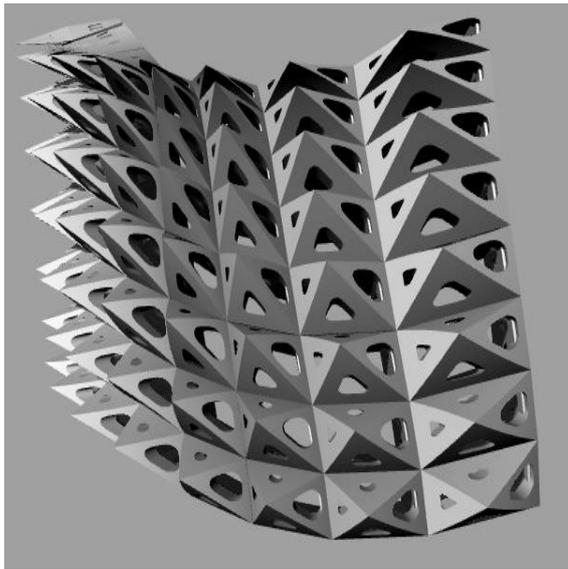


Figura 50: Divisão do pano 6 em blocos. Fonte: Própria.

#### 2.2.5.2.2.7 Pano 7 dividido em blocos

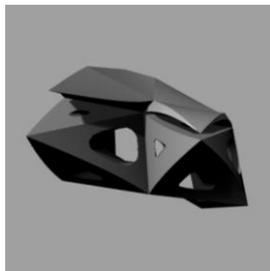
O pano 7 conformado por 64 módulos distribuídos em 8 filas e 8 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.



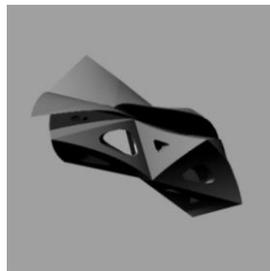
Pano 7

P7a 4 módulos	P7b 4 módulos	P7c 4 módulos	P7d 4 módulos
P7e 4 módulos	P7f 4 módulos	P7g 4 módulos	P7h 4 módulos
P7i 4 módulos	P7j 4 módulos	P7k 4 módulos	P7l 4 módulos
P7m 4 módulos	P7n 4 módulos	P7o 4 módulos	P7p 4 módulos

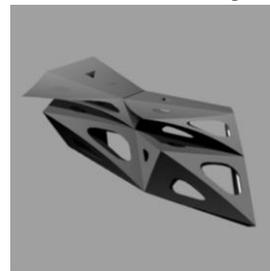
Mapa de Organização



P7a



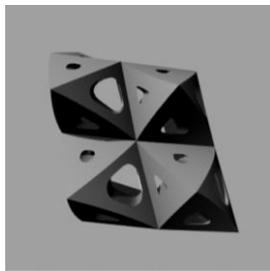
P7b



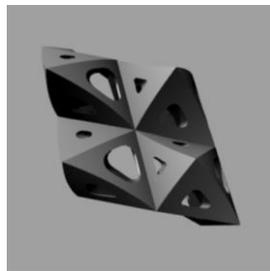
P7c



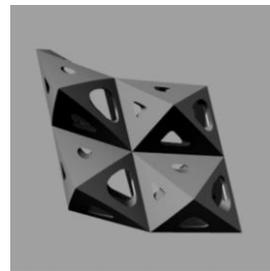
P7d



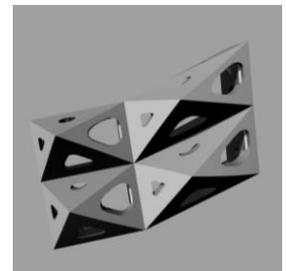
P7e



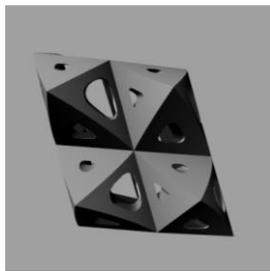
P7f



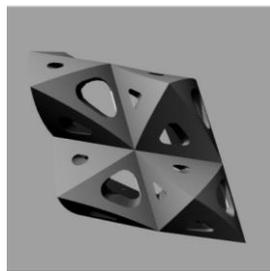
P7g



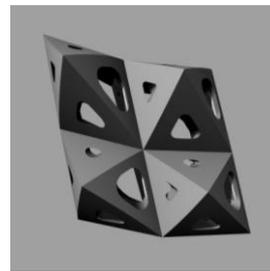
P7h



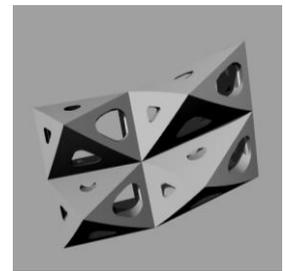
P7i



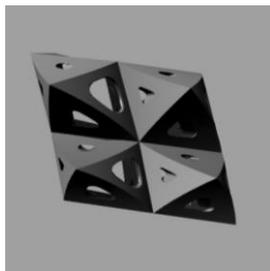
P7j



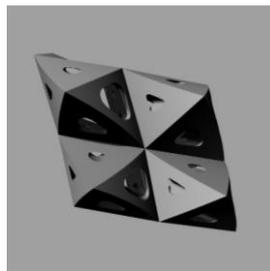
P7k



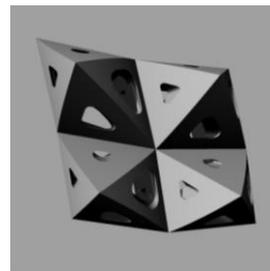
P7l



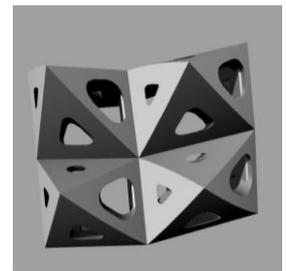
P7m



P7n



P7o

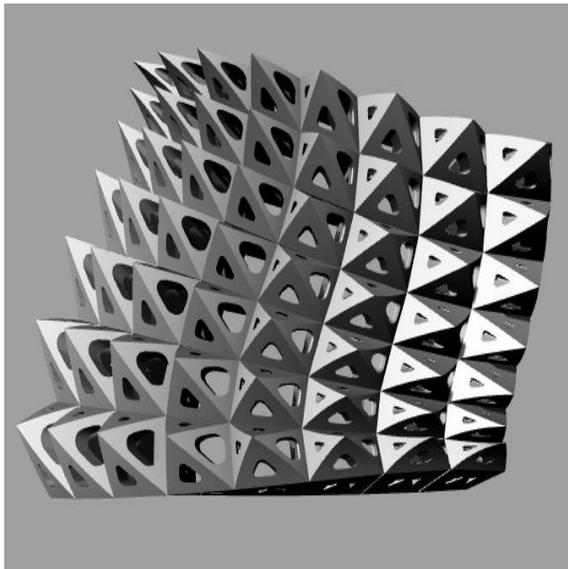


P7p

Figura 51: Divisão do pano 7 em blocos. Fonte: Própria.

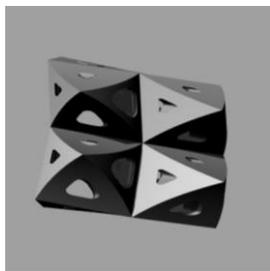
2.2.5.2.2.8 Pano 8 dividido em blocos

O pano 8 conformado por 56 módulos distribuídos em 7 filas e 8 colunas foi dividido em 16 blocos. Os blocos foram codificados e organizados em 4 filas e 4 colunas.

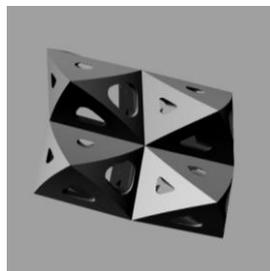


Pano 8

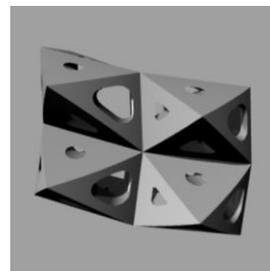
P8a 4 módulos	P8b 4 módulos	P8c 4 módulos	P8d 4 módulos
P8e 4 módulos	P8f 4 módulos	P8g 4 módulos	P8h 4 módulos
P8i 4 módulos	P8j 4 módulos	P8k 4 módulos	P8l 4 módulos
P8m 2 módulos	P8n 2 módulos	P8o 2 módulos	P8p 2 módulos



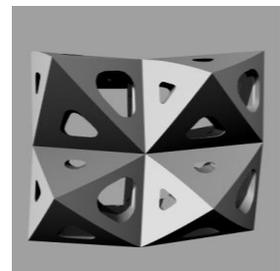
P8a



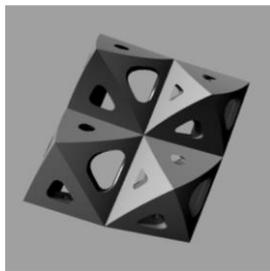
P8b



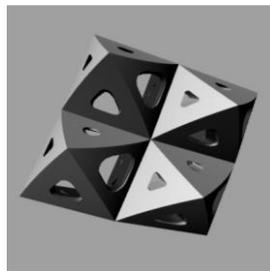
P8c



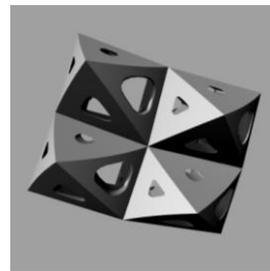
P8d



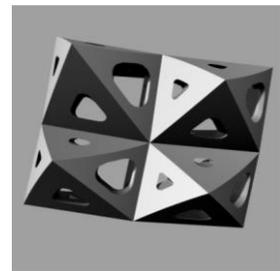
P8e



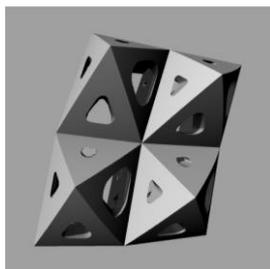
P8f



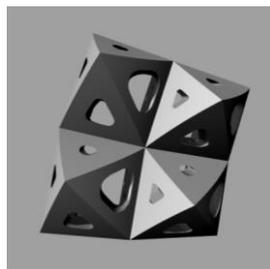
P8g



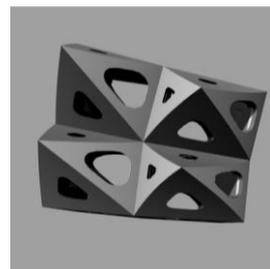
P8h



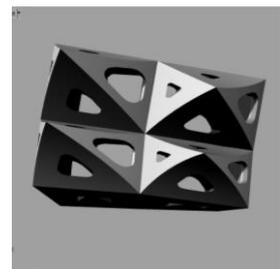
P8i



P8j



P8k



P8l

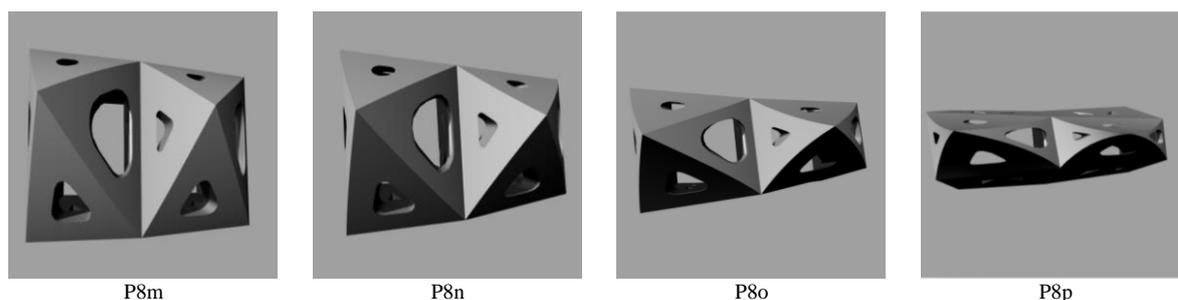


Figura 52: Divisão do pano 8 em blocos. Fonte: Própria.

#### 2.2.5.2.2.9 Observação na divisão dos panos em blocos para impressão

Assim, os 8 panos foram divididos em 112 blocos e foi necessária uma codificação para administrar o envio das peças para fabricação e para organização, além de determinar o bloco de maior tamanho para determinar a proporção para impressão das peças.

#### 2.2.5.2.3 Observação na operacionalização da fabricação digital do pavilhão biônico

Assim, sendo que a divisão em panos do pavilhão operacionaliza a fabricação e organização dos módulos de cada pano, que o tamanho da mesa de impressão da impressora 3D determina o maior tamanho de impressão do módulo; em tais observações, nesta tese será adotado que o tamanho máximo do pano e do módulo depende diretamente do tamanho da mesa de impressão da impressora 3D disponível para realizar a fabricação. Nesse sentido, a operacionalização da fabricação do pavilhão foi definida por 8 panos e 112 blocos.

Tabela 3: Operacionalização da Fabricação Digital do Pavilhão Biônico

Nº	Denominação	Filas/Colunas	Módulos	Blocos	Códigos/Organização
1	Pavilhão	15/30	450	112	Pano 1 - Pano 3 - Pano 5 - Pano 7 Pano 2 - Pano 4 - Pano 6 - Pano 8

2	Pano 1	8/5	40	8	P1a – P1b P1c – P1d P1e – P1f P1g – P1h
3	Pano 2	7/5	35	8	P2a – P2b P2c – P2d P2e – P2f P2g – P2h
4	Pano 3	8/9	72	16	P3a – P3b – P3c – P3d P3e – P3f – P3g – P3h P3i – P3j – P3k – P3l P3m – P3n – P3o – P3p
5	Pano 4	7/9	63	16	P4a – P4b – P4c – P4d P4e – P4f – P4g – P4h P4i – P4j – P4k – P4l P4m – P4n – P4o – P4p
6	Pano 5	8/8	64	16	P5a – P5b – P5c – P5d P5e – P5f – P5g – P5h P5i – P5j – P5k – P5l P5m – P5n – P5o – P5p
7	Pano 6	7/8	56	16	P6a – P6b – P6c – P6d P6e – P6f – P6g – P6h P6i – P6j – P6k – P6l P6m – P6n – P6o – P6p
8	Pano 7	8/8	64	16	P7a – P7b – P7c – P7d P7e – P7f – P7g – P7h P7i – P7j – P7k – P7l P7m – P7n – P7o – P7p
9	Pano 8	7/8	56	16	P8a – P8b – P8c – P8d P8e – P8f – P8g – P8h P8i – P8j – P8k – P8l P8m – P8n – P8o – P8p

### *2.2.5.3 Seleção de tecnologia de fabricação digital por adição*

A seleção da tecnologia de fabricação digital por adição tem passado pelo teste de duas tecnologias de impressão 3D. A tecnologia de fabricação por fundição de pó e a tecnologia por fabricação de filamento fundido. Onde, a tecnologia de fabricação por filamento fundido em impressora *RepRap* utilizando o filamento de ácido polilático se apresentou como um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com boa continuidade na adesão entre as camadas do objeto produzido.

#### *2.2.5.3.1 Tecnologia de fabricação por fundição de pó - 3DP*

A fabricação por fundição de pó é um processo de impressão 3D que consiste na adesão de camadas de pó pela aplicação de um aglutinante. O processo de impressão começa pela camada mais baixa e termina pela camada mais elevada. Este processo de impressão 3D fornece uma boa resolução de impressão dependendo da granulometria do material utilizado, mas é um processo demorado e demanda muito cuidado na manipulação das peças produzidas.

##### *2.2.5.3.1.1 Impressora ZPrinter 310*

A impressora 3D *ZPrinter 310* é uma tecnologia patenteada pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts – MIT. Essa tecnologia é apoiada no software *ZPrinter* que converte um objeto 3D em seções transversais 2D.

A impressão 3D pode ser realizada utilizando diferentes materiais, desde o material vendido pelo fabricante da impressora até materiais alternativos de baixo custo, como é o caso do pó *Zcast 500* e o pó de gesso-maltodextrina-açúcar, respectivamente.

### 2.2.5.3.1.1.1 Pó ZCast 500

A impressão 3D por fundição de pó ZCast 500 se apresentou como um processo de fabricação de boa resolução de impressão mas demorado. O processo de fabricação foi realizado em 3 fases: 1) Preparação da impressão, 2) Impressão e, 3) Pós-processamento.

A primeira fase, da preparação da impressão, foi uma sequência de 6 passos. 1) Alimentar a impressora com o pó ZCast 500 e o espalhamento na área de construção. O pó ZCast 500 é uma composição de gesso-cerâmica fornecido pelo fabricante da impressora ZPrinter 310. 2) Limpeza da estação de serviço. 3) Limpeza do rodo raspador. 4) Checagem do nível de aglutinante. 5) Checagem e remoção do desperdício da garrafa de desperdício. 6) Ligar a impressora.

A segunda fase, da impressão, foi uma sequência de 4 passos. 1) Abrir o software ZPrinter da impressora e importar o arquivo para ser fabricado. 2) Checagem das configurações da impressora e do pó a ser utilizado. 3) Checagem do fatiamento em vistas 2D da peça para fabricação. 4) Envio do arquivo para impressão.

A terceira fase, do pós-processamento, foi uma sequência de 3 passos. 1) Remoção do excesso de pó na câmara de construção da impressora. 2) Remoção do pó excedente na câmara de limpeza com aplicação de ar a pressão. 3) Endurecimento da peça fabricada com aplicação de infiltrante escolhido.

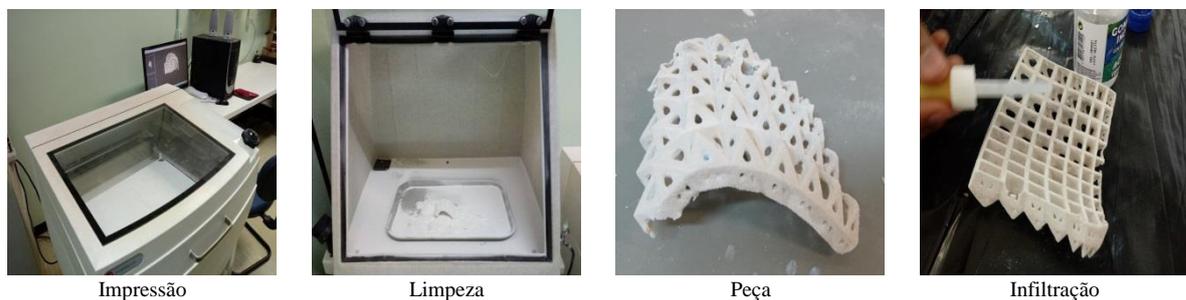


Figura 53: Teste de impressão 3D por fundição de pó ZCast.. Fonte: Própria.

Neste teste foi observado que a peça produzida teve uma boa resolução de impressão embora o fabricante não recomendasse a produção de peças de faces tão finas e, que a fabricação foi um processo demorado que demandou delicadeza no manuseio da peça até ela atingir uma determinada dureza.

### 2.2.5.3.1.1.2 Pó de gesso-maltodextrina-açúcar

A impressão 3D por fundição de pó de gesso-maltodextrina-açúcar se apresentou como um processo de fabricação de pouca resolução de impressão e demorado. O processo de fabricação foi realizado em 4 fases: 1) Preparação do pó de gesso-maltodextrina-açúcar, 2) Preparação da impressão, 3) Impressão e, 4) Pós-processamento.

A primeira fase, da preparação do pó de gesso-maltodextrina-açúcar, foi um único passo o qual consistiu na preparação da mistura uniforme de 4 quilos de gesso de secagem rápida, 1 quilo de maltodextrina e 1 quilo de açúcar de confeitiro.

A segunda fase, da preparação da impressão, foi uma sequência de 6 passos: 1) Alimentar a impressora com o pó de gesso-maltodextrina-açúcar e espalhamento na área de construção. 2) Limpeza da estação de serviço. 3) Limpeza do rodo raspador. 4) Checagem do nível de aglutinante. 5) Checagem e remoção do desperdício da garrafa de desperdício. 6) Ligar a impressora.

A terceira fase, da impressão, foi uma sequência de 4 passos: 1) Abrir o software *ZPrinter* da impressora e importar o arquivo para ser fabricado. 2) Checagem das configurações da impressora e do pó a ser utilizado. 3) Checagem do fatiamento em vistas 2D da peça para fabricação. 4) Envio do arquivo para impressão.

A quarta fase, do pós-processamento, foi uma sequência de 3 passos: 1) Remoção do excesso de pó na câmara de construção da impressora. 2) Remoção do pó excedente na câmara de limpeza com aplicação de ar a pressão. 3) Endurecimento da peça fabricada com aplicação de infiltrante escolhido.



Preparação



Impressão



Limpeza



Peça

Figura 54: Teste de impressão 3D por fundição de pó de gesso-maltodextrina-açúcar. Fonte: Própria.

Neste teste foi observado que a peça produzida teve pouca resolução de impressão embora o fabricante recomendasse a produção de peças com faces de 3 a 4 mm de espessura, que a fabricação foi um processo demorado que demandou delicadeza no manuseio da peça até ela atingir uma determinada dureza. A peça produzida atingiu um ótimo grau de dureza depois de ter eliminado toda a água contida. A eliminação d'água podia ter sido realizada utilizando um forno para secagem.

#### *2.2.5.3.1.2 Observação na tecnologia de fabricação por fundição de pó - 3DP*

Assim, sendo que a impressão 3D utilizando pó *ZCast* ofereceu uma boa resolução de impressão, um processo demorado de fabricação e que demandou muito cuidado com a manipulação da peça produzida; que a impressão 3D utilizando pó de gesso-maltodextrina-açúcar ofereceu pouca resolução de impressão e que demandou muito cuidado com a manipulação da peça produzida até atingir a dureza desejada; em tais observações, nesta tese, será adotado que o processo de impressão 3D por fundição de pó fornece uma boa resolução de impressão em função da granulometria do material utilizado, mas é um processo demorado que demanda muito cuidado na manipulação da peça até ela atingir a dureza desejada.

#### *2.2.5.3.2 Tecnologia de fabricação por filamento fundido - FFF*

A fabricação por filamento fundido é um processo de fabricação por adesão de camadas de um filamento plástico. O processo de fabricação começa pela camada mais baixa e termina pela camada mais elevada. Este é um processo que tem uma boa resolução de impressão dependendo da altura da camada de filamento plástico fundido além de ser um processo rápido que demanda menos trabalho de pós-processamento e que oferece maior dureza nas peças produzidas.

#### 2.2.5.3.2.1 Filamento de acrilonitrila butadieno estireno em impressora reppap uberblock

O primeiro teste de fabricação por filamento fundido foi utilizando o filamento de acrilonitrila butadieno estireno - *ABS* - em impressora *RepRap Uberblock*. A impressora *RepRap Uberblock* foi desenvolvida no laboratório de fabricação digital e customização em massa - LFDC – como parte do mestrado do arquiteto Renan Balzani na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.

A fabricação por filamento fundido se apresentou como um processo de boa resolução de impressão e rápido. O processo de fabricação consistiu de 5 passos: 1) Preparação do arquivo para impressão. 2) Alimentação da impressora com o filamento. 3) Ligar e configurar a impressora. 4) Seleção e impressão do objeto. 5) Limpeza dos suportes do objeto produzido.

No primeiro passo, da preparação do arquivo para impressão, o objeto para impressão foi importado para o *software Cura 15.04.6* e realizado o fatiamento em seções 2D e configuradas as características de impressão como são: altura da camada de impressão, velocidade de impressão, grau de retração, temperatura de extrusão, temperatura da mesa de impressão, suporte e plataforma de adesão. E por último a geração do arquivo *Gcode* para levar para a impressora.

No segundo passo, de alimentação da impressora com o filamento, o filamento *ABS* foi colocado no dispositivo de suporte do filamento da impressora e, a ponta do filamento foi conectada à extrusora.

No terceiro passo, de ligar e configurar a impressora, o cartão micro *SD* foi conectado à impressora e logo foi ligada a impressora. Posteriormente, foram feitas as configurações da impressora para aquecimento da extrusora e da mesa de impressão segundo o filamento *ABS*.

No quarto passo, da seleção e impressão do objeto, na impressora foi selecionado o arquivo *G-code* desejado e enviado para impressão do objeto.

No quinto passo, da limpeza dos suportes do objeto produzido, os suportes e a plataforma de adesão foram retirados com o auxílio de um alicate de bico.

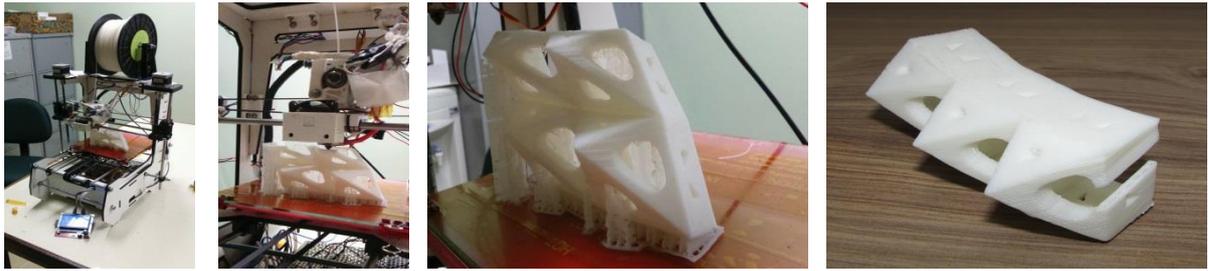


Figura 55: Teste de impressão 3D por fabricação de filamento fundido de ABS. Fonte: Própria.

Neste teste foi observado que o objeto produzido teve boa resolução de impressão, mas o objeto apresentou descontinuidade na adesão das camadas. O filamento *ABS* tem por característica apresentar retrações e descontinuidades nas camadas de impressão devido às mudanças na temperatura no ambiente.

#### 2.2.5.3.2.2 Filamento de ácido poliláctico em impressora reprop anet a8

O segundo teste de fabricação por filamento fundido foi utilizando o filamento de *ácido poliláctico - PLA* - em impressora *RepRap Anet A8*. A impressora *RepRap Anet A8* foi importada da China.

A fabricação por filamento fundido se apresentou como um processo de boa resolução de impressão e rápido. O processo de fabricação consistiu de 5 passos: 1) Preparação do arquivo para impressão. 2) Alimentação da impressora com o filamento. 3) Ligar e configurar a impressora. 4) Seleção e impressão do objeto. 5) Limpeza dos suportes do objeto produzido.

No primeiro passo, da preparação do arquivo para impressão, o objeto para impressão foi importado para o *software Cura 15.04.6* e realizado o fatiamento em seções 2D e configuradas as características de impressão como são: altura de camada de impressão, velocidade de impressão, grau de retração, temperatura de extrusão, temperatura da mesa de impressão, suporte e plataforma de adesão. E por último a geração do arquivo Gcode para levar para a impressora.

No segundo passo, da alimentação da impressora com o filamento, o filamento *PLA* foi colocado no dispositivo de suporte do filamento da impressora e, a ponta do filamento foi conectada à extrusora.

No terceiro passo, de ligar e configurar a impressora, o cartão micro *SD* foi conectado à impressora e logo foi ligada a impressora. Posteriormente, foram feitas as configurações da impressora para aquecimento da extrusora e da mesa de impressão segundo o filamento *PLA*.

No quarto passo, da seleção e impressão do objeto, na impressora foi selecionado o arquivo *Gcode* desejado e enviado para impressão do objeto.

No quinto passo, da limpeza dos suportes do objeto produzido, os suportes e a plataforma de adesão foram retirados com o auxílio de um alicate de bico.

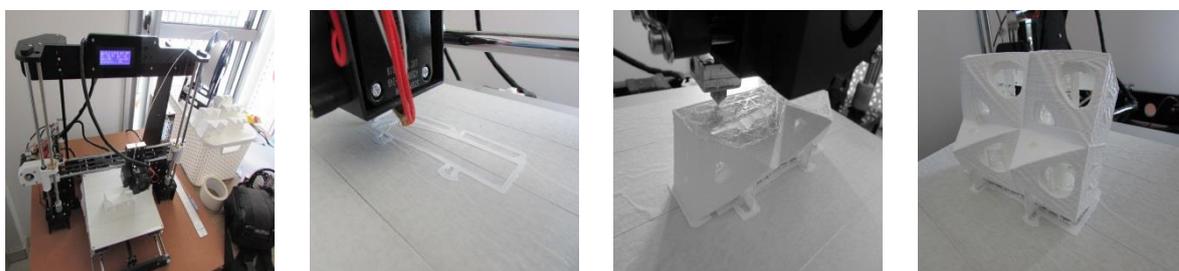


Figura 56: Teste de impressão 3D por fabricação de filamento fundido de *PLA*. Fonte: Própria.

Neste teste foi observado que o objeto produzido teve boa resolução de impressão e o objeto apresentou continuidade na adesão das camadas. O filamento *PLA* tem por característica melhor adesão entre as camadas de impressão.

#### *2.2.5.3.2.3 Observação na tecnologia de fabricação por filamento fundido - FFF*

Assim, sendo que foi observado que a fabricação por filamento fundido utilizando o filamento de acrilonitrila butadieno estireno - *ABS* - em uma impressora *RepRap Uberblock* se apresentou como um processo de fabricação rápida, de boa resolução de impressão e com descontinuidade na adesão entre as camadas do objeto produzido; que foi observado que a fabricação por filamento fundido utilizando o filamento de ácido poliláctico - *PLA* - em uma impressora *RepRap Anet A8* se apresentou como um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade na adesão entre as camadas do objeto produzido; em tais observações, nesta tese, será adotado que a fabricação por filamento fundido utilizando o filamento de ácido poliláctico - *PLA* - em uma impressora *RepRap* se apresenta

como um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade de adesão entre as camadas do objeto produzido.

#### *2.2.5.3.3 Observação na seleção da tecnologia de fabricação digital por adição*

Assim, sendo que o processo de impressão 3D por fundição de pó forneceu uma boa resolução de impressão em função da granulometria do material utilizado, mas é um processo demorado que demanda muito cuidado na manipulação da peça produzida até ela atingir a dureza desejada; que a fabricação por filamento fundido utilizando o filamento PLA em uma impressora *RepRap* se apresentou como um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade de adesão entre as camadas do objeto produzido; em tais observações, nesta tese, será adotado a fabricação por filamento fundido utilizando o filamento de ácido poliláctico - *PLA* - em uma impressora *RepRap* é um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade de adesão entre as camadas do objeto produzido.

#### *2.2.5.4 Fabricação digital por adição*

A fabricação digital por adição foi realizada em 3 fases: 1) Impressão dos panos 1-2-3-4, 2) Impressão 5-6-7-8 e, 3) Montagem do modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão biônico. Onde, foi observado que a fabricação do modelo 3D em tamanho reduzido do pavilhão foi necessária para estudar e analisar a operacionalização da montagem do pavilhão biônico.

#### 2.2.5.4.1 Impressão dos panos 1-2-3-4

A impressão dos panos 1-2-3-4 foi realizada na impressora *RepRap Uberblock* utilizando o filamento de ácido poliláctico ou *PLA*. Após a impressão, os blocos de cada pano foram limpos, organizados e unidos usando fita de dupla face.

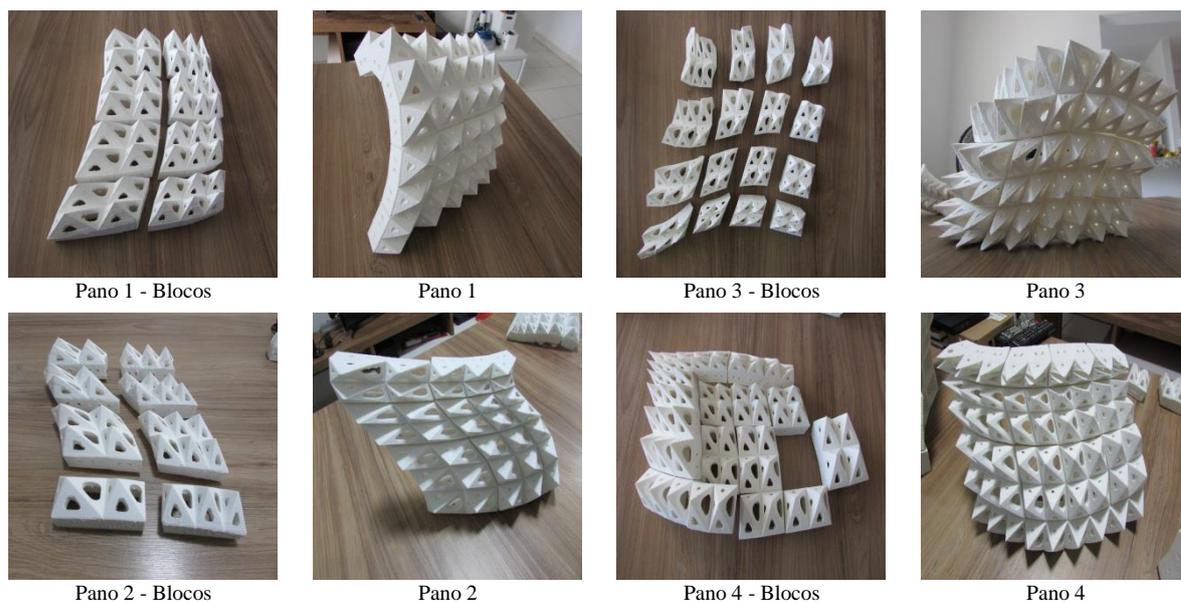


Figura 57: Impressão dos panos 1-2-3-4. Fonte: Própria.

Nesta fase foi observada a necessidade de colocar a codificação nos blocos identificando a impressora na qual foram produzidos e, também, foi observado que os blocos sofreram pequenas deformações na fabricação.

#### 2.2.5.4.2 Impressão dos panos 5-6-7-8

A impressão dos panos 3-5-7-9 foi realizada na impressora *RepRap Anet A8* utilizando o filamento de ácido poliláctico ou *PLA*. Após a impressão os blocos de cada pano foram limpos, organizados e unidos usando fita de dupla face.

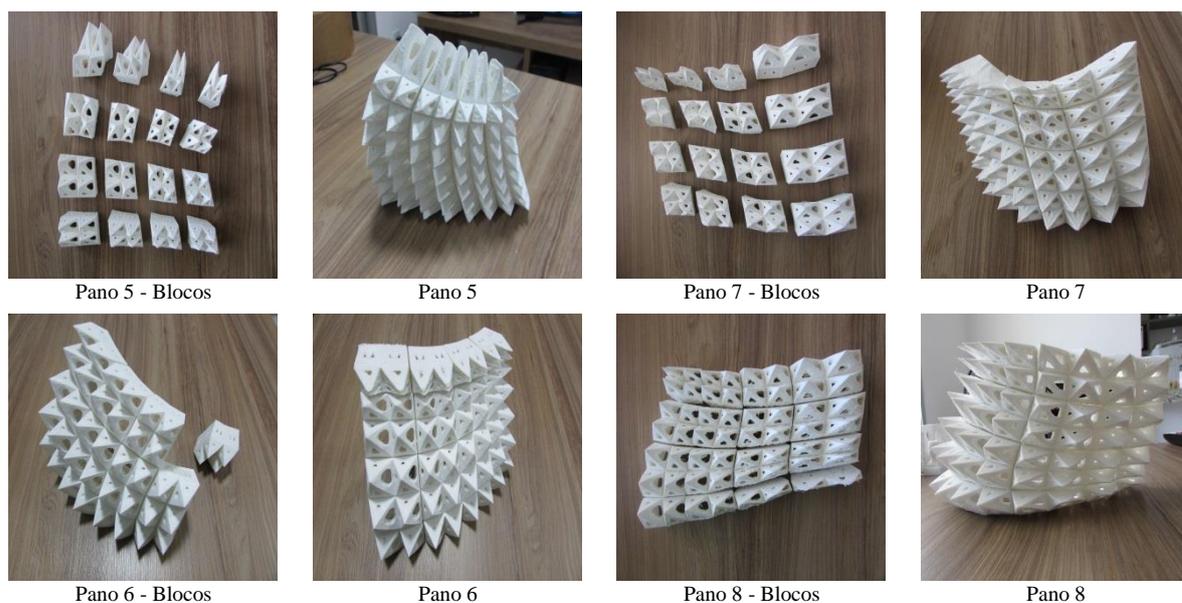


Figura 58: Impressão dos panos 5-6-7-8. Fonte: Própria.

Nesta fase foi observada a necessidade de colocar a codificação nos blocos identificando a impressora na qual foram produzidos Também, foi observado que os blocos sofrem pequenas deformações na fabricação.

#### *2.2.5.4.3 Montagem do modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão biônico*

A montagem do modelo 3D de tamanho reduzido foi realizada unindo os panos com fita dupla face. A união foi realizada de duas maneiras. Uma na qual os panos superiores e inferiores foram unidos separadamente e em sequência. E, outra na qual os panos superiores e inferiores foram unidos intercaladamente e em sequência.

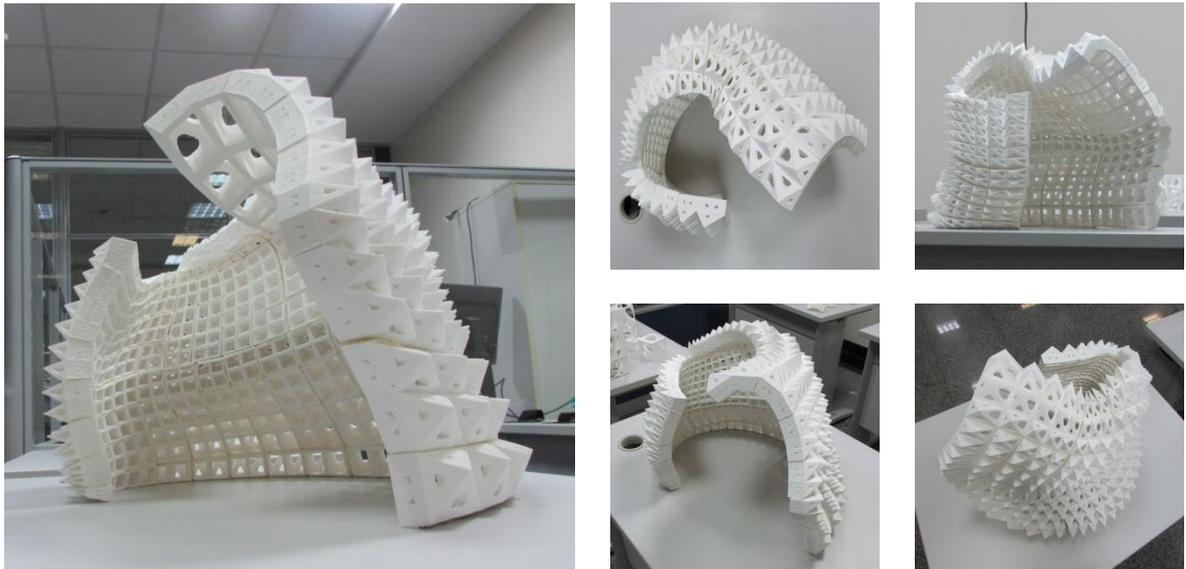


Figura 59: Modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão biônico. Fonte: Próprio.

Nesta fase foi observado que na montagem realizada unindo os painéis superiores e inferiores separadamente, o erro na união de todos os painéis foi maior que; quando a montagem foi realizada unindo os painéis intercalando um painel da parte inferior e logo um painel da parte superior até a finalização da montagem.

A montagem do modelo 3D de tamanho reduzido permitiu simular os possíveis problemas nesse processo.

#### *2.2.5.4.4 Observação na fabricação digital por adição*

Assim, sendo que foi observada a necessidade de colocar a codificação nos blocos, identificando a impressora na qual foram produzidos e, que os blocos sofreram pequenas deformações na fabricação; que a montagem do modelo 3D de tamanho reduzido permitiu simular o processo de montagem e analisar os possíveis problemas de operacionalização da montagem; em tais observações, nesta tese, será adotado que o modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão é necessário para estudar e analisar as fases da operacionalização da montagem.

## 2.2.6 Síntese

Nesta tese são adotadas as proposições a seguir:

Confirmou-se em parte da hipótese guia do experimento: As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem projetar um protótipo de pavilhão de forma complexa ou de geometrias não euclidianas de tamanho reduzido e inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital por adição – *software cura 15.04.6*, impressora *reprap uberblock*, impressora *reprap anet aA8* - permitem a produção do protótipo pelo fundição de filamento de ácido poliláctico – *PLA*. Nas cidades de Brasília (DF) e de Goiânia (GO).

A partir das observações listadas na tabela a seguir:

Tabela 4: Observações no Protocolo do Experimento 2

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Código Gráfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper.</i></li> </ul>	<p>O processo de projeção digital utilizando um código gráfico permite a customização de formas de geometrias não euclidianas e euclidianas em massa automaticamente e guardando as proporções estabelecidas na projeção dos componentes;</p>
2	Operacionalização da Fabricação	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> </ul>	<p>O tamanho máximo do pano e do módulo depende diretamente do tamanho da mesa de impressão da impressora 3D disponível para realizar a fabricação;</p>
3	Tecnologia de Fabricação Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Uberblock;</i></li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA.</i></li> </ul>	<p>A fabricação por filamento fundido utilizando o filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i> - em uma impressora <i>RepRap</i> é um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade de adesão entre as camadas do objeto produzido;</p>
4	Fabricação Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análise da operacionalização da montagem.</li> </ul>	<p>O modelo 3D de tamanho reduzido do pavilhão é necessário para estudar e analisar a operacionalização da montagem.</p>

## **2.3 Experimento 3: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Ateemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde**

### 2.3.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de célula estrutural inspirado nas estruturas naturais.

### 2.3.2 Hipótese

As tecnologias digitais - microscópio *MEV Jeol JSM-7000F*, *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem observar e projetar uma célula estrutural de forma complexa inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, *software sprintray rayware 1.4.6*, impressora *reprap anet a8*, impressora *moonray S* - permitem a produção de uma célula estrutural pela fundição de filamento de ácido polilático - *PLA* - e processamento de luz direta em resina *moonray gray*. Na cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).

### 2.3.3 Objetivo Geral

Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo da célula estrutural inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).

#### 2.3.3.1 *Objetivos específicos*

- Determinar as características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde;
- Determinar a forma da célula estrutural a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas;
- Determinar a tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural.

### 2.3.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo têm sido estruturado em 3 fases.

- Determinação das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e, pinha ou fruta do conde;
- Determinação da Forma da célula estrutural a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde;
- Escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural.

## 2.3.5 Desenvolvimento do Experimento

### 2.3.5.1 *Determinação das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e, pinha ou fruta do conde*

A determinação das características das cascas das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde foi realizada com um processo de 3 fases. 1) Seleção das cascas dos frutos das espécies frutíferas, 2) Secagem das amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas, 3) Análises das amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas.

Na determinação das características estruturais das cascas foi encontrada a predominância de superfícies externas contínuas, enrugadas e enceradas e, superfícies internas compostas por estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas. E, que as bolhas vão reduzindo seu tamanho quanto mais próximas ficam da superfície externa:

#### 2.3.5.1.1 *Seleção das cascas dos frutos das espécies frutíferas*

Cascas de algumas espécies frutíferas foram selecionadas para serem observadas as estruturas das fibras e os mecanismos de permeabilização dos fatores ambientais externos para preservar as boas condições da parte interior dos frutos. As cascas das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e pinha ou fruta do conde foram selecionadas devido a sua presença na região centro-oeste do Brasil, formas geométricas não euclidianas e modulação.



Figura 60: Cascas das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria

A escolha das espécies começou com o interesse de observar a casca do fruto do buriti devido a que a palmeira do buriti é a árvore símbolo da cidade de Brasília. Nesse sentido, foi entendido que a árvore e o fruto deviam ter desenvolvido mecanismos para sua adaptação à região. A partir do buriti foram escolhidas as outras espécies frutíferas.

#### 2.3.5.1.2 Secagem das amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas

As amostras das cascas das espécies frutíferas foram identificadas e logo expostas para secagem ao ambiente natural. O período de secagem foi de 15 dias em ambiente ventilado e sem umidade.



Figura 61: Secagem das amostras das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde.  
Fonte: Própria

As amostras que foram expostas a ambientes sem ventilação e úmidos apresentaram fungos. Essas amostras apresentaram dificuldade para observas a s fibras.

#### 2.3.5.1.3 Análise das amostras das cascas dos frutos no microscópio

A análise das amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde foi realizada em um processo de 3 fases: 1) Preparação das amostras para metalização, 2) Metalização das amostras, 3) Imagens microscópicas. Onde, a fase de imagens microscópicas foi estruturada em 5 fases, uma fase por cada uma das amostras.

Na análise foi determinado que principalmente as cascas dos frutos observados apresentaram diferença entre as superfícies externas e internas. As superfícies externas apresentaram continuidade, enrugamento e enceramento e, as superfícies internas apresentaram uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas, onde as bolhas reduzem de tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

#### 2.3.5.1.3.1 Preparação das amostras para metalização

As amostras para observação ao microscópio previamente foram preparadas para a metalização. A preparação das amostras consistiu na seleção de 2 pequenos pedaços das cascas das espécies frutíferas ou 3 pedaços no caso da amostra da casca do coco babaçu. As duas amostras das cascas foram devido à necessidade de observar a casca por ambos os lados, externo e interno. No caso da casca do coco babaçu foram selecionadas 3 pedaços devido a que são 3 camadas de fibras que constituem essa casca.

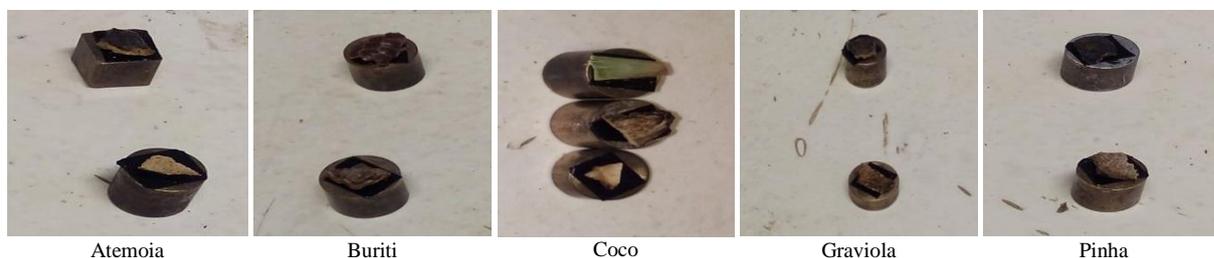


Figura 62: Preparação das amostras para metalização. Fonte: Própria

As amostras foram colocadas encima de pequenos cilindros de aço de 1 cm de altura e 1 cm de diâmetro. Logo de posicionadas as amostras foram identificadas.

#### 2.3.5.1.3.2 Metalização

A metalização das amostras foi realizada em um metalizador de marca Balzers SCD 050 no Laboratório de Microscopia e Microanálise (LMM) do Instituto de Ciências Biológicas (IB)

da Universidade de Brasília (UnB) com o apoio do técnico do laboratório. As amostras foram metalizadas com ouro.



Figura 63: Metalização das amostras. Fonte: Própria

Após a metalização das amostras foi realizada a verificação da identificação de cada uma das amostras. Foi necessário realizar a verificação devido a que uma vez metalizadas as amostras, as identificações podem ser apagadas.

#### 2.3.5.1.3.3 *Imagens microscópicas*

As imagens microscópicas foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico a varredura de marca *MEV Jeol JSM-7000F* do Laboratório de Microscopia e Microanálise (LMM) do Instituto de Ciências Biológicas (IB) da Universidade de Brasília (UnB) com o apoio da técnica do laboratório.



Figura 64: Obtenção das imagens microscópicas. Fonte: Própria

A disposição das amostras na câmara de observação do microscópio foi registrada no caderno de anotações para orientar a análise das amostras. A disposição das amostras foi registrada utilizando a identificação previamente utilizada na fase da preparação para a metalização. E, a análise das amostras foi realizando o registro das vistas em sequência no caderno de anotações. As imagens foram registradas considerando a espécie frutífera e vistas externas e internas das amostras.

#### 2.3.5.1.3.3.1 *Imagens microscópicas da casca da atemoia*

Da casca da atemoia foram selecionadas uma vista externa e uma vista interna. A vista externa correspondeu a uma ampliação de 20 vezes o tamanho real e; a vista interna correspondeu a uma ampliação de 700 vezes.

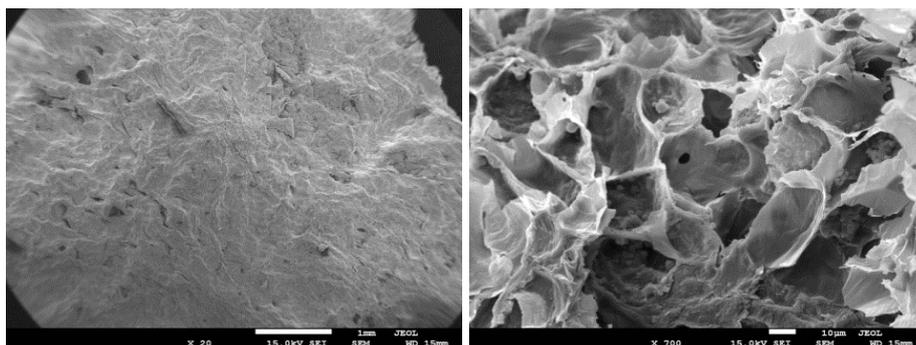


Figura 65: Imagens microscópicas da casca da atemoia. Parte externa ampliada 20x (esquerda) e parte interna ampliada 700x (direita). Fonte: Própria

As vistas das amostras apresentaram características diferentes entre as partes externa e interna. A parte externa apresentou uma superfície contínua com poucos enrugamentos e presença de cera do próprio fruto. A parte interna apresentou uma estrutura de bolhas de diferentes tamanhos e composta por várias camadas e, com algumas comunicações entre as bolhas. Onde, as bolhas reduzem de tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

#### 2.3.5.1.3.3.2 *Imagens microscópicas da casca do buriti*

Da casca do buriti foram selecionadas uma vista externa e uma vista interna. A vista externa correspondeu a uma ampliação de 20 vezes do tamanho real e; a vista interna correspondeu a uma ampliação de 12000 vezes.

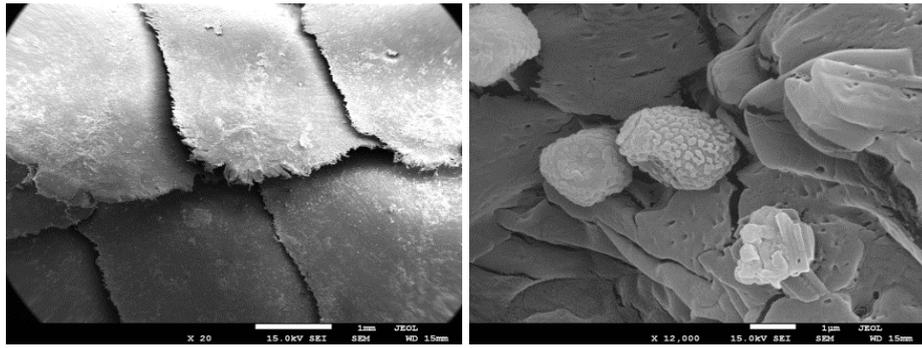
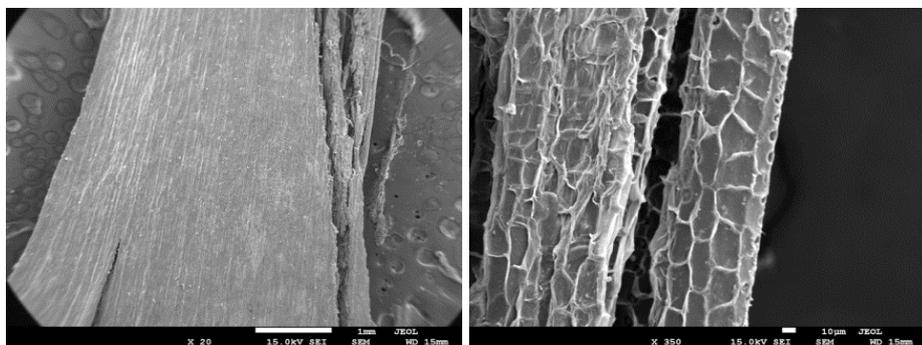


Figura 66: Imagens microscópicas da casca do buriti. Parte externa ampliada 20x (esquerda) e parte interna ampliada 12000x (direita). Fonte: Própria

As vistas das amostras apresentam características diferentes entre as partes externa e interna. A parte externa apresentou uma superfície composta por escamas com fibras no perímetro e a presença de cera própria do fruto. A parte interna apresentou uma superfície enrugada e encerada além de alguns fungos (corpos esféricos de tonalidade mais clara).

#### 2.3.5.1.3.3.3 Imagens microscópicas da casca do coco babaçu

Da casca do buriti foram selecionadas vistas externa e interna da camada externa, vistas internas das camadas intermediária e interna. As vistas externa e interna da camada externa corresponderam a uma ampliação de 20 e 350 vezes do tamanho real. As vistas internas das camadas intermediária e interna corresponderam a uma ampliação de 700 e 1500 vezes, respectivamente.



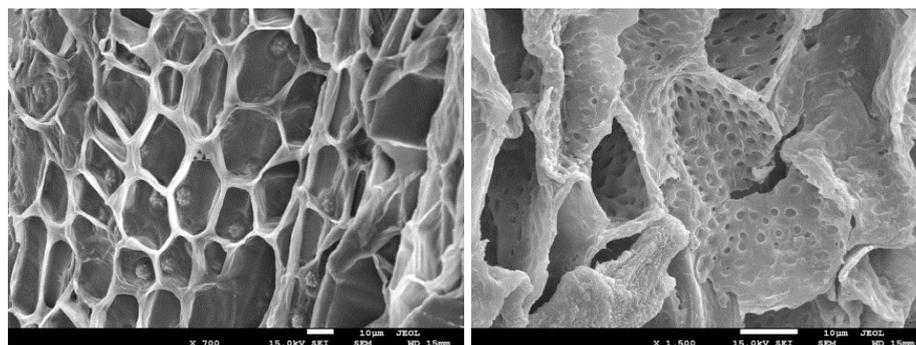


Figura 67: Imagens microscópicas da casca do coco. Camada externa: parte externa ampliada 20x (superior esquerda) e parte interna ampliada 350x (superior direita). Camada intermediária ampliada 700x (inferior esquerda). Camada interna ampliada 12000x (inferior direita). Fonte: Própria

As vistas das amostras apresentam características diferentes entre as camadas. A camada externa, camada de espessura intermediária, na parte externa apresentou uma superfície composta por fibras dispostas em sentido longitudinal e, na parte interna apresentou uma estrutura de bolhas de diferentes formas e tamanhos, mas interconectadas e também dispostas em sentido longitudinal. A camada intermediária, camada de maior espessura, apresentou uma estrutura de bolhas de diferentes formas e tamanhos e interconectadas. A camada interna, camada mais fina e resistente, apresentou uma estrutura de bolhas perfuradas de diferentes formas e tamanhos.

#### 2.3.5.1.3.3.4 Imagens microscópicas da casca da graviola

Da casca da graviola foram selecionadas uma vista externa e uma vista interna. A vista externa correspondeu a uma ampliação de 43 vezes do tamanho real e; a vista interna correspondeu a uma ampliação de 1000 vezes.

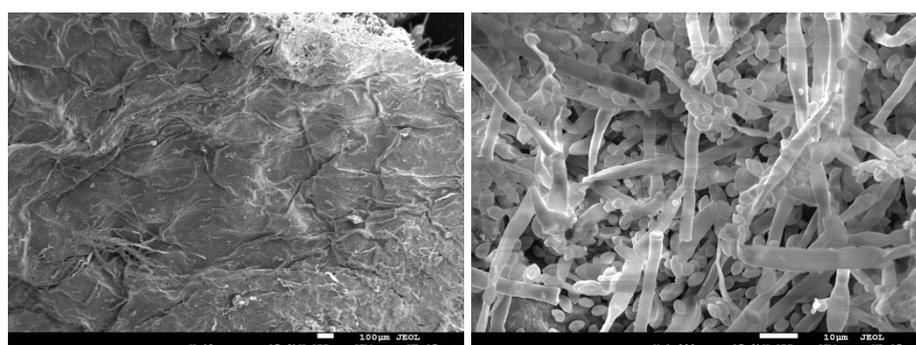


Figura 68: Imagens microscópicas da casca da graviola. Parte externa ampliada 43x (esquerda) e parte interna ampliada 1000x (direita). Fonte: Própria

As vistas das amostras não apresentaram claramente as características da parte externa e da parte interna. A parte externa apresentou uma superfície enrugada e com cera própria do fruto. A parte interna também apresentou uma superfície enrugada e encerada. Nas vistas não foi possível observar as estruturas das fibras devido à presença de fungos. Mas na vista da parte externa, esquina superior direita, pode se observar a presença de formas que insinuam uma estrutura de bolhas.

#### 2.3.5.1.3.3.5 *Imagens microscópicas da casca da pinha ou fruta do conde*

Da casca da pinha ou fruta do conde foram selecionadas uma vista externa e uma vista interna. A vista externa correspondeu a uma ampliação de 200x vezes do tamanho real e; a vista interna correspondeu a uma ampliação de 700 vezes.

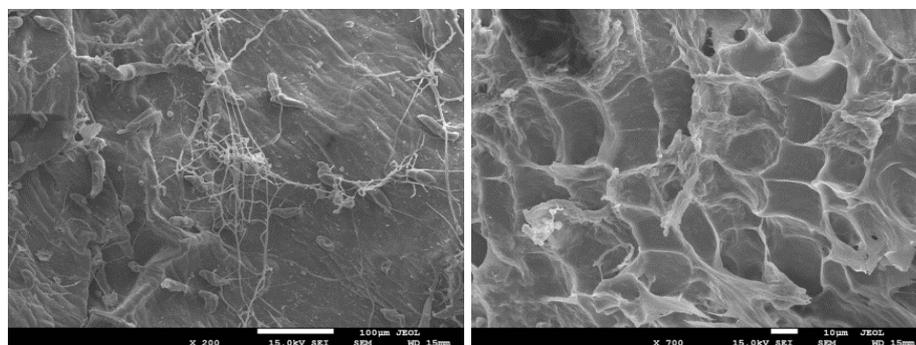


Figura 69: Imagens microscópicas da pinha ou fruta do conde. Parte externa ampliada 200x (esquerda) e parte interna ampliada 700x (direita). Fonte: Própria

As vistas das amostras apresentaram características diferentes entre as partes externa e interna. A parte externa apresentou uma superfície contínua com poucos enrugamentos, presença de cera do próprio fruto e um pouco de fungos. A parte interna apresentou uma estrutura de bolhas de diferentes formas e tamanhos e composta por várias camadas e, com algumas comunicações entre as bolhas. Onde, as bolhas são de menor tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

#### 2.3.5.1.3.3.6 *Observação nas Imagens microscópicas*

Assim, sendo que:

A casca da atemoia apresentou uma superfície externa contínua, enrugada e encerada e, uma superfície interna composta por várias camadas de bolhas de diferentes formas e tamanhos. Onde, as bolhas reduzem de tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

A casca do buriti apresentou uma superfície externa descontínua, conformada por escamas de diferentes tamanhos e enceradas e, uma superfície interna enrugada e encerada; que a casca do coco babaçu apresentou 3 camadas de diferentes espessuras e fibras longitudinais com estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos e, estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos.

A casca da graviola apresentou uma superfície externa contínua, enrugada e encerada e, uma superfície interna que não pode ser observada pela presença de fungos mas que pelas formas apresentadas pareceria ser conformada por uma estrutura de bolhas.

A casca da pinha ou fruta do conde apresentou uma superfície externa contínua, enrugada e encerada e, uma superfície interna composta por várias camadas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos. Onde, as bolhas são de menor tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

Predominantemente as cascas das espécies frutíferas observadas são compostas por uma superfície externa, contínua, enrugada e encerada e, uma superfície interna composta por estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas. Onde, as bolhas vão reduzindo de tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

#### *2.3.5.1.4 Observação na determinação das características estruturais das cascas das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde*

Assim, sendo que:

A escolha das espécies frutíferas para análise começou com o interesse de observar a casca do fruto do buriti devido a que a árvore do buriti é a árvore símbolo da cidade de Brasília. E que por tal motivo, foi entendido que a árvore e o fruto passaram por uma adaptação à região centro-oeste do Brasil.

As amostras das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde foram secas em ambiente ventilado e sem umidade.

Predominantemente as cascas das espécies frutíferas são compostas por uma superfície externa, continua e encerada e; uma superfície interna composta por estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

Predominantemente as cascas dos frutos das espécies frutíferas analisadas – atemoia, buriti, coco babaçu, graviola, pinha ou fruta do conde – são compostas por uma superfície externa continua, enrugada e encerada e, uma superfície interna composta por uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas. Onde, as bolhas vão reduzindo de tamanho quanto mais próximas da superfície externa.

### *2.3.5.2 Determinação da Forma da célula estrutural a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde*

A determinação da forma da célula estrutural a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde foi realizada seguindo um processo constituído de 3 fases. 1) Traços da célula estrutural, 2) Modelagem manual da célula estrutural, 3) Modelagem 3Digital de célula estrutural.

Onde, foi observado que as tecnologias de modelagem 3D digital misturando a modelagem direta com a modelagem programável são ferramentas importantes na criação e manipulação de formas complexas inspiradas nas estruturas das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde.

#### *2.3.5.2.1 Traços da célula estrutural*

A partir da determinação das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas foram realizados os primeiros traços da proposta de uma célula estrutural. Os traços foram realizados pensando na proposta de uma superfície externa, contínua, enrugada e encerada e, uma superfície interna composta por uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em diferentes camadas.

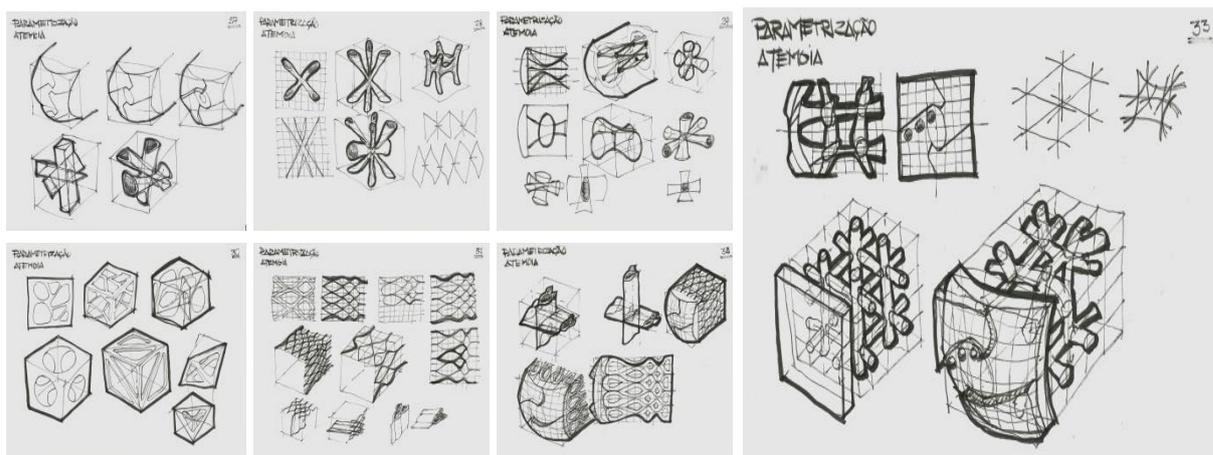


Figura 70: Traços da célula estrutural. Fonte: Própria

Nos traços realizados foi observado que a representação bidimensional não permitiu um maior aprofundamento no estudo das formas mais complexas e nem na variação das formas e tamanhos.

A limitação da representação bidimensional para o aprofundamento do estudo das formas complexas levou a procurar uma alternativa para construir um modelo tridimensional rápido e que permitisse fazer as modificações necessárias até chegar ao produto desejado. A alternativa foi utilizar massa plástica.

#### 2.3.5.2.2 Modelagem manual da célula estrutural

A modelagem manual da célula estrutural foi realizada utilizando massa plástica para artesanato. A massa se apresentou como um material fácil de manipular e rápida para modelagem. A massa plástica permitiu modelar rapidamente um modelo tridimensional simples.

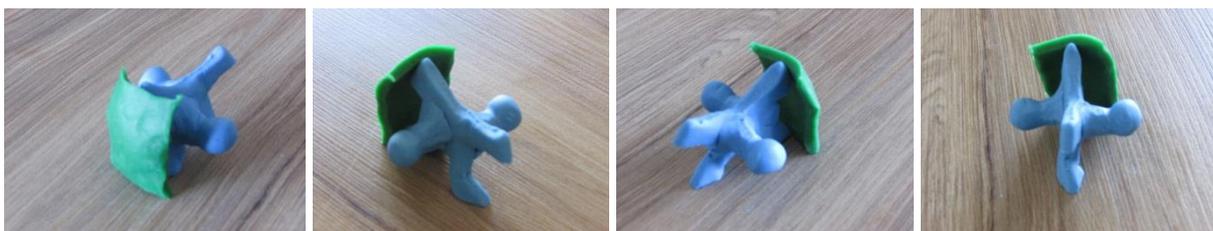


Figura 71: Modelagem manual da célula estrutural. Fonte: Própria

A massa plástica apresentou como limitação a possibilidade de modelar partes menores e mais finas, além do tempo de secagem da peça para manipular o modelo.

A limitação da modelagem de partes menores e mais finas levou a procurar uma alternativa para construir rapidamente um modelo tridimensional que permitisse a modificação rápida de partes menores e mais finas. A alternativa foi utilizar uma tecnologia de modelagem 3D digital

#### *2.3.5.2.3 Modelagem 3D digital da célula estrutural*

A modelagem 3D digital da célula estrutural foi realizada em um processo constituído de 5 fases. 1) Modelagem utilizando o *software rhinoceros 5.0*, 2) Modelagem utilizando o *software rhinoceros 5.0*, *plugin grasshopper* e *plugin t-spline*, 3) Modelagem digital dos protótipos não torcidos das células dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde, 4) Modelagem digital dos protótipos torcidos das células estruturais das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde, 5) Modelagem digital de protótipo de painel torcido desmontável da célula estrutural 5.

Onde, foi observado que as tecnologias de modelagem 3D digital se apresentam como ferramentas importantes na modelagem de estruturas naturais.

##### *2.3.5.2.3.1 Modelagem utilizando o software rhinoceros 5.0*

As 3 primeiras propostas da célula estrutural foram modeladas em 3D utilizando o *software rhinoceros 5.0*. A célula estrutural 1 foi modelada inteiramente no *software rhinoceros* considerando uma superfície externa contínua e enrugada e, uma estrutura interna com fibras cilíndricas de diâmetro variável e percurso regular. A célula estrutural 2 foi modelada inteiramente no *software rhinoceros* considerando uma estrutura composta por fibras regulares externas e fibras cilíndricas contínuas de diâmetro variável e percurso irregular. A

célula estrutura 3 foi modelada inteiramente no *software rhinoceros* considerando uma estrutura regular composta por superfícies maiores para adoção com outras células.



Modelagem da Célula Estrutural 1

Modelagem da Célula Estrutural 2

Modelagem da Célula Estrutural 3

Figura 72: Modelagem digital dos protótipos das células estruturais 1-2-3 no *software rhinoceros 5.0*. Fonte: Própria

Na modelagem foi observada a limitação da modelagem 3D inteiramente no ambiente do *software rhinoceros 5.0* para conseguir formas e estruturas mais próximas das estruturas naturais das bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos, além da possibilidade de fazer as modificações necessárias rapidamente.

A limitação da modelagem 3D inteiramente no ambiente do *software rhinoceros 5.0* levou a procurar alternativas de modelagem 3D digital que permitissem emular estruturas naturais das bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em menor tempo e realizar as modificações necessárias em menor tempo. A alternativa foi utilizar *plugins* para o *software rhinoceros 5.0* que permitam emular as formas naturais e controlar o processo de projeção.

#### 2.3.5.2.3.2 Modelagem utilizando o *software rhinoceros 5.0*, *plugin grasshopper* e *plugin t-spline*

As células estruturais 4, 5 e 6 foram modeladas em 3D utilizando o *software 5.0* e os *plugins grasshopper* e *t-spline*.

A célula estrutural 4 foi modelada seguindo um processo composto por 3 fases. Na primeira fase foi programado, no *plugin grasshopper*, o código gráfico utilizando as ferramentas *point*, *voronoi 3D*, *deconstruct brep*, *curve*, *removeduplicatelines* e *bake*. Na segunda fase foi aplicada a ferramenta *tspipe* do *plugin t-spline*. Na terceira fase foram aplicadas as ferramentas *mesh split*, *planar curves* e *join* do *software rhinoceros*.

Assim, a partir do uso das tecnologias de modelagem 3D digital como são o *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *t-spline* foi possível modelar uma estrutura emulando a estrutura natural de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas.

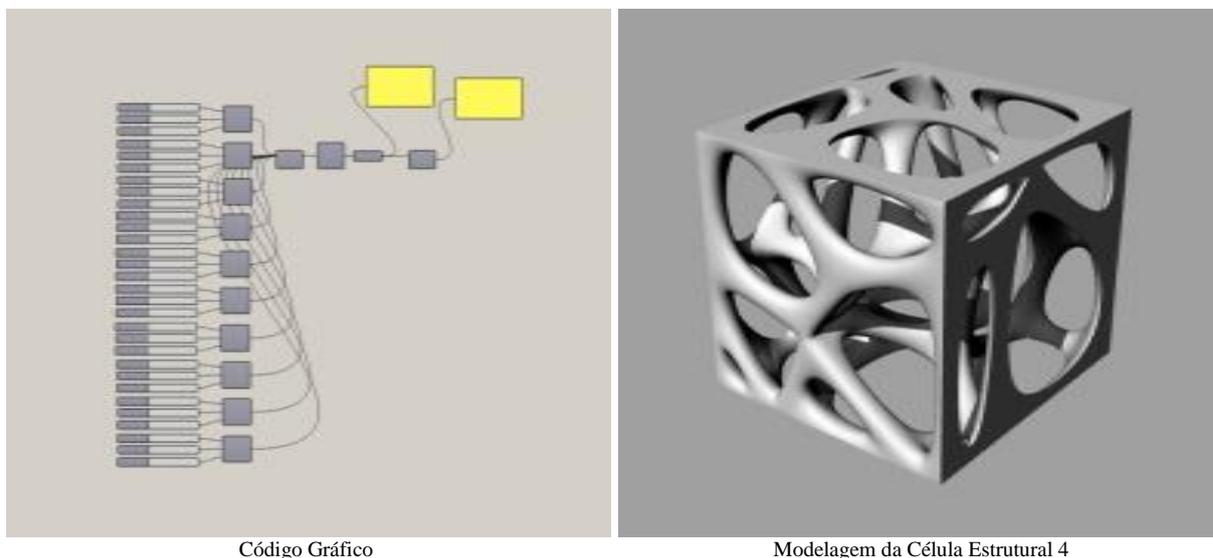


Figura 73: Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 4 no *software rhinoceros 5.0*, e *plugin grasshopper* e *plugin t-spline*. Fonte: Própria

Após a modelagem 3D de uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas foi realizada uma modelagem 3D de uma célula estrutural com uma forma mais próxima dos gomos da atemoia ou pinha. Nesse objetivo foi modelada a estrutura estrutural 5.

A célula estrutural 5 foi modelada seguindo um processo composto por 3 fases. Na primeira fase foi programado, no *plugin grasshopper*, o código gráfico em 2 partes. A primeira parte utilizando as ferramentas *point*, *voronoi 3D*, *solid intersection*, *deconstruct brep*, *curve*, *removeduplicatelines* e *bake*. E a segunda parte utilizando as ferramentas *point*, *4point surfasse*, *brep join*, *brep* e *geometry*. Onde, a segunda parte é ligada à primeira parte pela ferramenta *solid intersection*. Na segunda fase foi aplicada a ferramenta *tspipe* do *plugin t-spline*. Na terceira fase foram aplicadas as ferramentas *mesh split*, *planar curves* e *join* do *software rhinoceros*.

Assim, a partir do uso das tecnologias de modelagem 3D digital como são o *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *t-spline* foi possível modelar uma estrutura emulando a estrutura natural de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas.

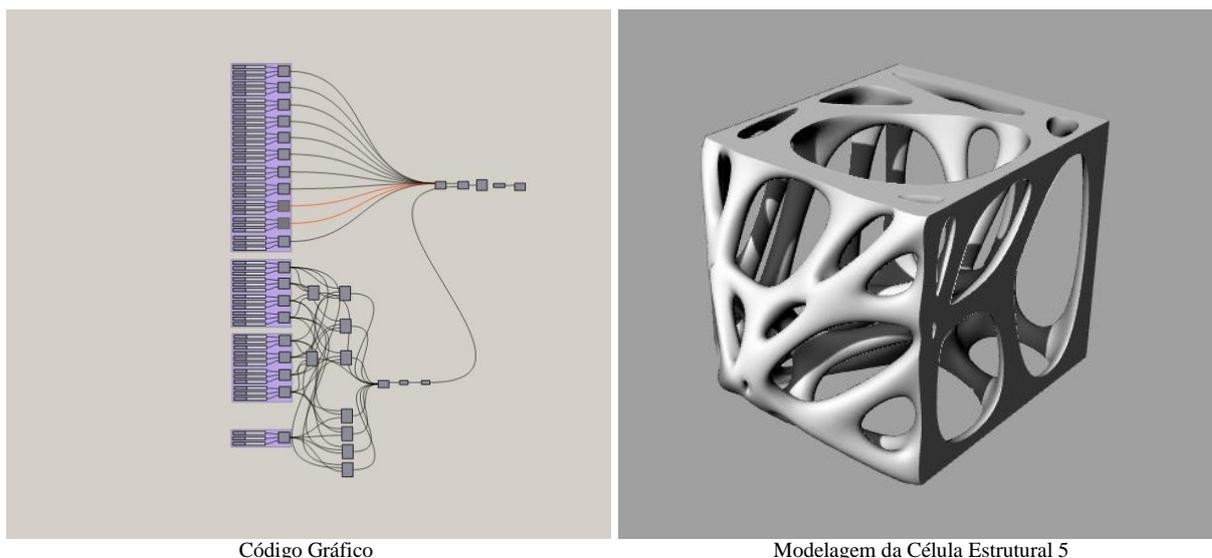


Figura 74: Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 5 no *software rhinoceros 5.0*, e *plugin grasshopper* e *plugin t-spline*. Fonte: Própria

Após a modelagem 3D de uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas mais próxima da forma dos gomos da atemoia ou pinha, foi realizada uma modelagem 3D de uma célula estrutural com uma forma mais natural dos gomos da atemoia ou pinha. Nesse objetivo foi modelada a estrutura estrutural 6.

A célula estrutural 6 foi modelada seguindo um processo composto por 3 fases. Na primeira fase foi programado, no *plugin grasshopper*, o código gráfico em 3 partes. A primeira parte utilizando as ferramentas *point*, *voronoi 3D*, *solid intersection*, *deconstruct brep*, *curve*, *removeduplicatelines* e *bake*. A segunda parte utilizando as ferramentas *point*, *4point surfasse*, *brep join*, *brep* e *geometry*. Onde, a segunda parte é ligada à primeira parte pela ferramenta *solid intersection*. E, a terceira parte utilizando as ferramentas *4point surfasse*, *surfasse* e *surfasse*. Onde, a terceira parte foi conectada à segunda parte pelas ferramentas *4point surface* da terceira parte e as ferramentas *point* da segunda parte. E, onde, a terceira parte foi conectada à segunda parte pela ferramenta *brep*. Na segunda fase foi aplicada a ferramenta *tspipe* do *plugin t-spline*. Na terceira fase foram aplicadas as ferramentas *mesh split*, *planar curves* e *join* do *software rhinoceros*.

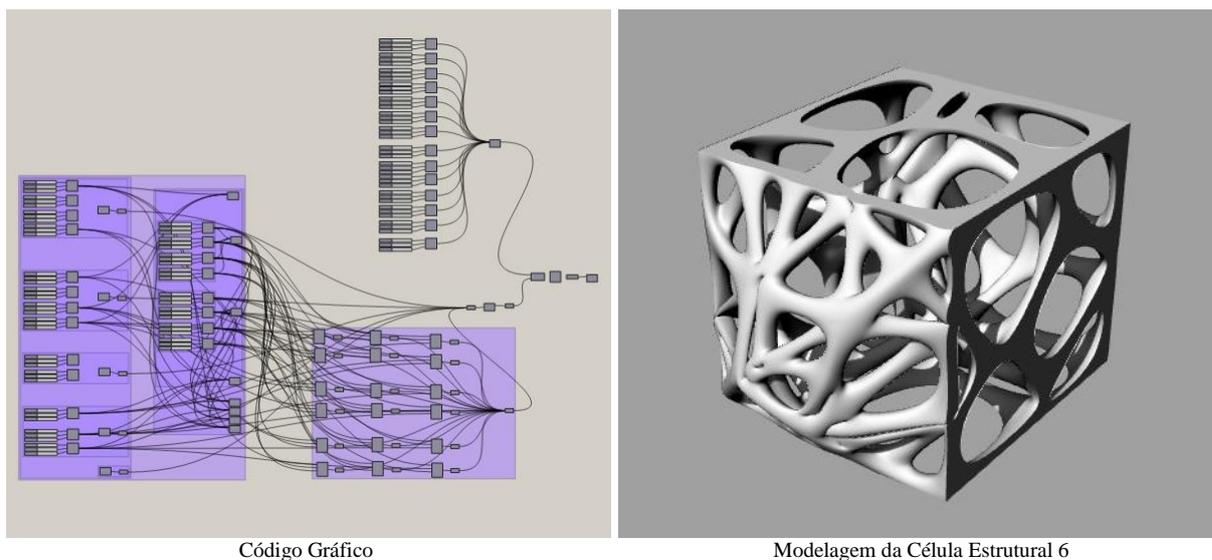


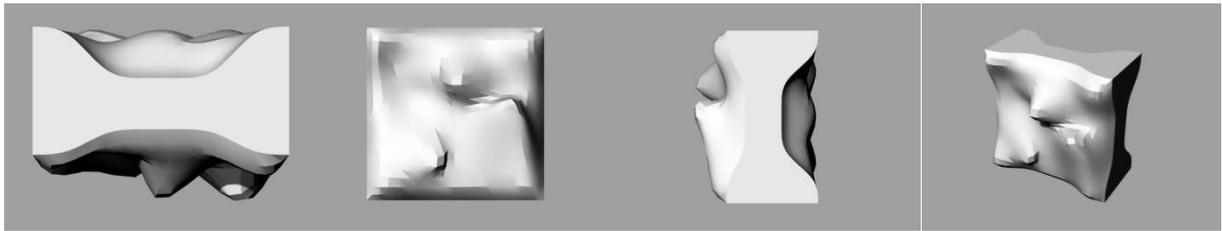
Figura 75: Modelagem digital do protótipo da célula estrutural 6 no *software rhinoceros 5.0*, e *plugin grasshopper* e *plugin t-spline*. Fonte: Própria

Assim, a partir do uso das tecnologias de modelagem 3D digital como são o *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *t-spline* foi possível modelar uma estrutura emulando a estrutura natural de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas e com uma forma mais natural dos gomos da atemoia ou pinha.

#### 2.3.5.2.3.3 Modelagem digital dos protótipos não torcidos das células dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde

A partir das experiências das modelagens 3D digitais das propostas das células estruturas 1-2-3-4-5-6, foram construídos modelos 3D digitais emulando as estruturas encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde.

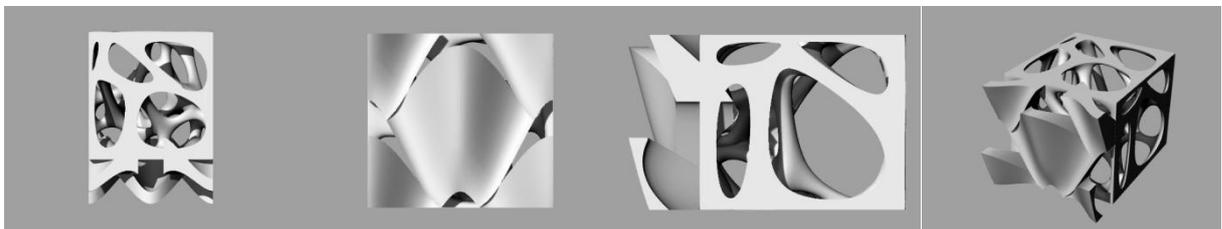
Os modelos 3D digitais, na maioria, foram construídos misturando a modelagem direta e a modelagem programada. No primeiro momento, as células foram construídas em formatos de projeção ortogonal.



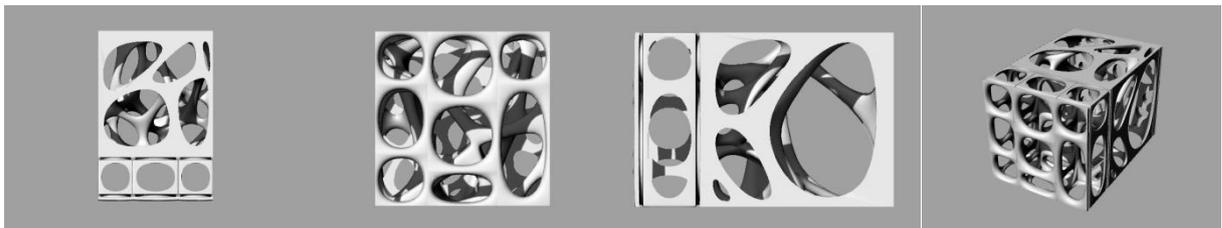
Modelagem da Célula não torcionada da Atemoia



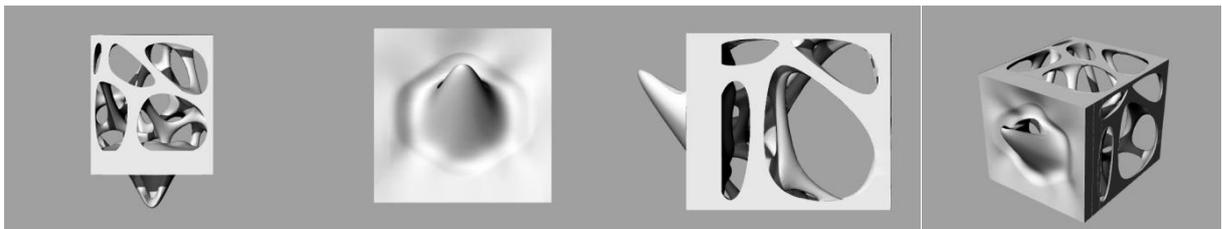
Modelagem da Célula não torcionada do Buriti



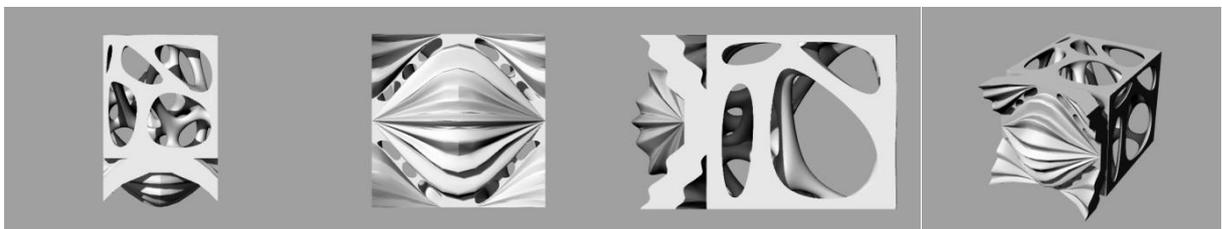
Modelagem da Célula não torcionada do Buriti



Modelagem da Célula 1 não torcionada do Coco



Modelagem da Célula não torcionada da Graviola

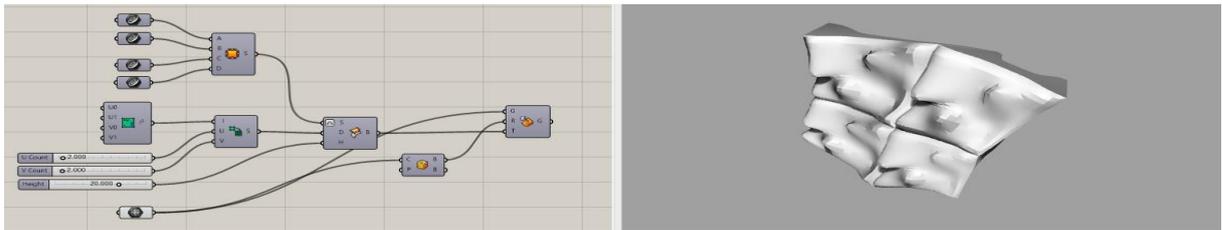


Modelagem da Célula não torcionada da Pinha ou Fruta do Conde

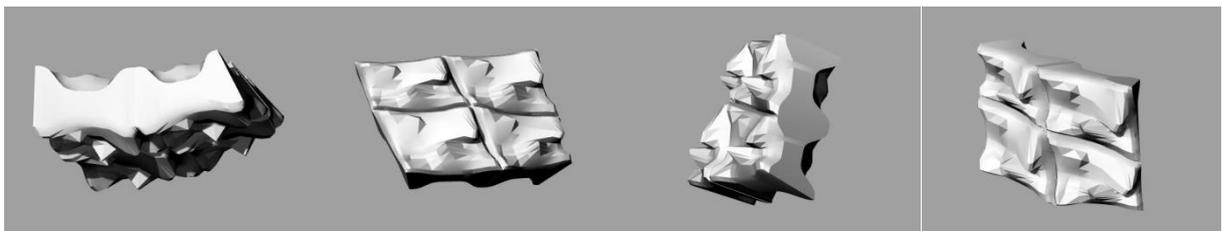
Figura 76: Modelagem digital dos protótipos não torcionados das células dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria

2.3.5.2.3.4 Modelagem digital dos protótipos torcidos das células estruturais das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde

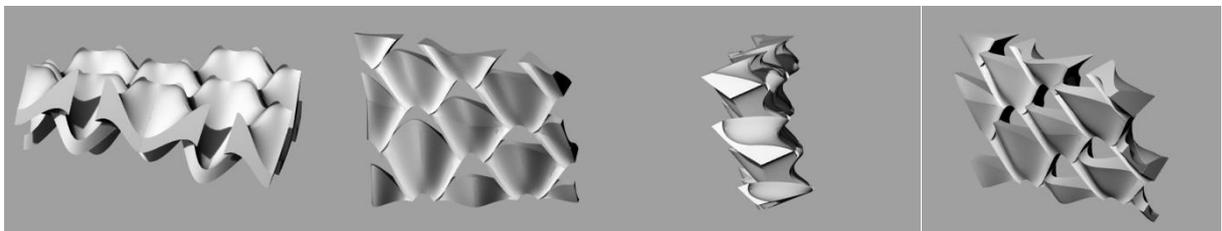
No segundo momento, as células foram construídas em formatos torcidos utilizando um código gráfico desenvolvido no *plugin grasshopper*. O código consistiu na geração de uma superfície com dupla curvatura e na qual foi distribuído um módulo da célula.



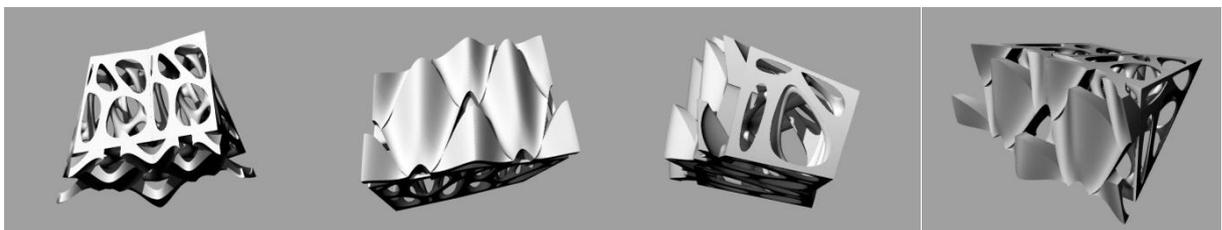
Código gráfico para torcionar as células



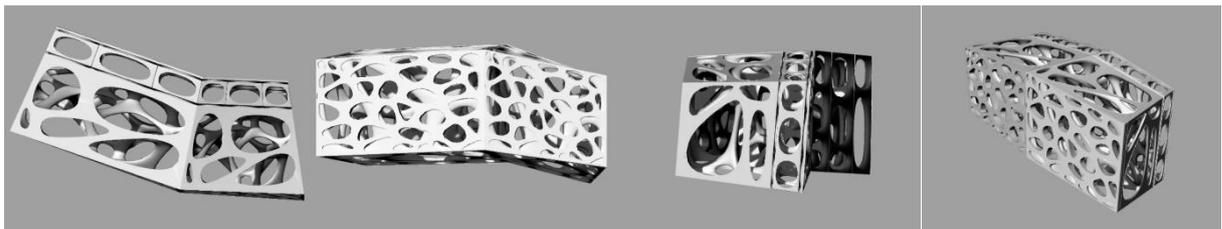
Modelagem da Célula torcionada da Ateimoia



Modelagem da Célula torcionada do Buriti

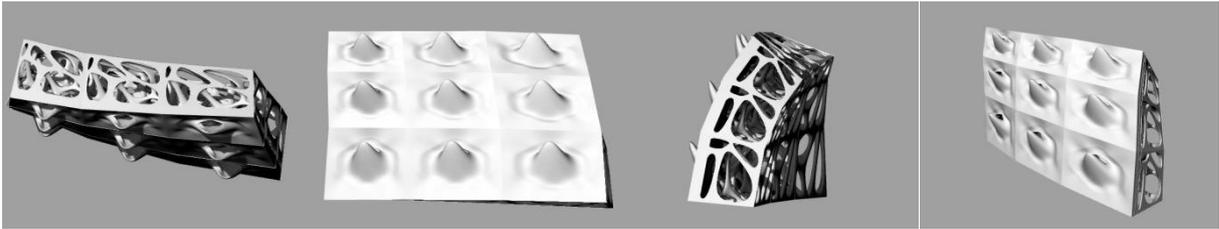


Modelagem da Célula torcionada do Buriti

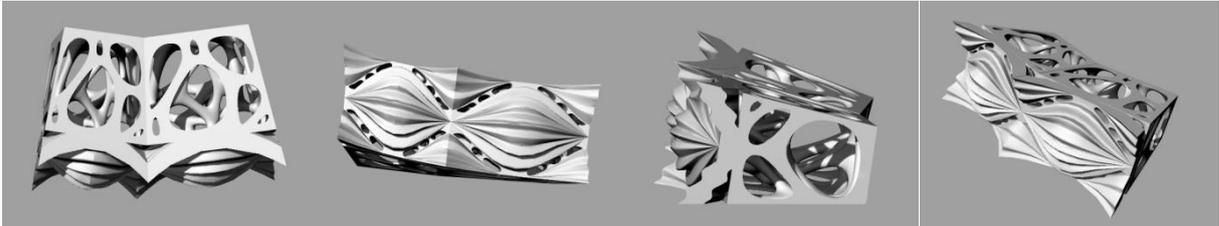


Modelagem da Célula torcionada do Coco

Continua...



Modelagem da Célula torcionada da Graviola



Modelagem da Célula torcionada da Pinha ou Fruta do Conde

Figura 77: Modelagem digital dos protótipos torcidos das células das cascas dos frutos das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria

### 2.3.5.2.3.5 Modelagem digital de protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5

No terceiro momento foi modelado um painel torcionado desmontável da célula estrutural 5. A célula estrutura 5 foi escolhida para realizar a produção do painel devido ao menor tempo de impressão e menor uso de material para impressão na impressora *RepRap Anet A8*.

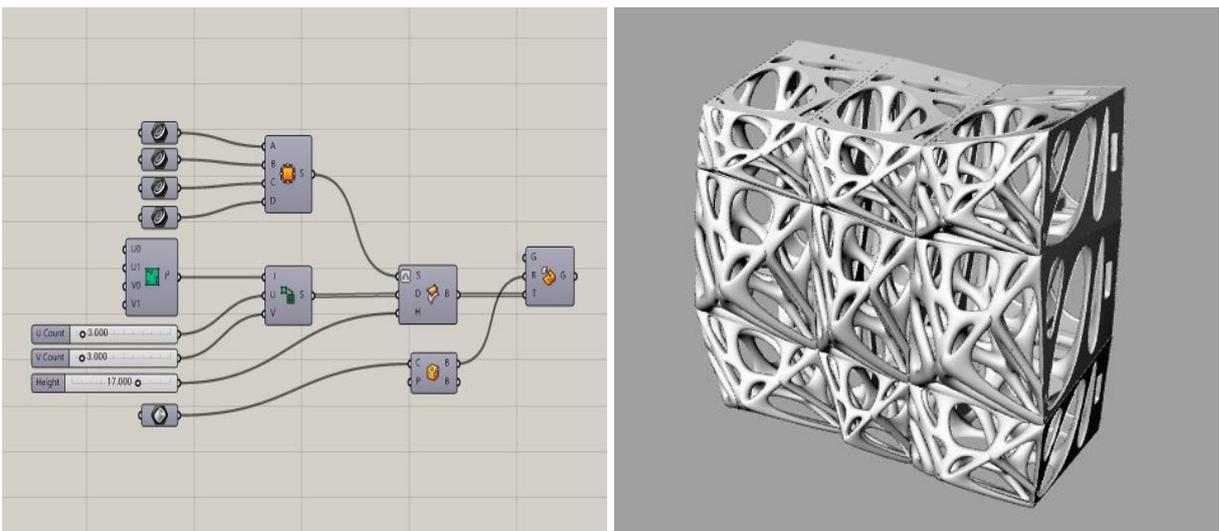


Figura 78: Modelagem digital de protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5. Fonte: Própria

#### 2.3.5.2.3.6 Observação na modelagem 3D da célula estrutural

Assim, sendo que:

A modelagem 3D digital utilizando o *software rhinoceros 5.0* apresentou limitações na modelagem de estruturas naturais de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos, além da possibilidade de fazer as modificações necessárias rapidamente.

A modelagem 3D digital utilizando o *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *t-spline* permitiram modelar uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas e com a possibilidade de fazer as modificações necessárias rapidamente.

A modelagem 3D digital misturando a modelagens direta e programada permitiram a modelagem 3D digital das células inspiradas nas estruturas das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde; além da modelagem do painel de células com dupla curvatura.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

As tecnologias de modelagem 3D digital se apresentam como ferramentas importantes na modelagem de estruturas naturais. Onde, a importância é devido a que permitem a criação de formas complexas e a manipulação dessas formas pela programação de parâmetros para modificação.

#### *2.3.5.2.4 Observação na determinação da Forma da célula a partir das características estruturais das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco, graviola e, pinha ou fruta do conde*

Assim, sendo que:

A representação bidimensional se apresentou como uma ferramenta limitada no aprofundamento do estudo das formas mais complexas e na variação das formas e tamanhos.

A modelagem manual utilizando massa plástica para artesanato se apresentou como uma ferramenta limitada para a modelagem de partes de menor tamanho e muito finas, além do tempo requerido para secagem da peça e sua posterior manipulação.

As tecnologias de modelagem 3D digital se apresentaram como ferramentas importantes na modelagem de estruturas naturais. Onde, a importância foi devido a que permitiram a criação de formas complexas e sua manipulação pela programação de parâmetros para modificação.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

As tecnologias de modelagem 3D digital, na mistura da modelagem direta e modelagem por programação, são ferramentas importantes que permitem a modelagem e manipulação de formas complexas inspiradas nas estruturas das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde.

#### *2.3.5.3 Escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural*

A escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural foi realizada em um processo composto por 2 fases. 1) Fabricação digital por adição utilizando fabricação por filamento fundido, 2) Fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina.

Onde, foi observado que a fabricação digital por adição utilizando a tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas inspiradas em estruturais naturais com uma alta qualidade de impressão, rapidez, resistência e prontas para uso.

#### *2.3.5.3.1 Fabricação digital por adição utilizando fabricação por filamento fundido*

A fabricação digital por adição utilizando a tecnologia de fabricação por filamento fundido foi realizada seguindo um processo composto por 5 fases: 1) Equipamento e filamento utilizados, 2) Protótipos da célula estrutural, 3) Protótipos não torcidos das células, 4) Protótipos torcidos das células, 5) Protótipo de painel torcido desmontável da célula estrutural 5.

Onde, foi observado que a fabricação por filamento fundido utilizando filamento de ácido poliláctico - *PLA* - em impressora *RepRap Anet A8* para produção de formas complexas é demorada e gera falhas de fabricação quando as superfícies tem uma inclinação maior a 45 graus.

##### *2.3.5.3.1.1 Equipamento e filamento utilizados*

Na fabricação dos protótipos das células estruturais foram utilizados uma impressora 3D *RepRap Anet A8* e o filamento de ácido poliláctico ou *PLA*. Na preparação do arquivo para impressão foi utilizado o *software Cura 15.04.6*.

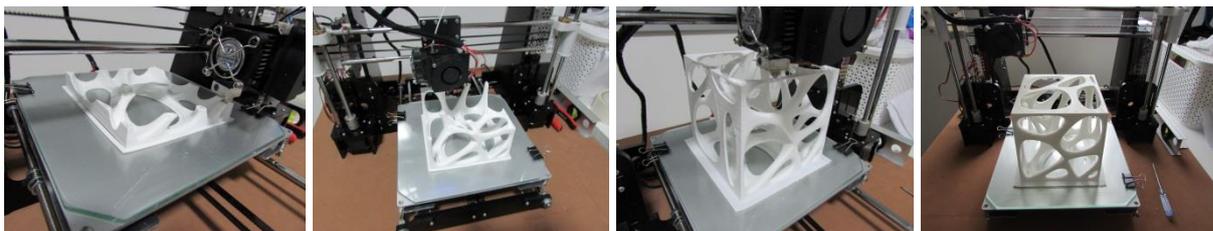


Figura 79: Fabricação por filamento fundido utilizando impressora 3D *reprap anet a8*. Fonte: Própria

### 2.3.5.3.1.2 Protótipos da célula estrutural

Foram fabricados 6 protótipos das células estruturais. O tamanho dos protótipos foram de 4cm x 6cm x 4cm até 12cm x 12cm x 12cm. O tempo de fabricação foi de 3 até 12 horas por cada protótipo. O tamanho dos protótipos dos painéis foram de 4,5cm x 9cm x 9cm. E, o tempo de fabricação foi de 9 horas.

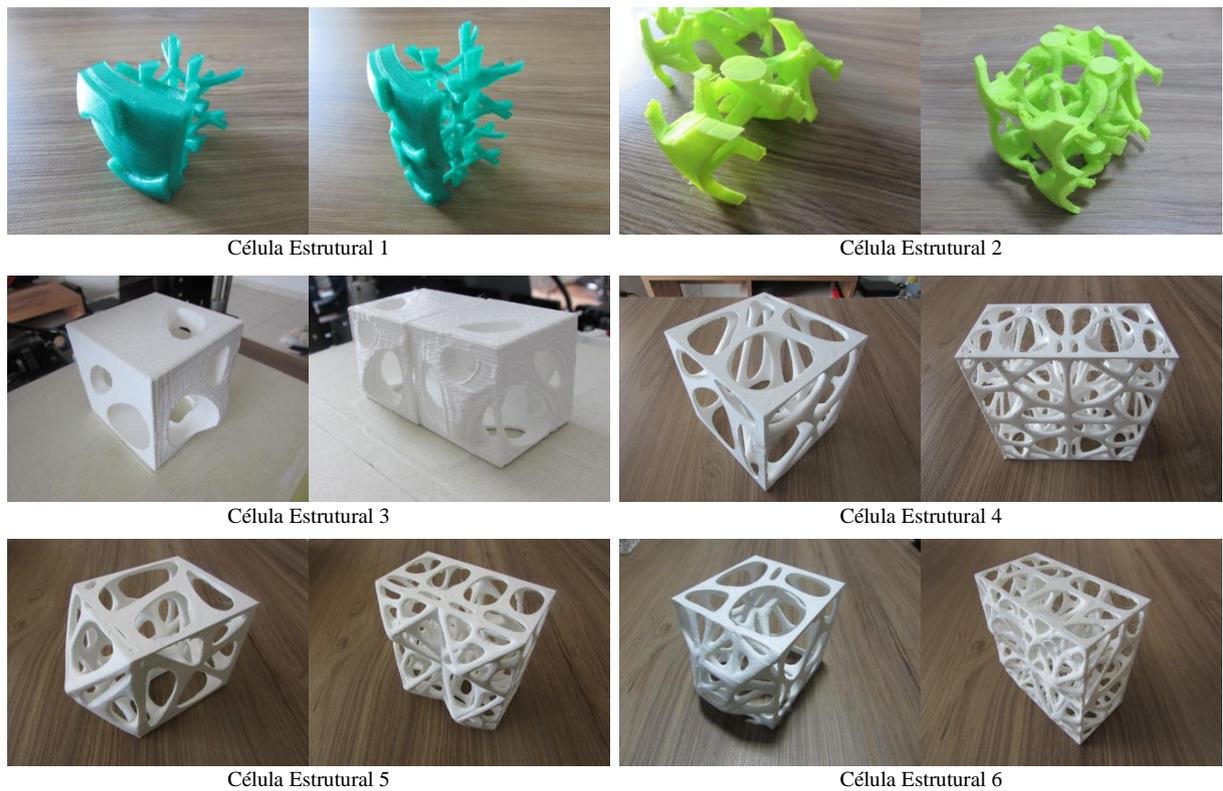


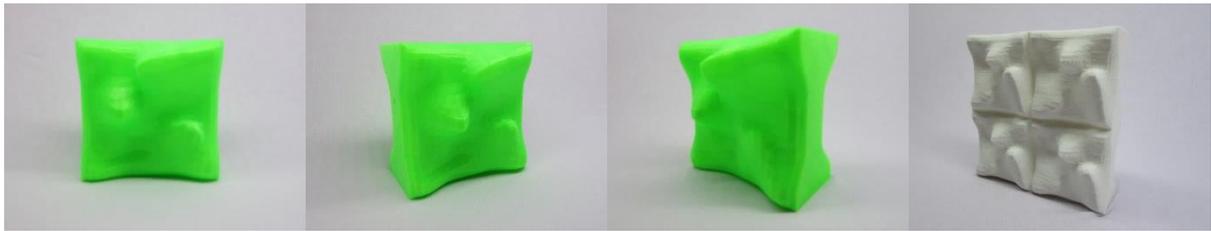
Figura 80: Protótipos da célula estrutural. Fonte: Própria

Na fabricação foi observado que os protótipos das células estruturais mais leves, 1-2-4-5-6, levaram maior tempo para fabricação que a célula estrutural 3, compacta. Embora as células estruturais mais leves tenham levado mais tempo para fabricação, elas apresentaram uma boa resistência.

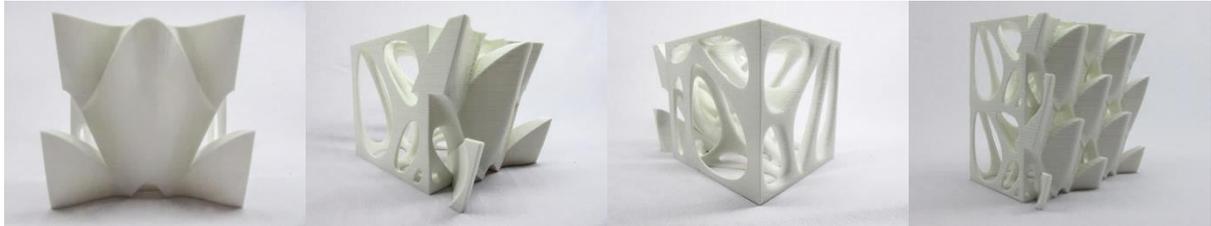
### *2.3.5.3.1.3 Protótipos não torcionados das células*

Na produção das células não torcionadas inspiradas nas estruturas das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde foi observado um maior tempo de fabricação nas células que apresentam partes compactas e estruturas de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas (células não torcionadas do buriti, coco babaçu, graviola, pinha) que o protótipo compacto (célula não torcionada da atemoia)

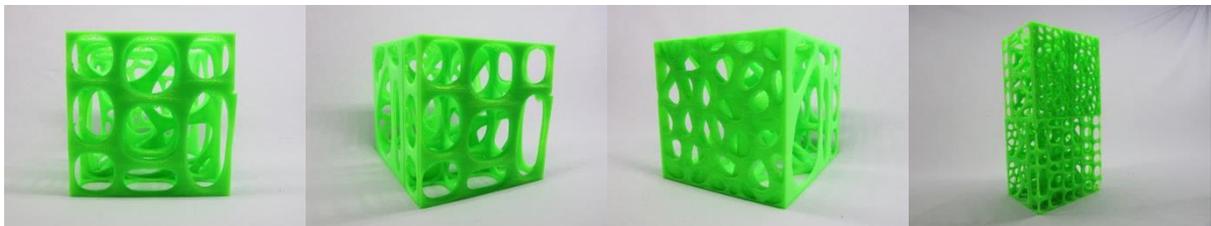
O tamanho das células foram de 9cm x 3,5cm x 9cm no caso da atemoia, 12cm x 18cm x 12cm no caso do buriti, 12cm x 16cm x 12cm no caso do coco babaçu, graviola e pinha. E o tempo de fabricação de cada protótipo foi de 9 até 30 horas. No caso doas painéis que na sua maioria foram de 9cm x 3,5cm x 9cm o tempo de fabricação foi de 12 até 26 horas.



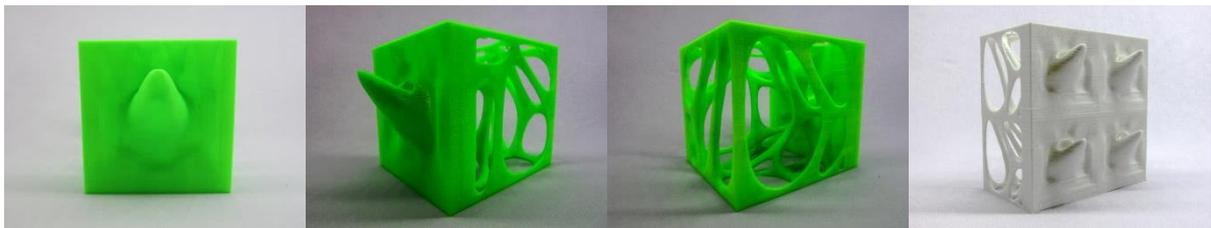
Célula não torcionada da Atemoia



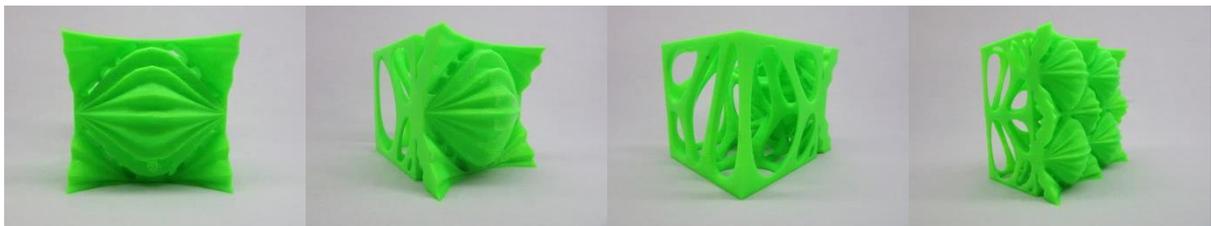
Célula não torcionada do Buriti



Célula não torcionada do Coco



Célula não torcionada da Graviola



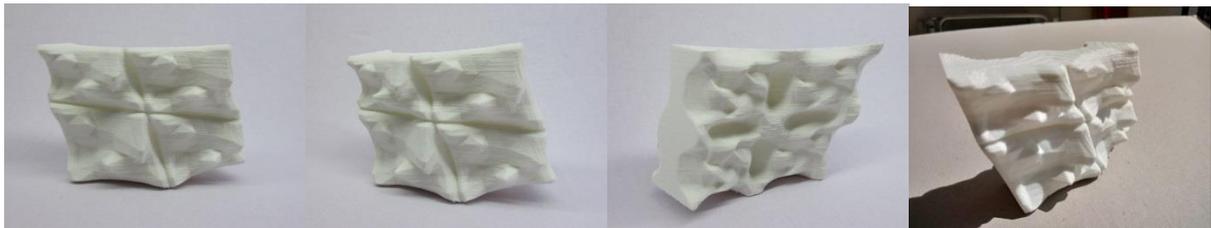
Célula não torcionada da Pinha ou Fruta do Conde

Figura 81: Protótipos não torcionados das células das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria

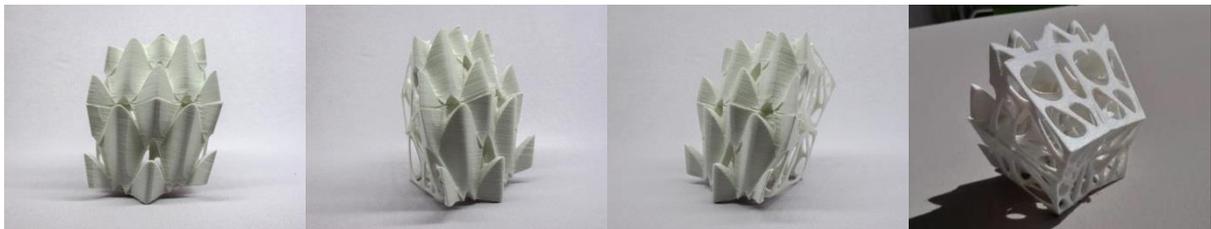
Na fabricação dos protótipos foi observado que quanto mais complexa a forma da célula, maior será o tempo de fabricação e, que se apresentam falhas na fabricação quando a inclinação das formas é mais do que 45 graus.

#### 2.3.5.3.1.4 Protótipos torcidos das células

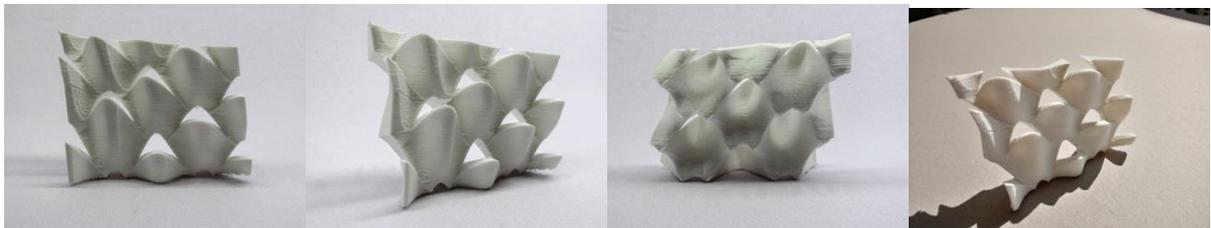
Na produção dos protótipos dos painéis torcidos das células foi observado que as partes muito finas sofreram falhas de fabricação devido a que as curvaturas foram muito pronunciadas e a impressora não conseguiu produzir as camadas muito pequenas.



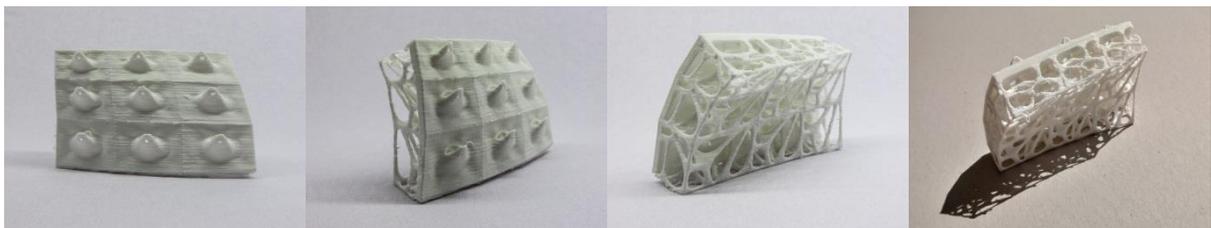
Célula torcionada da Atemoia



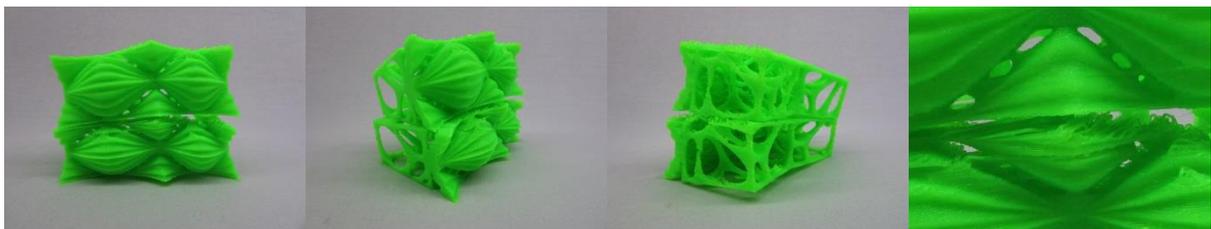
Célula torcionada do Buriti



Célula torcionada do Buriti



Célula torcionada da Graviola



Célula torcionada da Pinha ou Fruta do Conde

Figura 82: Protótipos torcidos das células estruturais das espécies frutíferas: atemoia, buriti, coco, graviola, pinha ou fruta do conde. Fonte: Própria

Também, foi observado que as falhas na fabricação sumiram quando foi aumentado o tamanho de impressão da peça.

#### *2.3.5.3.1.5 Protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5*

Na fabricação do painel torcionado desmontável da célula estrutural 5 foram observadas deformações das células nas superfícies de dupla curvatura a poiadas na mesa de impressão da impressora além pequenas deformações nas células como um todo.



Figura 83: Protótipo de painel torcionado desmontável da célula estrutural 5. Fonte: Própria

Também, foi observado que embora as células tenham sofrido pequenas deformações em relação ao modelo 3D digital foi possível obter um painel que permitiu mostrar a ideia do design e estudar a forma de união das células. Ao mesmo tempo em que foi observado que a tecnologia de fabricação não gera um produto pronto para uso final.

#### *2.3.5.3.1.6 Observação na fabricação digital por adição utilizando fabricação por filamento fundido*

Assim, sendo que foi utilizado filamento de ácido polilático ou *PLA* em uma impressora *RepRap Anet A8* com o fatiador *Cura 15.04.6*; que os protótipos das células estruturais mais leves levam mais tempo para fabricação; que quanto mais complexa a forma da célula estrutural maior será o tempo de fabricação e, quanto maior a inclinação de 45 graus das formas, maiores as falhas na fabricação; em tais observações, nesta tese, será adotado que a fabricação por filamento fundido utilizando filamento de ácido polilático em impressora

*RepRap Anet A8* para produção de formas complexas é demorada e gera falhas de fabricação quando as superfícies tem uma inclinação maior a 45 graus.

#### *2.3.5.3.2 Fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina*

A Fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina foi realizada por um processo composto por 2 fases. 1) Equipamento e resina utilizados, 2) Protótipo torçionado de painel da célula estrutural 5.

Onde, foi observado que a fabricação digital por adoção pela tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas e finas emulando estruturas naturais com uma alta qualidade de impressão, resistência e prontas para uso.

##### *2.3.5.3.2.1 Equipamento e resina utilizados*

Na fabricação dos protótipos das células estruturais torçionadas foram utilizadas a impressora *Moonray S*, e a resina *Sprinray Die and Model Gray*. Na preparação do arquivo para impressão foi utilizado o *software Sprinray Rayware 1.4.6*.

A produção do protótipo foi seguindo um processo composto por 5 fases. Na primeira fase, o arquivo com extensão *stl* foi fatiado com o software *Sprinray Rayware 1.4.6* e gerado o *G-code*. Na segunda fase, foi colocada a resina de marca *Sprinray Die and Model Gray* no tanque de impressora *Moonray S*. Na terceira fase, foi enviado o arquivo *G-code* para impressão. Na quarta fase, o protótipo foi limpo com álcool isopropílico 99%. A limpeza foi realizada utilizando luvas, máscara e óculos de proteção. Na quinta fase, o protótipo foi exposto ao sol para secagem e endurecimento da resina



Figura 84: Fabricação por processamento de luz direta em resina utilizando impressora 3D moonray s. Fonte: Própria

#### 2.3.5.3.2.2 Protótipo torçionado de painel da célula estrutural 5

O protótipo do painel foi composto por 6 células estruturais torçionadas da célula estrutural 5. O tamanho do protótipo foi de 8cm x 4cm x 8cm. O tempo de fabricação foi de 3 horas.

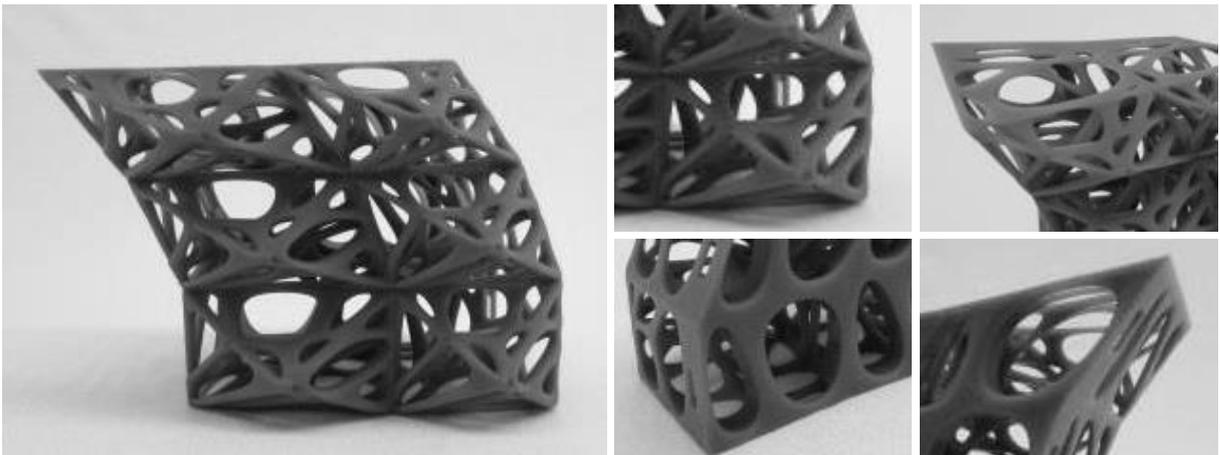


Figura 85: Protótipo torçionado da célula estrutural 5. Fonte: Própria

Na fabricação do protótipo, em termos gerais, foi observada a alta qualidade da impressão e a rapidez de produção. Em termos de resistência, foi observado que embora o protótipo tivesse partes finas, o protótipo apresentou alta resistência. Em termos de produção de estruturas emulando as estruturas naturais, foi observado que a tecnologia da impressão 3D por processamento por luz direta em resina permitiu a produção de formas complexas e finas.

#### *2.3.5.3.2.3 Observação na fabricação digital por adição utilizando processamento de luz direta em resina*

Assim, sendo que a fabricação digital por adição utilizando a tecnologia de processamento por luz direta sobre resina foi um processo de alta qualidade de impressão e rápido, que pelo processamento de luz direta foi possível se produzir estruturas finas mas com alta resistência, que pelo processo de luz direta foi possível produzir formas complexas e finas para uso final; em tais observações, nesta tese, será adotado que a fabricação digital por adoção pela tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas e finas emulando estruturas naturais com uma alta qualidade de impressão, resistência e prontas para uso.

#### *2.3.5.3.3 Observação na escolha da tecnologia de fabricação digital por adição para a produção da célula estrutural*

Assim, sendo que a fabricação por filamento fundido utilizando filamento de ácido polilático em impressora *RepRap Anet A8* para produção de formas complexas é demorada e gera falhas de fabricação quando as superfícies tem uma inclinação maior a 45 graus, a fabricação digital por adoção pela tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas e finas emulando estruturas naturais com uma alta qualidade de impressão, resistência e prontas para uso; em tais observações, nesta tese, será adotado que a fabricação digital por adoção utilizando a tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas inspiradas em estruturais naturais com uma alta qualidade de impressão, rapidez, resistência e prontas para uso.

### 2.3.6 Síntese

Nesta tese será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se em a hipótese guia do experimento: As tecnologias digitais - microscópio *MEV Jeol JSM-7000F*, *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem observar e projetar uma célula estrutural de forma complexa inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, *software sprintray rayware 1.4.6*, impressora *reprap anet a8*, impressora *moonray S* - permitem a produção de uma célula estrutural pela fundição de filamento de ácido polilático - *PLA* - e processamento de luz direta em resina *moonray gray*. Na cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).

A partir das observações listadas na tabela a seguir

Tabela 5: Observações no Protocolo do Experimento 3

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Determinação das características estruturais das cascas dos frutos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Metalizador <i>Belzier SCD 050</i>;</li> <li>▪ Microscópio <i>MEV Jeol JSM-7000F</i>;</li> </ul>	Predominantemente as cascas dos frutos das espécies frutíferas analisadas – atemoia, buriti, coco babaçu, graviola, pinha ou fruta do conde – são compostas por uma superfície externa contínua, enrugada e encerrada e, uma superfície interna composta por uma estrutura de bolhas interconectadas de diferentes formas e tamanhos em várias camadas.
2	Determinação da forma da célula estrutural	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0</i>;</li> <li>▪ <i>Software Grasshopper</i>.</li> </ul>	As tecnologias de modelagem 3D digital, na mistura da modelagem direta e modelagem por programação, são ferramentas importantes que permitem a modelagem e manipulação de formas complexas inspiradas nas estruturas das cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde.
3	Tecnologia de fabricação digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8</i>;</li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S</i>;</li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6</i>;</li> <li>▪ <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6</i>.</li> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i>;</li> <li>▪ Resina <i>Moonray Gray</i>.</li> </ul>	A fabricação digital por adição utilizando a tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas inspiradas em estruturas naturais com uma alta qualidade de impressão, rapidez, resistência e prontas para uso.

## 2.4 Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa

### 2.4.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de pavilhão biônico de forma complexa e celular inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas.

### 2.4.2 Hipótese

As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper*, *software ecotect 5.5*, *software ladybug*, *software autodesk flow design*, *software archicad 23* - permitem projetar, simular e exportar para BIM o projeto de pavilhão de forma complexa inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital - *software sprintray rayware 1.4.6*, *impresora moonray S* - permitem a produção do projeto de pavilhão pelo processamento de luz direta em resina. Na cidade de Goiânia (GO).

### 2.4.3 Objetivo Geral

Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de pavilhão biônico de geometrias não euclidianas em tamanho reduzido nas

estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na na cidade de Brasília (DF).

#### *2.4.3.1 Objetivos específicos*

- Definir o código gráfico da forma e a forma da superfície do pavilhão;
- Determinar as características formais das superfícies alternativas para o pavilhão;
- Determinar o comportamento ambiental das superfícies alternativas para o pavilhão;
- Determinar as características da tecnologia para fabricação;
- Determinar o processo para exportação do projeto para BIM.

#### 2.4.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo foi estruturado em 5 fases.

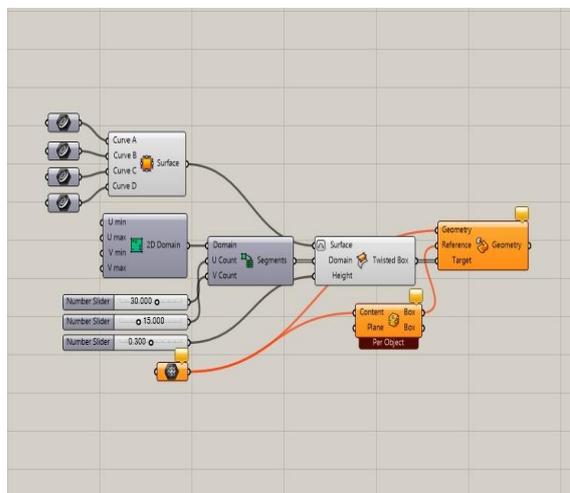
- Definição da superfície do pavilhão;
- Modelagens das alternativas para a superfície do pavilhão;
- Simulações computacionais;
- Prototipagem;
- Exportação para BIM.

## 2.4.5 Desenvolvimento do Experimento

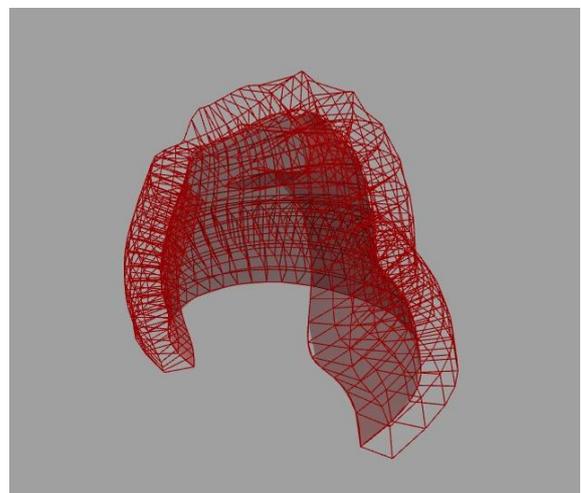
### 2.4.5.1 Definição da superfície do pavilhão

A definição do código gráfico da superfície do pavilhão foi realizada utilizando os softwares, rhinoceros 5.0 e o plugin grasshopper.

O código gráfico foi composto por 3 partes. A parte da definição da superfície, a parte da definição da panelização da superfície e, a parte da definição do módulo. A definição da superfície foi realizada a partir de 4 curvas e foi conectada à definição da panelização pela ferramenta *surface box*. A definição da panelização foi realizada a partir do estabelecimento de um domínio que foi subdividido em pequenas superfícies organizadas em filas e colunas e transformadas em painéis tridimensionais torcidos. A definição do módulo foi realizada com o desenvolvimento de uma malha, a determinação dos limites dessa malha e a conexão com a parte da panelização pela ferramenta *box morph*.



Código gráfico da superfície panelizada no grasshopper



Superfície panelizada no rhinoceros 5.0

Figura 86: Definição da superfície do pavilhão. Fonte: Própria

Na definição da superfície do pavilhão foi observado que o código estabelece um conjunto de regras para um determinado objetivo e, que nesse conjunto de regras podem ser estabelecidos parâmetros que podem ser modificados rapidamente segundo uma determinada necessidade. Também foi observado que o código da superfície pode receber códigos para manipulação da forma das curvas e, da forma do módulo para ser distribuído ao longo da superfície.

#### 2.4.5.2 Modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão

As modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão foram realizadas utilizando o código gráfico desenvolvido previamente e, 10 células desenvolvidas no experimento 3.

A modelagem computacional foi realizada em 3 fases: ajuste do tamanho da superfície, ajuste dos parâmetros de filas e colunas e, ajuste da altura dos painéis. Na primeira fase, do ajuste do tamanho da superfície, a superfície do pavilhão foi definida por 4 curvas *nurbs* tridimensionais determinando um tamanho da superfície de 2,5m x 2,5m x 2,5m. Na segunda fase, do ajuste dos parâmetros de filas e colunas da superfície do pavilhão, a superfície foi dividida em 15 filas e 30 colunas de painéis. E, na terceira fase, do ajuste da altura dos painéis, os painéis foram definidos com uma altura de 0,3m.

Após de serem realizados os ajustes do tamanho da superfície, da quantidade de filas e colunas dos painéis e, da altura dos painéis. As células anteriormente desenvolvidas foram convertidas em malhas e posteriormente foram introduzidas no código gráfico. E, por último, o conjunto de regras estabelecidas para a definição da superfície do pavilhão no ambiente do *plugin gasshopper* foram passadas para o ambiente do software *rhinoceros 5.0* na forma definitiva da superfície do pavilhão.

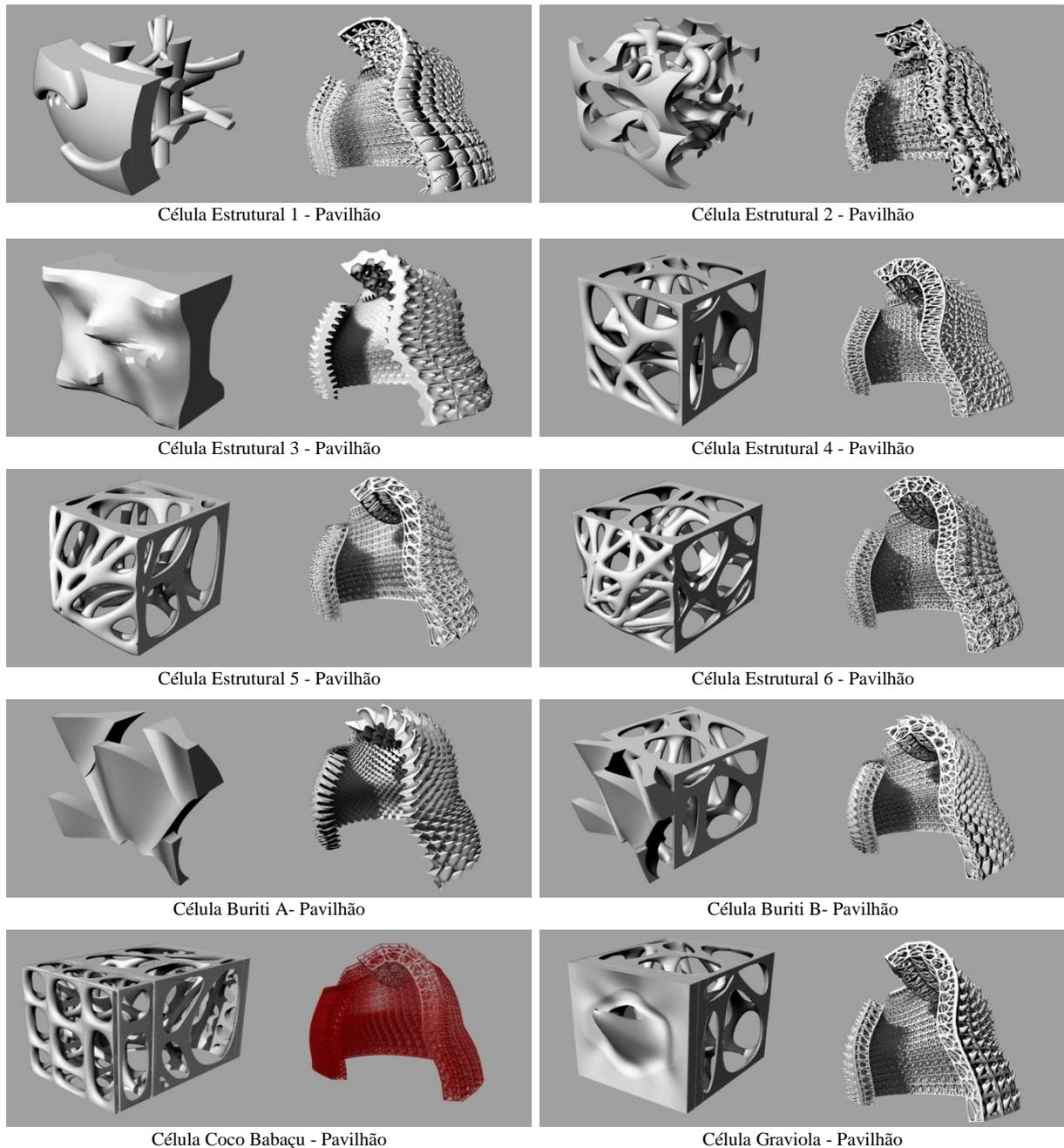


Figura 87: Modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão. Fonte: Própria

Nas modelagens computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão foi observado que a quanto mais complexa foi a forma da célula em termos de quantidade de componentes, mais demorada foi a modelagem da superfície do pavilhão. Também foi observado que quanto mais complexa a forma da célula, maior foi a demanda por memória e velocidade de processamento do computador. No caso da modelagem da superfície do pavilhão com a célula do coco babaçu não foi possível a modelagem da superfície devido à demanda por mais memória e velocidade de processamento do computador.

#### 2.4.5.3 Simulações computacionais

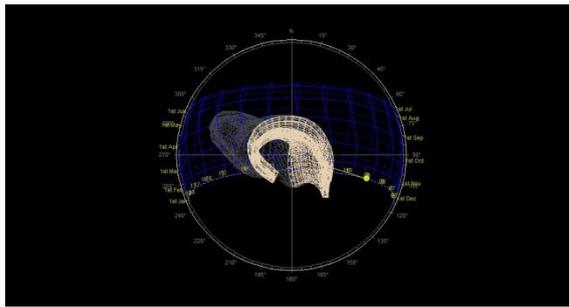
As simulações computacionais das alternativas para a superfície do pavilhão foram realizadas em um processo de 5 fases. 1) Simulação computacional de projeção de sombras do pavilhão, 2) Simulação computacional de radiação no pavilhão, 3) Simulação computacional de ventos no pavilhão, 4) Simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão, 5) Simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão.

Onde, foi observado que a modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5, composta por elementos que emulam fibras e sua forma pontuda na parte externa, permite menor pressão do vento no pavilhão e, também, permite uma boa passagem do vento através das células.

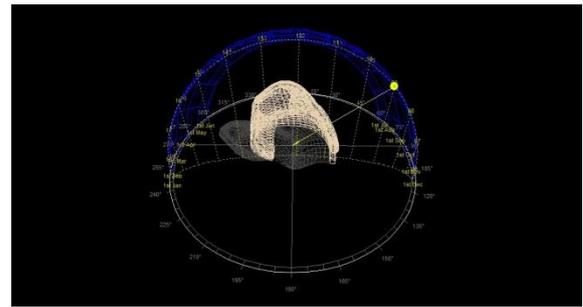
##### 2.4.5.3.1 Simulação computacional de projeção de sombras do pavilhão

A simulação computacional de projeção de sombras pelo pavilhão foi realizada utilizando o *software ecotect 5.5* no dia 21 de dezembro nos horários de 9h00min, 12h00min e 15h00min. As simulações foram realizadas com as informações do o arquivo climático do Instituto de Meteorologia - INMET – para a cidade de Brasília - DF. O dia 21 de dezembro é o dia do solstício de verão no hemisfério sul.

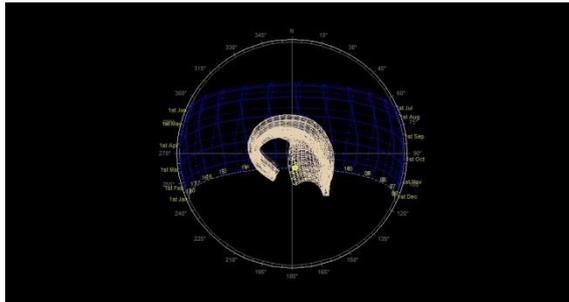
As simulações foram realizadas utilizando uma versão simplificada do pavilhão devido à limitação de memória de processamento do computador utilizado com o *software ecotect 5.5*. Para cada um dos horários da simulação foram geradas duas vistas: uma vista superior e uma vista em perspectiva.



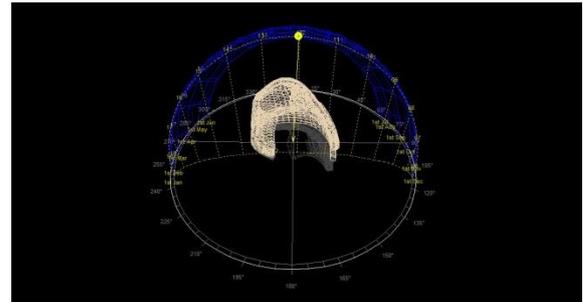
Pavilhão – Vista Superior  
21/dez/2019 - 9h00min



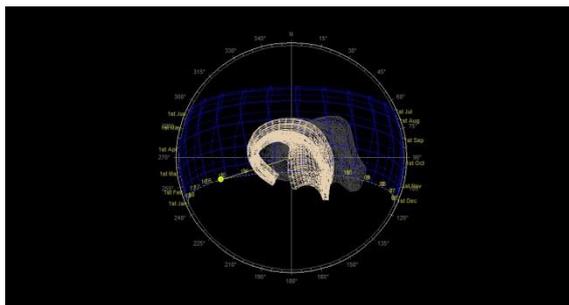
Pavilhão – Perspectiva  
21/dez/2019 - 9h00min



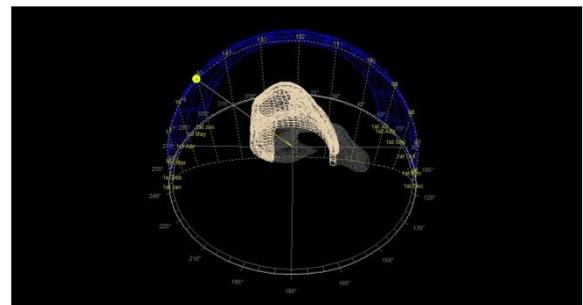
Pavilhão – Vista Superior  
21/dez/2019 - 12h00min



Pavilhão – Perspectiva  
21/dez/2019 - 12h00min



Pavilhão – Vista Superior  
21/dez/2019 - 15h00min



Pavilhão – Perspectiva  
21/dez/2019 - 15h00min

Figura 88: Simulações computacionais de projeção de sombras do pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min. Fonte: Própria

Nas simulações computacionais de projeção de sombras do pavilhão foi observado que na orientação Sul-Norte o pavilhão projeta sombras para o interior nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min.

#### 2.4.5.3.2 Simulação computacional de radiação no pavilhão

A simulação computacional da radiação no pavilhão foi realizada utilizando o *plugin ladybug* no *plugin grasshopper* no *software rhinoceros 5.0* e com o arquivo climático As simulações

foram realizadas com as informações do o arquivo climático do Instituto de Meteorologia - INMET – para a cidade de Brasília, DF.

A simulação foi realizada utilizando uma versão simplificada do pavilhão devido à limitação de memória de processamento do computador utilizado com o *plugin ladybug* no *plugin grasshopper* no *software rhinoceros 5.0*. A simulação foi realizada para o dia 21 de dezembro no período das 6h00min às 18h00min.

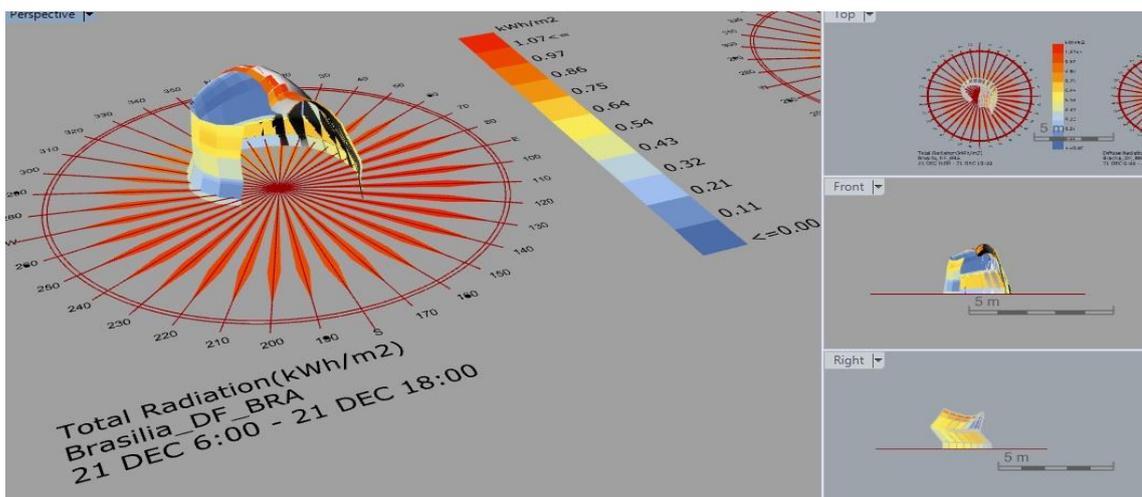


Figura 89: Simulação computacional da radiação captada pelo pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 no período das 6h00min às 18h00min. Fonte: Própria

Na simulação computacional de radiação no pavilhão foi observado que a maior radiação no pavilhão foi numa pequena área na parte superior do pavilhão.

#### 2.4.5.3.3 Simulação computacional de ventos no pavilhão

A simulação computacional dos ventos no pavilhão foi realizada utilizando o *plugin ladybug* no *plugin grasshopper* no *software rhinoceros 5.0* e com o arquivo climático. As simulações foram realizadas com as informações do o arquivo climático do Instituto de Meteorologia - INMET – para a cidade de Brasília, DF.

A simulação foi realizada utilizando uma versão simplificada do pavilhão devido à limitação de memória de processamento do computador utilizado com o *plugin ladybug* no *plugin*

*grasshopper* no *software rhinoceros 5.0*. A simulação foi realizada para o dia 21 de dezembro no período das 6h00min às 18h00min.

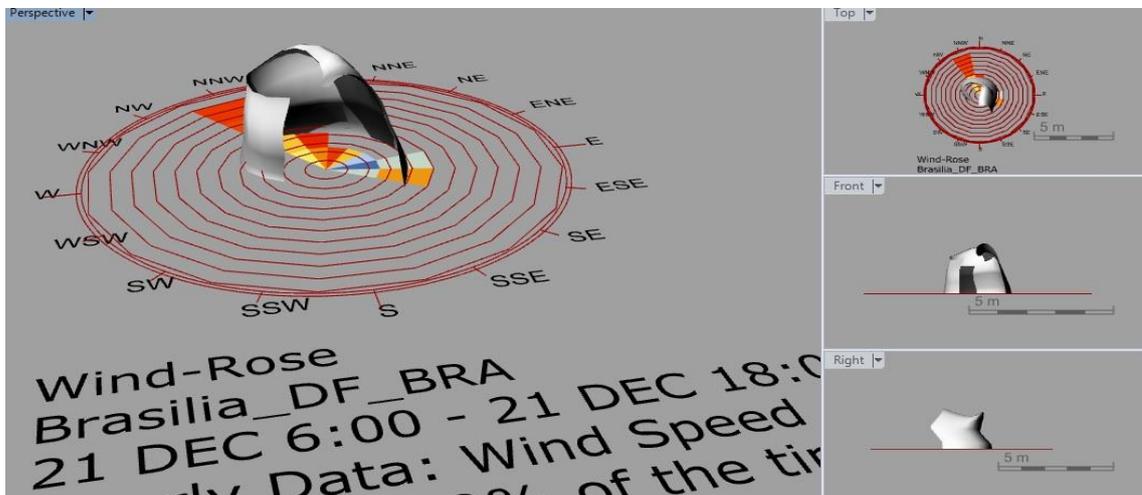


Figura 90: Simulação computacional da direção e intensidade dos ventos. Fonte: Própria

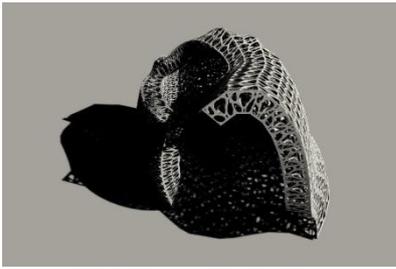
Na simulação computacional dos ventos no pavilhão foi observado que a maior velocidade dos ventos é na direção Noroeste-Sudeste.

#### 2.4.5.3.4 Simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão

As simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão foram realizadas utilizando a ferramenta *sun* na aba *panels* do *software rhinoceros 5.0*. Nessa ferramenta pode ser localizada a cidade de Brasília, DF.

As simulações não foram realizadas utilizando o *software ecotect 5.5* devido à alta demanda por memória e velocidade de processamento do computador utilizado.

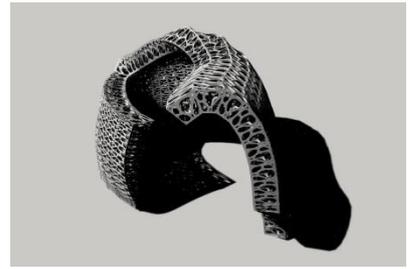
Das 9 alternativas modeladas para a superfície do pavilhão foram selecionadas 6, em função da continuidade e transparência nas superfícies. Para cada uma das 6 alternativas, as simulações foram realizadas para o dia 21 de dezembro nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min.



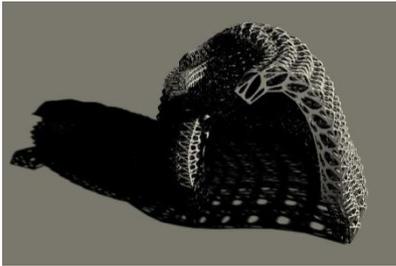
Célula Estrutural 4 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 9h00min



Célula Estrutural 4 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 12h00min



Célula Estrutural 4 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 15h00min



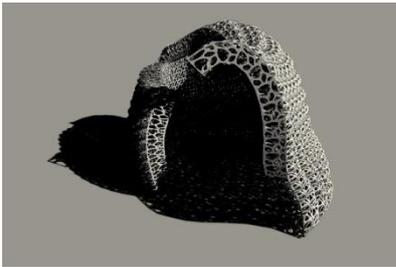
Célula Estrutural 5 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 9h00min



Célula Estrutural 5 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 12h00min



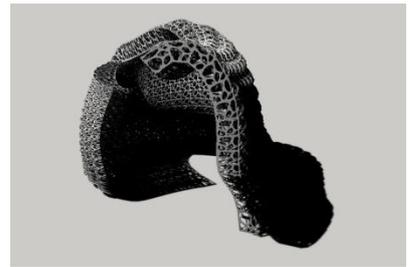
Célula Estrutural 5 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 15h00min



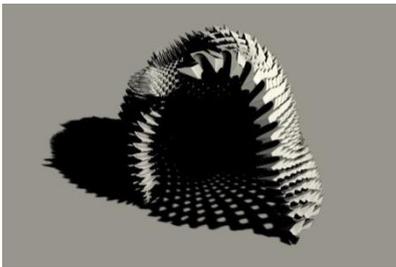
Célula Estrutural 6 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 9h00min



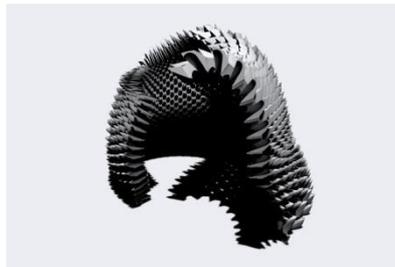
Célula Estrutural 6 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 12h00min



Célula Estrutural 6 - Pavilhão  
21/dez/2019 - 15h00min



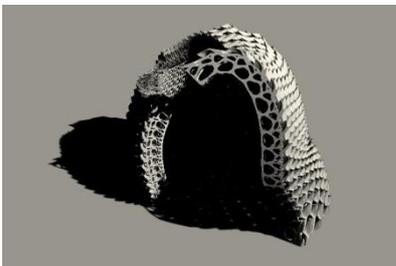
Célula Buriti A - Pavilhão  
21/dez/2019 - 9h00min



Célula Buriti A - Pavilhão  
21/dez/2019 - 12h00min



Célula Buriti A - Pavilhão  
21/dez/2019 - 15h00min



Célula Buriti B - Pavilhão  
21/dez/2019 - 9h00min



Célula Buriti B - Pavilhão  
21/dez/2019 - 12h00min



Célula Buriti B - Pavilhão  
21/dez/2019 - 15h00min



Figura 91: Simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão no dia 21 de dezembro de 2019 nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min. Fonte: Própria

Nas simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão foi observado que a alternativa célula estrutural 5 – Pavilhão oferece melhores sombras nos horários das 9h00min e 12h00min e melhor transparência.

#### 2.4.5.3.5 *Simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão*

As simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão foram realizadas utilizando o *software Autodesk flow design*. As simulações foram realizadas em 2 fases: 1) Simulação do pavilhão utilizando um modelo simples e, 2) Simulação de fragmento do pavilhão modelado com a célula. A simulação com o modelo simples do pavilhão e fragmentos modelados com as células do pavilhão foram devido à limitação de memória de processamento do computador utilizado.

As simulações foram realizadas para duas direções do vento no dia 21 de dezembro. Na direção do vento do Leste-Oeste com uma velocidade de 4m/s e, na direção Norte-Sul com uma velocidade de 10m/s.

#### 2.4.5.3.5.1 Simulação do pavilhão utilizando um modelo simples

O pavilhão foi orientado na direção de Sul-Norte. A entrada ao pavilhão é pelo lado Sul.

Na primeira simulação, da direção do vento do Leste-Oeste com uma velocidade de 4m/s, os ventos são aplicados desde o lado Leste do pavilhão. A velocidade do vento e a pressão do vento sobre o pavilhão foram simulados seguindo a escala de cor que vai da cor azul para a cor vermelha. Onde a cor azul representa a menor velocidade e pressão e a cor vermelha representa a maior velocidade e pressão do vento.

Na simulação da direção do vento do Leste-Oeste com uma velocidade de 4m/s foi observado que a parte baixa do lado Leste do pavilhão é submetida a uma alta pressão do vento, a qual se dilui conforme vai subindo para a parte superior e avança para o lado Norte do pavilhão. Também foi observado que o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão.

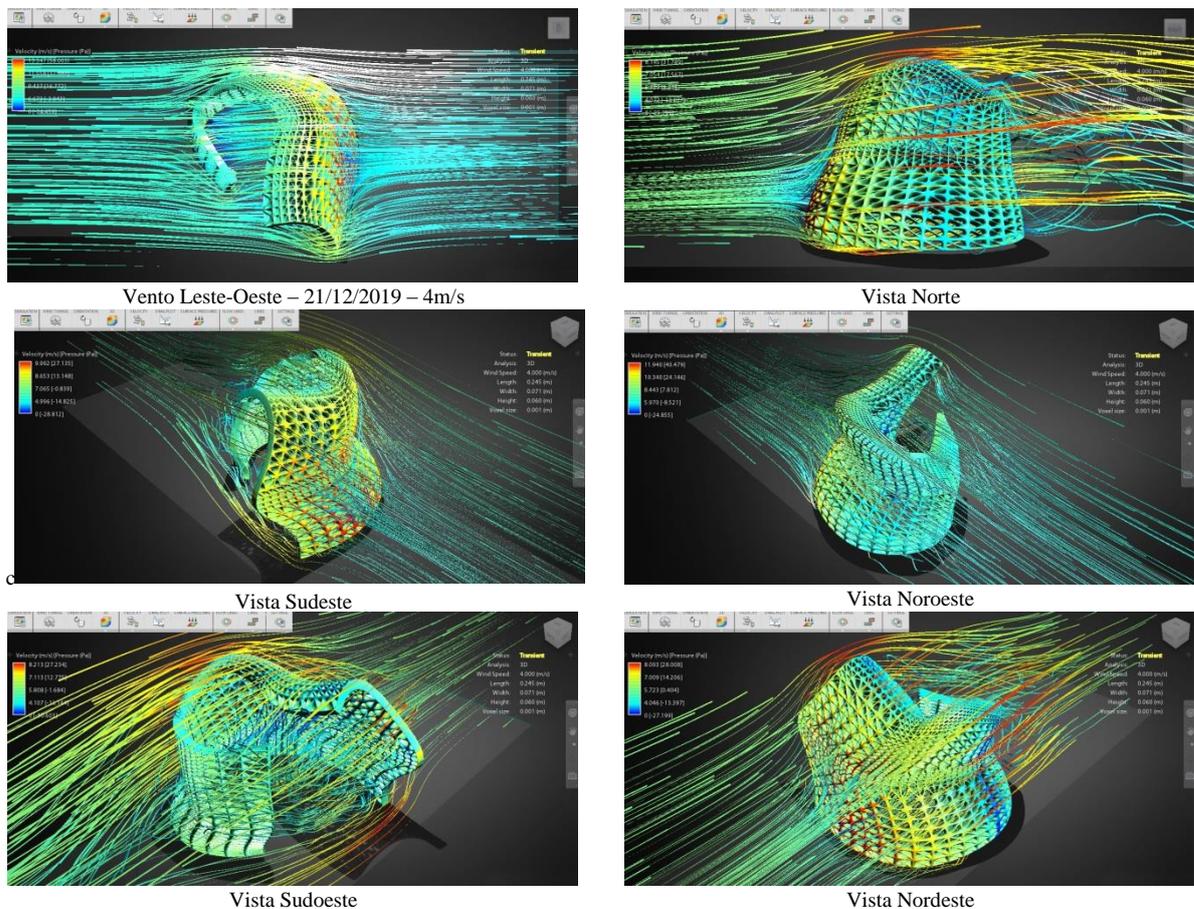


Figura 92: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento no pavilhão – dia 21 de dezembro de 2019, direção do vento leste-oeste e velocidade do vento de 4m/s (dados extraídos do arquivo climático do INMET da cidade de Brasília no DF). Fonte: Própria

Na segunda simulação, da direção do vento do Norte-Sul com uma velocidade de 10m/s, os ventos são aplicados desde o lado Norte do pavilhão. A velocidade do vento e a pressão do vento sobre o pavilhão foram simulados seguindo a escala de cor que vai da cor azul para a cor vermelha. Onde a cor azul representa a menor velocidade e pressão e a cor vermelha representa a maior velocidade e pressão do vento.

Na simulação da direção do vento do Norte-Sul com uma velocidade de 10m/s foi observado que a parte baixa e o canto extremo superior da parte de cima do lado Norte do pavilhão são submetidas a uma alta pressão do vento, a qual se dilui na parte media e conforme vai se deslocando para os lados Oeste e Leste do pavilhão. Também foi observado que o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão.

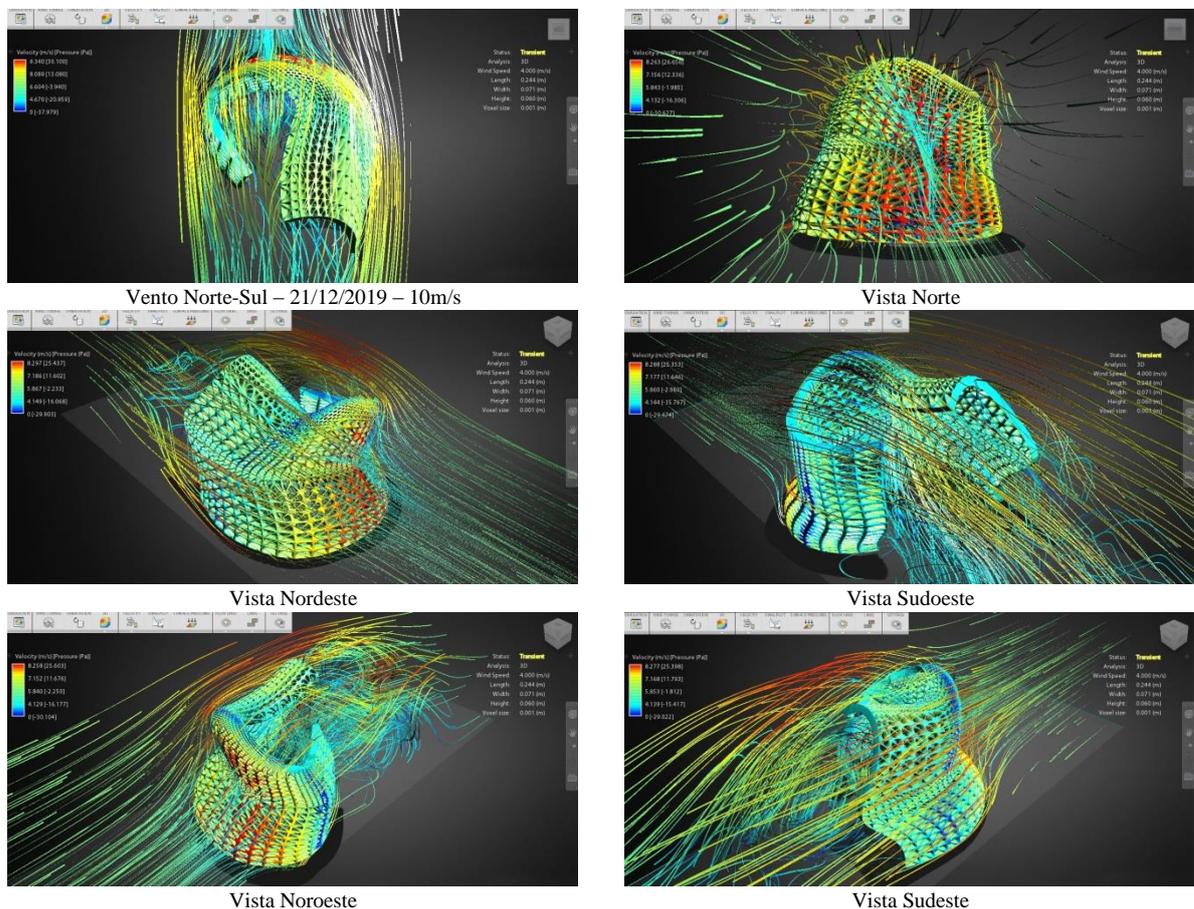


Figura 93: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento no pavilhão – dia 21 de dezembro de 2019, direção do vento leste-oeste e velocidade do vento de 10m/s (dados extraídos do arquivo climático do INMET da cidade de Brasília no DF). Fonte: Própria

#### *2.4.5.3.5.1.1 Observação na simulação do pavilhão utilizando um modelo simples*

Assim, sendo que na simulação da direção do vento Leste-Oeste com velocidade de 4m/s foi observado que a parte baixa do pavilhão sofre maior pressão do vento e, que o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão; que na simulação da direção do vento Norte-Sul com uma velocidade de 10m/s foi observado que a parte baixa e o canto extremo superior da parte de cima do lado Norte e, que o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão; em tais observações, nesta tese, será adotado que as áreas de primeiro contato do vento com o pavilhão são as áreas que sofrem maior pressão e, o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão.

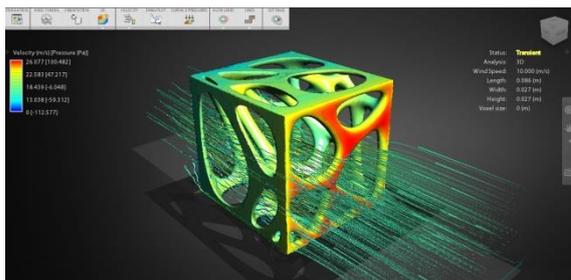
#### *2.4.5.3.5.2 Simulação de fragmento do pavilhão modelado com a célula*

Nesta fase, o pavilhão, também, foi orientado na direção de Sul-Norte. A entrada ao pavilhão é pelo lado Sul.

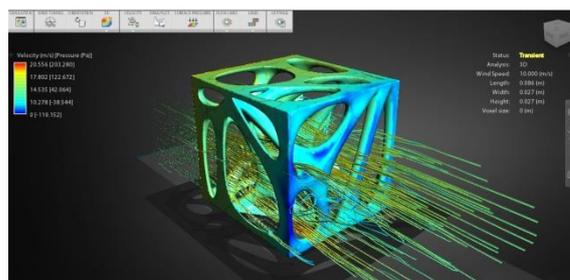
As simulações foram realizadas das células individualmente e dos fragmentos do pavilhão, modelados com as células, que são submetidos às altas pressões do vento quando as velocidades do vento são de 4m/s (direção Leste-Oeste) e 10m/s (direção Norte-Sul).

A velocidade do vento e a pressão do vento sobre os fragmentos do pavilhão foram simulados seguindo a escala de cor que vai da cor azul para a cor vermelha. Onde a cor azul representa a menor velocidade e pressão e a cor vermelha representa a maior velocidade e pressão do vento.

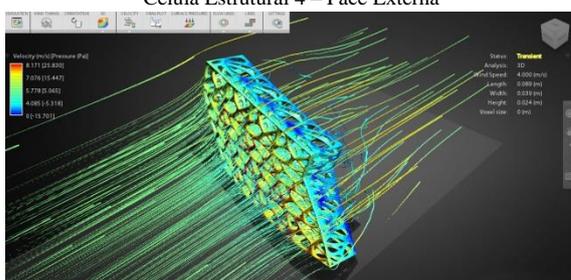
Na simulação da célula estrutural 4 e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que quanto menor o tamanho da célula a pressão do vento é maior e se reduz a passagem do vento através das células.



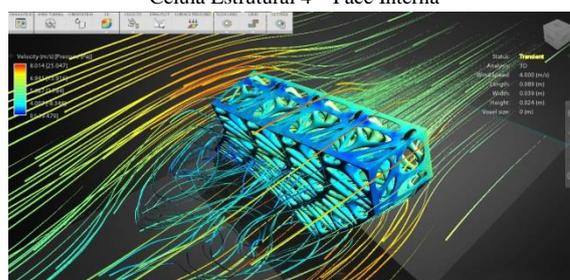
Célula Estrutural 4 – Face Externa



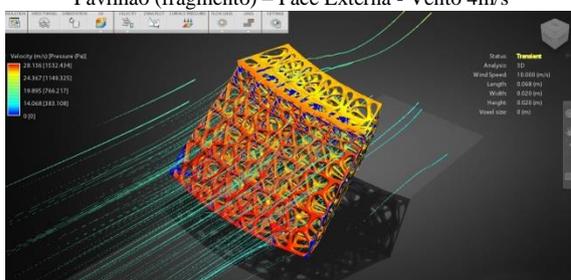
Célula Estrutural 4 – Face Interna



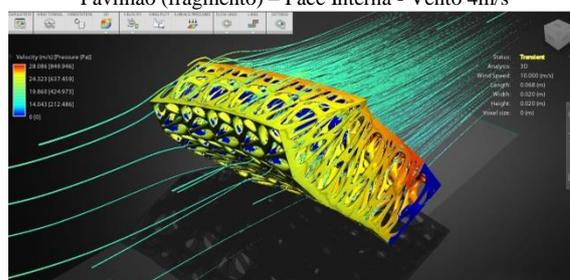
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



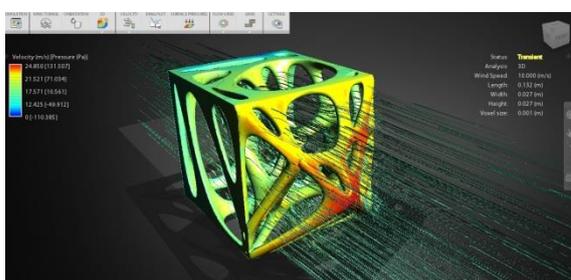
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



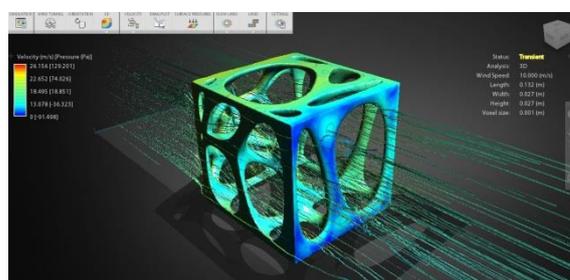
Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 94: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 4 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 4. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

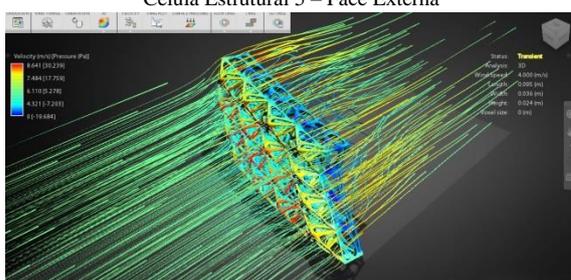
Na simulação da célula estrutural 5 e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que a pressão do vento na célula é menor e se dá uma boa passagem do vento através das células.



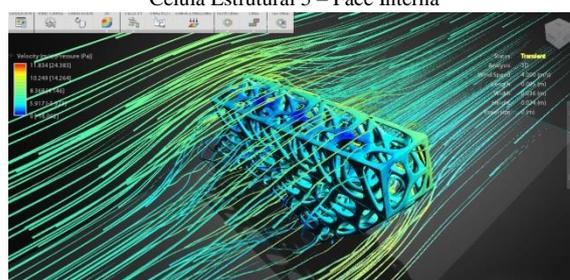
Célula Estrutural 5 – Face Externa



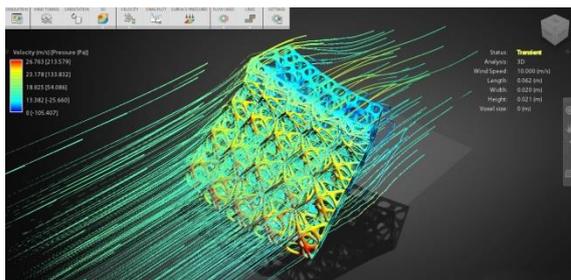
Célula Estrutural 5 – Face Interna



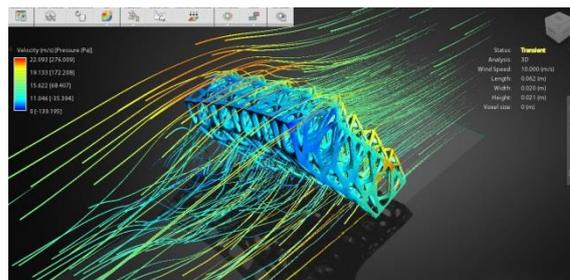
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



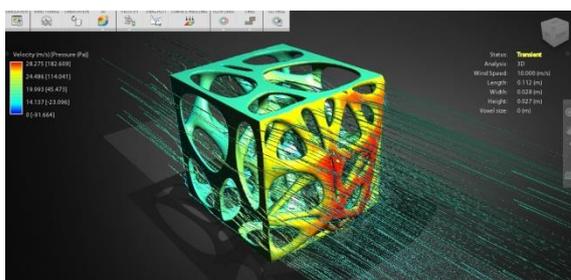
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



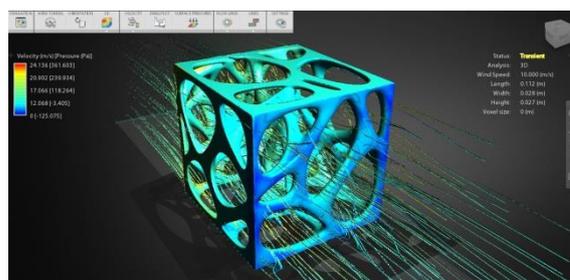
Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 95: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 5 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 5. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

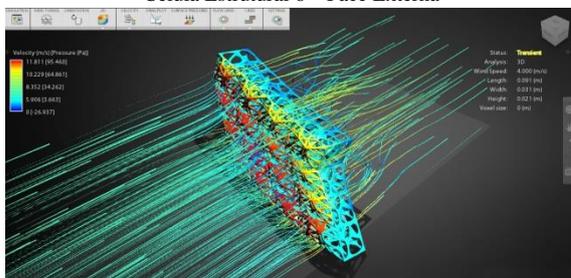
Na simulação da célula estrutural 6 e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que a pressão do vento na célula é moderada, mas se reduz a passagem do vento através das células, quando elas diminuem de tamanho.



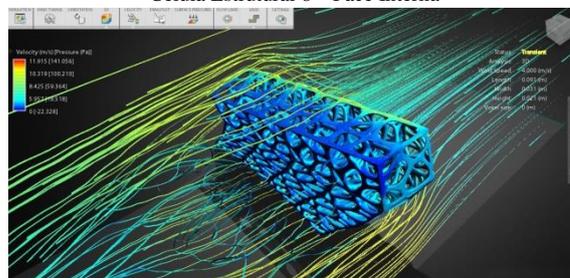
Célula Estrutural 6 – Face Externa



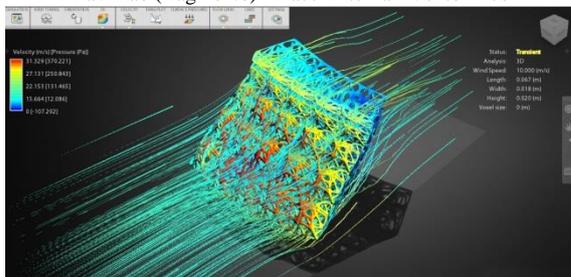
Célula Estrutural 6 – Face Interna



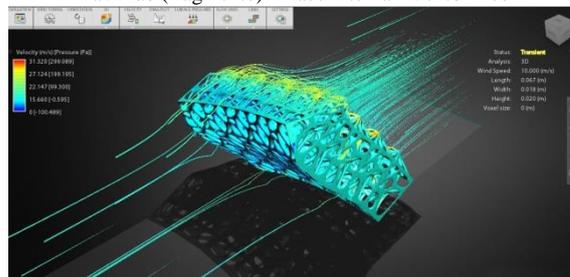
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



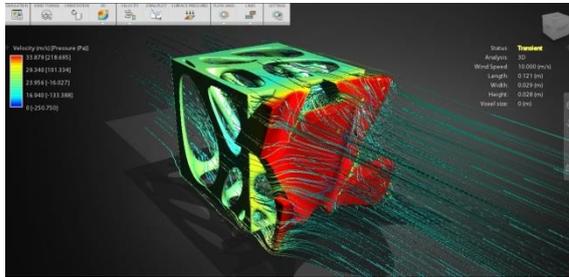
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



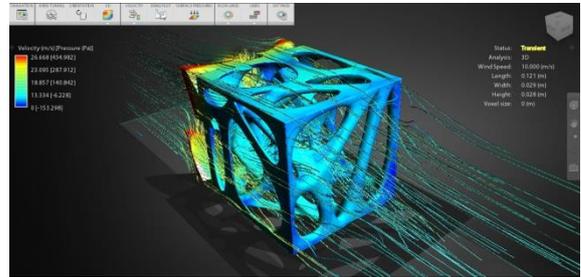
Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 96: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula estrutural 6 e fragmentos do pavilhão modelado com célula estrutural 6. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

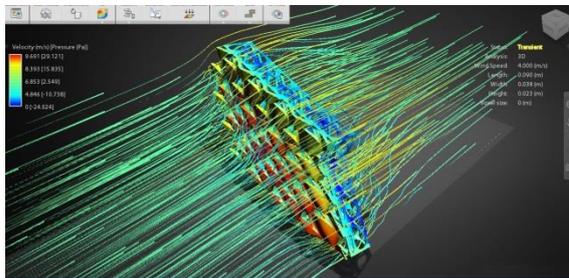
Na simulação da célula buriti B e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que quanto menor o tamanho da célula a pressão do vento é maior e se reduz a passagem do vento através das células.



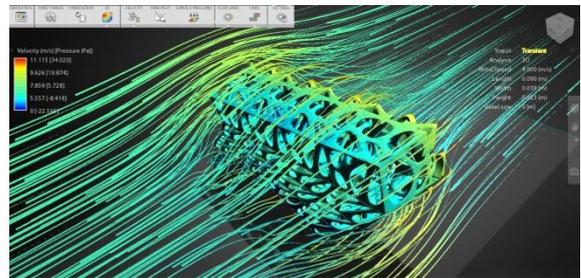
Célula Buriti B – Face Externa



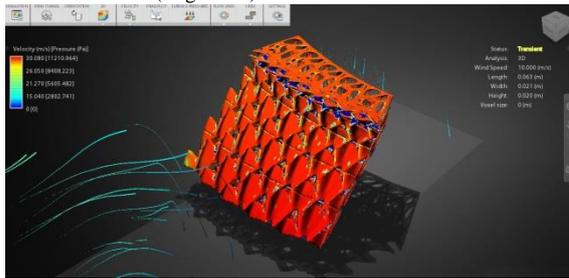
Célula Buriti B – Face Interna



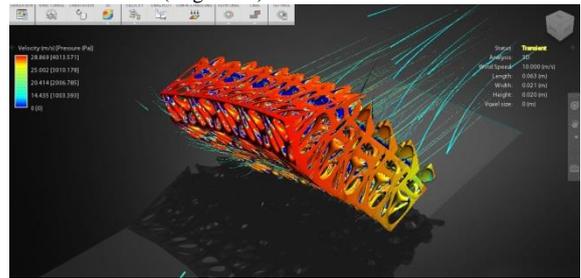
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



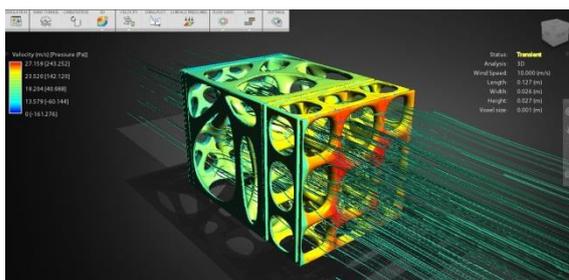
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



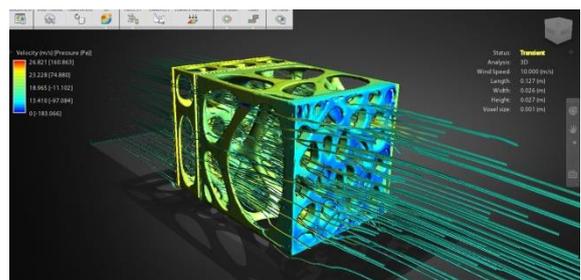
Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 97: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula buriti B e fragmentos do pavilhão modelado com célula buriti B. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

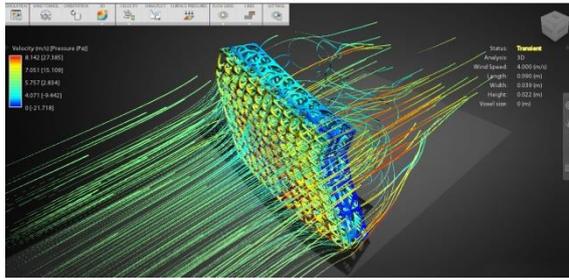
Na simulação da célula coco babaçu e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que a pressão do vento na célula é do nível moderado para alto, mas se reduz a passagem do vento através das células, quando elas diminuem de tamanho.



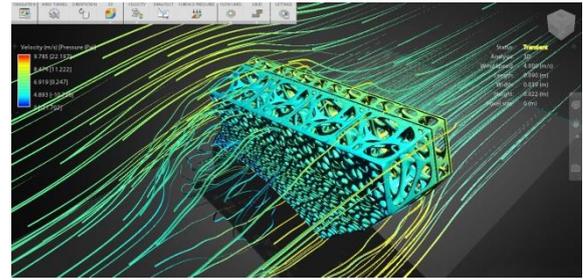
Célula Coco Babaçu – Face Externa



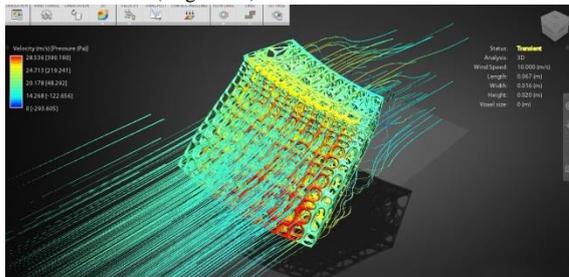
Célula Coco Babaçu – Face Interna



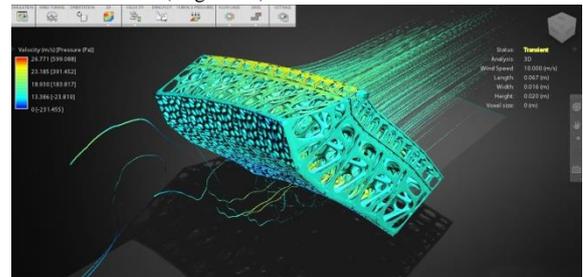
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



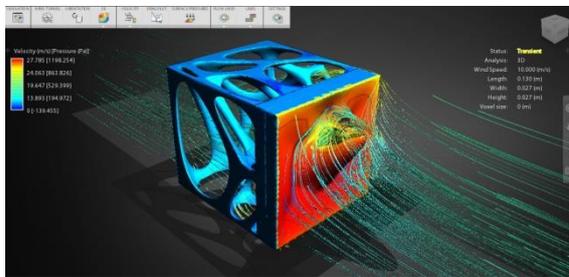
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



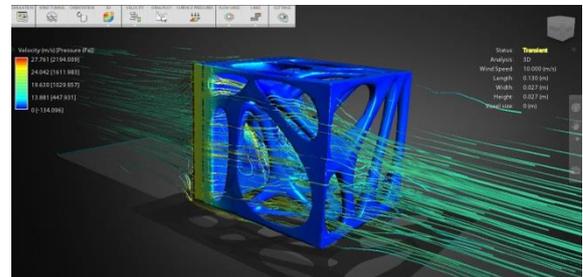
Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 98: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula coco babaçu e fragmentos do pavilhão modelado com célula coco babaçu. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

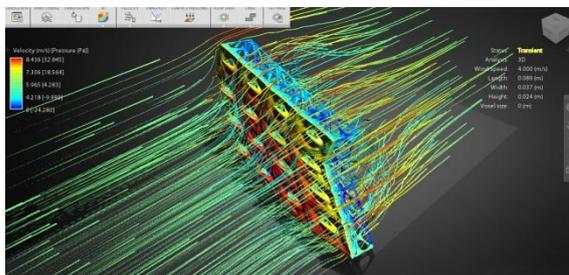
Na simulação da célula graviola e dos fragmentos das áreas submetidas a altas pressões do vento quando as velocidades são de 4m/s e 10m/s foi observado que quanto menor o tamanho da célula a pressão do vento é maior e se reduz a passagem do vento através das células.



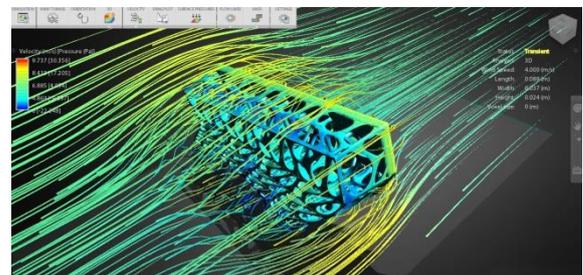
Célula Graviola – Face Externa



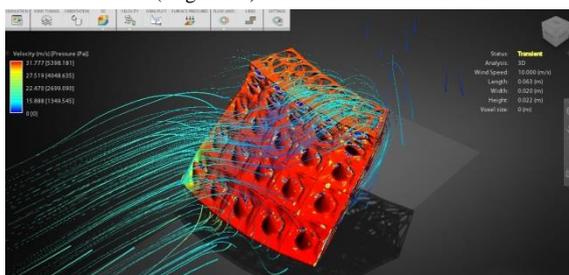
Célula Graviola – Face Interna



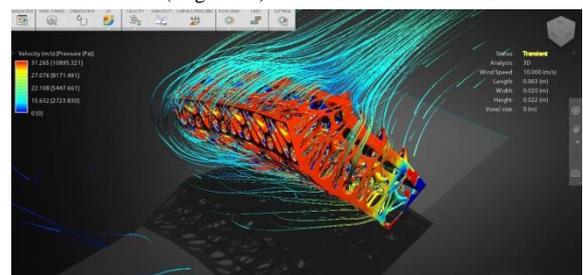
Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 4m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Externa - Vento 10m/s



Pavilhão (fragmento) – Face Interna - Vento 10m/s

Figura 99: Simulação computacional da velocidade e pressão do vento na célula graviola e fragmentos do pavilhão modelado com célula graviola. Fragmentos submetidos a velocidades do vento de 4m/s e 10m/s. Fonte: Própria

#### *2.4.5.3.5.2.1 Observações na simulação de fragmento do pavilhão modelado com a célula*

Assim, sendo que:

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula estrutural 4 foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a passagem do vento através das células;

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula estrutural 5 foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a pressão do vento na célula, mas continua uma boa passagem do vento através das células;

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula estrutural 6 foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a passagem do vento através das células;

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula buriti B foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a passagem do vento através das células;

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula coco babaçu foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a passagem do vento através das células;

Na simulação dos fragmentos do pavilhão modelado com a célula graviola foi observado que quanto menor o tamanho da célula, das áreas submetidas a altas pressões do vento, menor a passagem do vento através das células;

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

A modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 permite menor pressão nas células e boa passagem do vento através delas. E, que a geometria pontuda e composta por fibras da parte externa das células permite aliviar a pressão nas células e preservar a boa passagem do vento.

#### *2.4.5.3.5.3 Observações nas simulações computacionais em túnel de vento das alternativas para a superfície do pavilhão*

Assim, sendo que as áreas de primeiro contato do vento com o pavilhão são as áreas que sofrem maior pressão e, o vento adquire maior velocidade nos contornos do pavilhão; que a modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 permite menor pressão nas células e boa passagem do vento através delas. E, que a geometria pontuda e composta por fibras da parte externa das células permite aliviar a pressão nelas e, também, preservar a boa passagem do vento através delas; em tais observações, nesta tese, será adotado que a modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 permite menor pressão do vento no pavilhão e ao mesmo tempo permite uma boa passagem do vento através das células, independentemente do tamanho das células. E, que a geometria pontuda e composta por fibras da parte externa da célula permite essas condições.

#### *2.4.5.3.6 Observações nas simulações computacionais*

Assim, sendo que:

Nas simulações computacionais de projeção de sombras do pavilhão foi observado que na orientação Sul-Norte o pavilhão projeta sombras para o interior nos horários das 9h00min, 12h00min e 15h00min;

Na simulação computacional de radiação no pavilhão foi observado que a maior radiação no pavilhão foi numa pequena área na parte superior do pavilhão;

Na simulação computacional dos ventos no pavilhão foi observado que a maior velocidade dos ventos é na direção Noroeste-Sudeste.

Nas simulações de projeção de sombras das alternativas para a superfície do pavilhão foi observado que a alternativa célula estrutural 5 - Pavilhão oferece melhores sombras nos horários das 9h00min e 12h00min e melhor transparência.

A modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 permite menor pressão do vento no pavilhão e ao mesmo tempo permite uma boa passagem do vento através das células, independentemente do tamanho delas. E, que a geometria pontuda e composta por fibras da parte externa da célula permite essas condições.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

A modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5, composta por elementos que emulam fibras e sua forma pontuda na parte externa, permite menor pressão do vento no pavilhão e, também, permite uma boa passagem do vento através das células.

#### *2.4.5.4 Prototipagem*

Após a realização das simulações e de ter observado de que a modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 foi a melhor alternativa, o passo seguinte foi a prototipagem do pavilhão.

A prototipagem foi realizada pela tecnologia de processamento de luz direta utilizando a impressora 3d *Moonray S*, o *software Sprintray Rayware 1.4.6* e resina *Moonray Gray*.

O protótipo do pavilhão foi fabricado nas dimensões de 8cm x 8cm x 8cm, conformado por 128 células organizadas em 8 filas e 16 colunas. O protótipo foi fabricado dividido em 4 partes de 32 células cada uma delas.

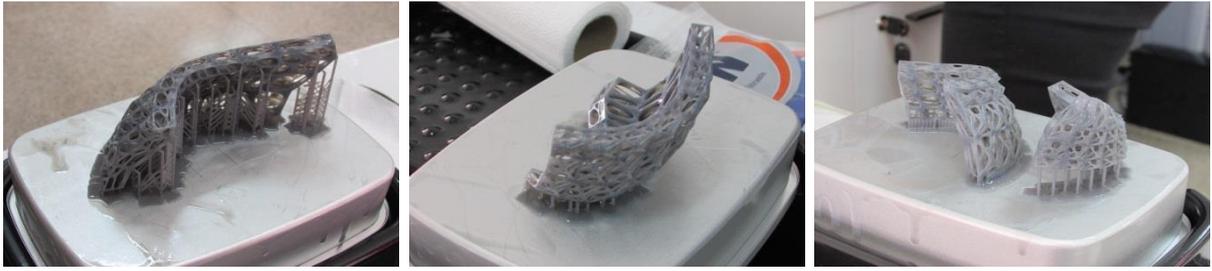


Figura 100: Impressão da do protótipo por partes. Fonte: Própria

Após da impressão, as partes foram limpas com álcool isopropílico para retirar os restos de resina e logo foram expostas à luz solar para secagem. Posteriormente, a montagem do protótipo foi realizada utilizando cianoacrilato.



Figura 101: Protótipo do pavilhão construído com a célula estrutural 5 e fabricado com resina pela tecnologia de impressão 3D de processamento por luz direta. Fonte: Própria

Na prototipagem do pavilhão modelado com a célula estrutural 5 foi observado que estruturas naturais podem ser fabricadas com impressão 3D utilizando a tecnologia de processamento por luz direta em resina.

#### 2.4.5.5 Exportação para BIM

A exportação da modelagem do pavilhão para a plataforma de modelagem da informação da construção (BIM) foi realizada usando a interoperabilidade entre os *softwares rhinoceros-grasshopper-archicad 23*.

Para a realização do processo de exportação do ambiente do plugin grasshopper para o ambiente do software archicad 23 é necessário previamente descarregar o add-Ons *Rhino - Grasshopper - ARCHICAD Toolset* do site da *Graphisoft* e fazer a instalação no computador.

O processo de exportação foi realizado em um processo de 3 fases. 1) Definição das curvas *nurbs* trisimendionais no ambiente do *software rhinoceros 5.0*, 2) Definição do código gráfico do pavilhão no ambiente do *plugin grasshopper* e a conexão do código gráfico com o ambiente do *software archicad 23*, 3) Definição da forma sólida do pavilhão no ambiente do *software archicad 23*.

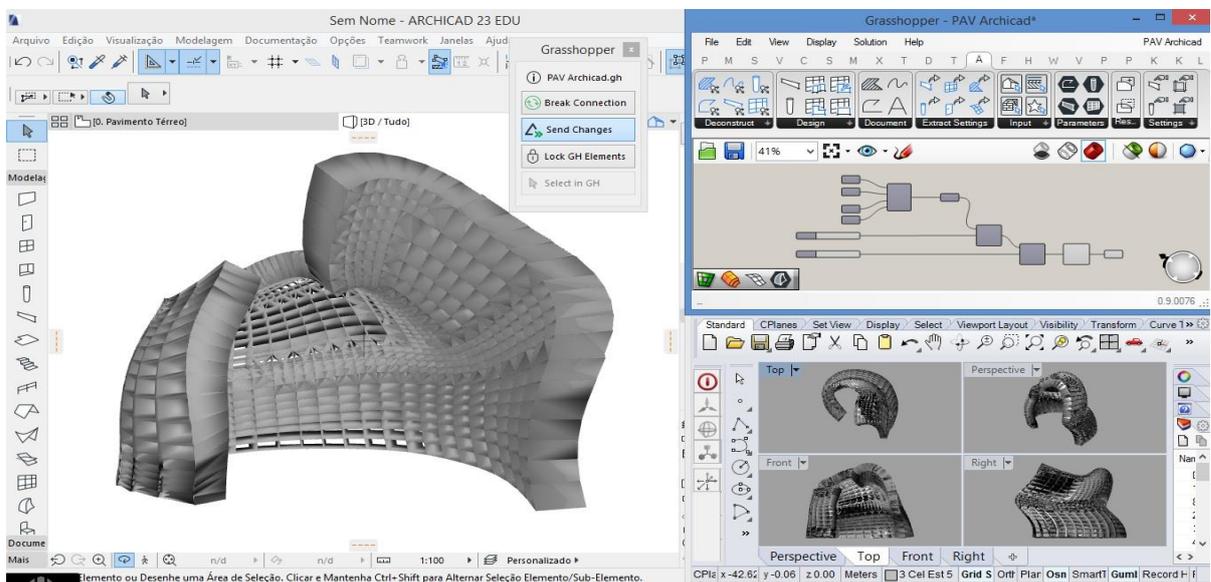


Figura 102: Exportação para BIM utilizando a conexão *rhinoceros-grasshopper-archicad 23*. Fonte: Própria

Na exportação do pavilhão do ambiente do *plugin grasshopper* para o ambiente do *software archicad 23* foi observado que as modelagens compostas por malhas demandam maior memória do computador.

No caso da modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5 que foi composta por malhas não foi possível realizar a exportação do ambiente do *plugin grasshopper* para o ambiente do

*software archicad 23*. Mas para termos de demonstração da exportação foi modelado um pavilhão composto por uma malha mais simples.

#### 2.4.6 Síntese

Nesta tese será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se a em parte a hipótese guia do experimento. As tecnologias para projeção digital como os softwares de modelagem 3D – *rhinoceros 5.0*, *grasshopper*, *ecotect 5.5*, *ladybug*, *autodesk flow design*, *archicad 23* – permitem projetar, simular e exportar para BIM o projeto de pavilhão de forma complexa inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital como o *software sprintray rayware 1.4.6* e a *impresora moonray S* permitem a produção do projeto de pavilhão pelo processamento de luz direta em resina. Na cidade de Goiânia (GO).

A partir das observações listadas na tabela a seguir:

Tabela 6: Observações no Protocolo do Experimento 4

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Definição da Forma	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper.</i></li> </ul>	O código gráfico estabelece um conjunto de regras para um determinado objetivo e, que nesse conjunto de regras podem ser estabelecidos parâmetros que podem ser modificados rapidamente segundo uma determinada necessidade. E, o código gráfico pode ser mais complexo em função da necessidade de controle dos parâmetros de entrada de informação.
2	Modelagem Computacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper.</i></li> </ul>	Quanto mais complexa foi a forma da célula em termos de quantidade de componentes mais, demorada foi a modelagem da superfície do pavilhão. E, quanto mais complexa a forma da célula, maior foi a demanda por memória e velocidade de processamento do computador.
3	Simulação Computacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Ecotect 5.5</i></li> <li>▪ <i>Software Ladybug;</i></li> <li>▪ <i>Software Autodesk Flow Design.</i></li> </ul>	A modelagem do pavilhão com a célula estrutural 5, composta por elementos que emulam fibras e sua forma pontuda na parte externa, permite menor pressão do vento no pavilhão e, também, permite uma boa passagem do vento através das células.
4	Prototipagem Rápida 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador</li> </ul>	Estruturas naturais podem ser fabricadas com impressão 3D

		<p>Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S.</i></li> <li>▪ <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6;</i></li> <li>▪ Resina Moonray Gray.</li> </ul>	<p>utilizando a tecnologia de processamento por luz direta em resina.</p>
5	Exportação para BIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Archicad 23.</i></li> </ul>	<p>As modelagens compostas por malhas demandam maior memória do computador.</p>

## 2.5 Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas

### 2.5.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais e da robótica têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de painel de células responsivas inspirado nas estruturas naturais.

### 2.5.2 Hipótese

As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem projetar um painel de células responsivas inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. As tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, *software sprintray rayware 1.4.6*, impressora *reprap anet a8*, impressora *moonray S*, - permitem a produção de um protótipo de painel de células responsivas pela fundição de filamento de ácido polilático - *PLA* - e processamento de luz direta em resina *moonray gray*. E, a tecnologia de prototipagem eletrônica – *arduino* – permite a produção de células responsivas e painéis de células responsivas. Na cidade de Goiânia (GO).

### 2.5.3 Objetivo Geral

Determinar as possibilidades e limitações da projeção digital e fabricação digital por adição de um protótipo de painel de células responsivas inspirado nas estruturas naturais encontradas

nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde, presentes na cidade de Brasília (DF).

#### *2.5.3.1 Objetivos específicos*

- Determinar as possibilidades e limitações das superfícies retráteis e o tipo de acionamento para as células responsivas;
- Determinar as possibilidades e limitações dos dispositivos responsivos por acionamento do comportamento do material e pelo acionamento eletromecânico;
- Determinar as possibilidades e limitações da fabricação de painéis de células responsivas em superfícies de duplas curvaturas.

#### 2.5.4 Processo Metodológico

Dessa maneira, o processo metodológico foi estruturado em 3 fases.

- Estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células;
- Prototipagem das células responsivas;
- Prototipagem de painéis com células responsivas.

## 2.5.5 Desenvolvimento do Experimento

### 2.5.5.1 Estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células

Os estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células foram realizados em 3 fases: 1) Estudos das superfícies dobráveis, 2) Estudo de dispositivo de acionamento mecânico unidirecional, 3) Estudo de dispositivo de acionamento mecânico giratório.

Onde, foi observado que o dispositivo da parte móvel da célula deve ter liberdade de giro para fazer a orientação e que a parte dos eixos de rotação devia ocupar o menor espaço possível e que o dispositivo devia ser autônomo.

#### 2.5.5.1.1 Estudo de superfícies dobráveis

A parte do dispositivo móvel da célula foi pensada para ser uma superfície que possa ser recolhida ou estendida. Em tal propósito foram estudadas 5 dobragens para o dispositivo. 2 tipos de dobragens uniformes e 3 tipos de variações na dobragem. As dobragens foram realizadas em papel de 75gr de dimensões de 21cm x 21cm.

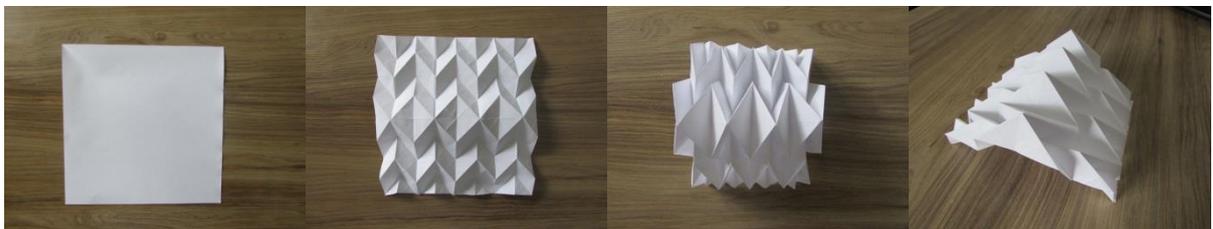
Nos tipos de dobragens uniformes foram experimentadas duas volumetrias: uma volumetria com característica de forma plana (dobragem 1) e uma volumetria com característica de forma esférica (dobragem 5). Nos tipos de variações na dobragem foram experimentadas duas volumetrias: uma volumetria com característica de forma plana (dobragem 3) e, uma volumetria com característica de prisma triangular (dobragem 3 e dobragem 4).



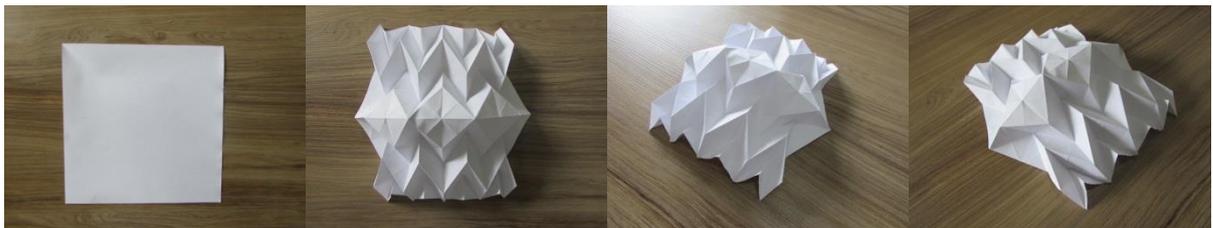
Dobragem 1



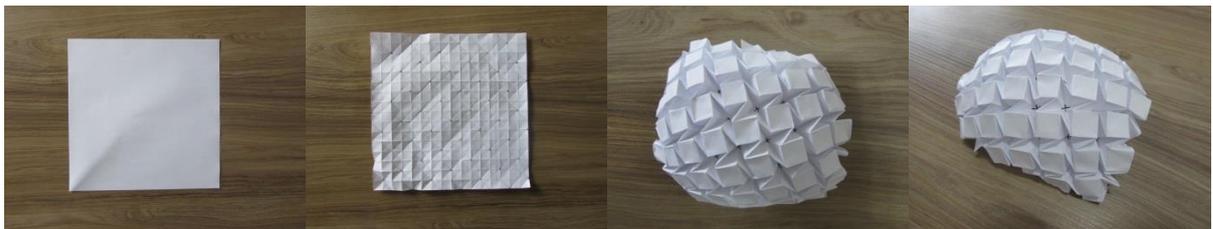
Dobragem 2



Dobragem 3



Dobragem 4



Dobragem 5

Figura 103: Estudo de superfícies dobráveis. Fonte: Própria

Assim, nestes estudos foi observado que as dobragens uniformes ou as dobragens com variações, com característica de forma plana (dobragem 1, dobragem 2) e, a dobragem com variações com característica de prisma triangular (dobragem 3), ocupam menos espaço quando recolhidas.

### 2.5.5.1.2 Estudo de dispositivo de acionamento mecânico unidirecional

Após da definição do tipo de dobragem da parte móvel da célula, o sistema de acionamento foi estudado. O acionamento foi proposto utilizando guias para o deslizamento unidirecional da superfície dobrável quando for recolhida ou estendida. O sistema de acionamento foi realizado utilizando papel de 75gr, papelão de onda simples, cola branca, linha, corda e palitos de churrasco.



Figura 104: Sistema do dispositivo de deslizamento unidirecional da parte móvel da célula. Fonte: Própria

Após da definição do sistema de acionamento, um dispositivo de impulso hidráulico foi implementado para deslizar a superfície dobrável. O dispositivo foi realizado utilizando seringas, mangueirinhas de silicone e água.

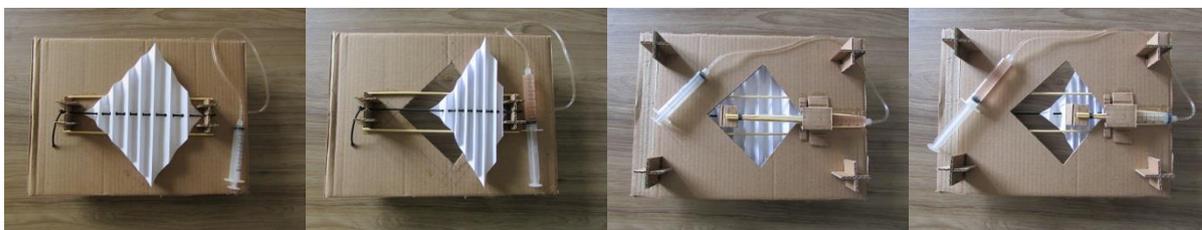


Figura 105: Sistema do dispositivo de impulso para o deslizamento unidirecional da parte móvel da célula. Fonte: Própria

Assim, neste estudo foi observado que o dispositivo tinha que ter a possibilidade de ser orientado segundo uma determinada necessidade do usuário.

### 2.5.5.1.3 Estudo de dispositivo de acionamento mecânico giratório

Após de ser observada a necessidade de que o dispositivo devia ter a possibilidade de ser orientado segundo um requerimento do usuário. Uma alternativa de dispositivo giratório foi

estudada. O dispositivo foi pensado para ter um eixo horizontal e um eixo vertical para permitir sua orientação. O dispositivo de orientação foi simulado rotacionando manualmente os eixos.



Figura 106: Alternativa de dispositivo giratório da parte móvel da célula. Fonte: Própria

Após da definição do sistema de eixos para permitir a orientação do dispositivo, dispositivos hidráulicos foram implementados para fazer a rotação dos eixos.



Figura 107: Sistema do dispositivo de impulso para a rotação dos eixos para realizar a orientação da parte móvel da célula. Fonte: Própria

Assim, neste estudo foi observado que o dispositivo devia ser composto de uma parte de superfície rígida que seja orientada pela rotação dos eixos, que a parte dos eixos ocupe o menor espaço possível e que o dispositivo seja autônomo.

#### *2.5.5.1.4 Observação nos estudos preliminares dos mecanismos responsivos para as células*

Assim, sendo que nos estudos das superfícies dobráveis foi observado que as dobragens, uniformes ou com variações, com característica de forma plana, ocupam menos espaço quando recolhidas; que no estudo do dispositivo de acionamento mecânico unidirecional da superfície dobrável foi observado que o dispositivo deve ter a possibilidade de ser orientado; que no estudo do dispositivo de acionamento mecânico giratório da parte móvel da célula foi observado que o dispositivo devia fazer a rotação dos eixos, ocupar o menor espaço possível e ser autônomo; em tais observações, nesta tese, será adotado que o dispositivo da parte móvel

da célula deve ter liberdade de giro para fazer a orientação, que a parte dos eixos deve ocupar o menor espaço possível e que o dispositivo deve ser autônomo.

Nessa observação, informação do campo da robótica e do campo do comportamento dos materiais foi necessária para realizar experimentações e desenvolver protótipos autônomos das células responsivas.

#### *2.5.5.2 Experimentações e prototipagem das células responsivas*

As experimentações e prototipagem das células responsivas foram realizadas em 2 fases: 1) Protótipos de células responsivas com robótica, 2) Protótipos de células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material.

Onde, foi observado que a célula responsiva autônoma pode ser produzida com tecnologia de fabricação digital e robótica ou com materiais que reajam a fatores ambientais. E, que o uso de matérias que reagem aos fatores ambientais na sua maioria não precisam de dispositivos complementares. e alimentação de energia. Mas a célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade se apresenta como a melhor alternativa para evitar a insolação direta devido a sua orientação automática.

##### *2.5.5.2.1 Protótipos de células responsivas com robótica*

A prototipagem das células responsivas com robótica foi realizada em 4 fases. 1) Protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro, 2) Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico, 3) Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura, 4) Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade.

Onde, foi confirmado que a orientação autônoma da célula permite ganho de energia para a bateria e também permite a autonomia no funcionamento do sistema.

### 2.5.5.2.1.1 Protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro

A célula responsiva com controle por potenciômetro foi fabricada com impressão 3D e prototipagem robótica.

As partes, fixa e móvel, da célula foram produzidas com a tecnologia de fabricação por filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 28 horas distribuídas em 24 horas na parte fixa e 4 horas na parte móvel. As dimensões da parte fixa foram de 12cm x 12cm x 12cm e, da parte móvel foram 11cm x 6cm x 0.5cm.

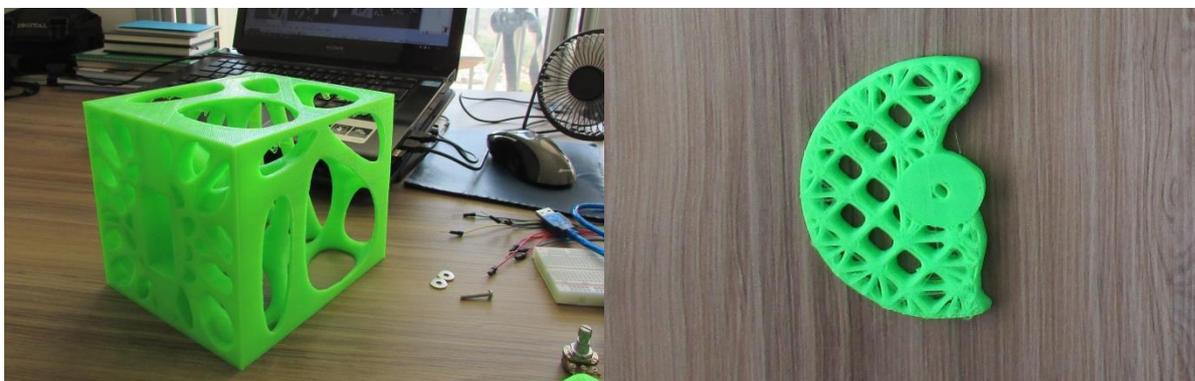


Figura 108: Célula responsiva com controle por potenciômetro – parte fixa e parte móvel. Fonte: Própria

A parte robótica da célula responsiva foi prototipada na plataforma *arduino*. O sistema robótico da célula foi composto por uma unidade de entrada de informação em forma manual (potenciômetro), uma unidade de processamento (placa *arduino*), uma unidade de execução (servo motor) e um programa para o processamento da informação de entrada e da informação de saída.



Potenciômetro 100k

Placa Arduino UNO

Servo Motor MG996R

Figura 109: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria

Assim, a seguir são apresentados: os componentes utilizados, o esquema para realizar a montagem da parte física do sistema robótico, o programa para ser gravado no microcontrolador da placa *arduino*, o processo de montagem da parte física da célula e o funcionamento da célula.

Tabela 7: Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro

Quant.	Componentes
1	Placa Arduino UNO
1	Cabo <i>USB</i>
1	<i>Protoboard</i>
1	Potenciômetro 100k
1	Servo Motor MG996R
10 ou +	<i>Jumpers</i>
1	Parafuso
1	Porca borboleta
2	Arruelas de metal
1	Arruela de borracha
1	Célula – parte fixa e parte móvel

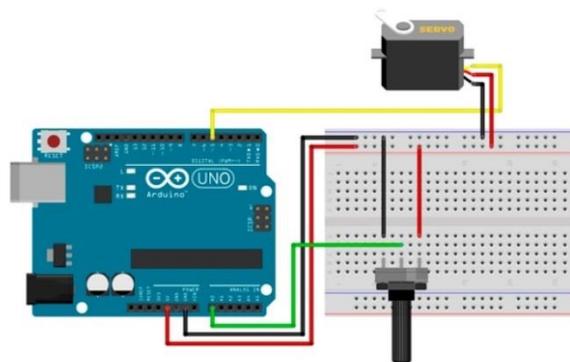


Figura 110: Esquema de montagem de potenciômetro e servo motor. Fonte: Como fazer as coisas

Tabela 8: Programa do protótipo de célula responsiva com controle por potenciômetro

```
/*
Programa para Célula Responsiva com Potenciômetro
```

Fonte: Projeto Arduino controlando um servo motor com potenciômetro  
Por Jota

```
-----  
--=<| www.ComoFazerAsCoisas.com.br |>=--  
-----  
*/  
  
//incluindo biblioteca para controle do servomotor  
#include "Servo.h"  
  
//Criando um objeto da classe Servo  
Servo servoMotorObj;  
  
//pino analógico onde o potenciômetro está conectado  
int const potenciometroPin = 0;  
  
//pino digital associado ao controle do servomotor  
int const servoMotorPin = 3;  
  
//variável usada para armazenar o valor lido no potenciômetro  
int valPotenciometro;  
  
void setup() {  
  //associando o pino digital ao objeto da classe Servo  
  servoMotorObj.attach(servoMotorPin);  
}  
  
void loop()  
{  
  //lendo o valor do potenciômetro (intervalo entre 0 e 1023)  
  valPotenciometro = analogRead(potenciometroPin);  
  
  //mapeando o valor para a escala do servo (entre 0 e 180)  
  valPotenciometro = map(valPotenciometro, 0, 1023, 0, 180);  
  
  //definindo o valor/posição do servomotor  
  servoMotorObj.write(valPotenciometro);  
  delay(15);  
}
```

O processo da montagem da célula responsiva foi realizado em 4 fases: 1) Montagem da célula, 2) Montagem da parte robótica, 3) Gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* e, 4) Reinício da placa *arduino*.

A montagem da célula consistiu na fixação do servo motor na parte fixa da célula e logo a fixação da parte móvel da célula no servo motor.

A montagem da parte robótica da célula consistiu na conexão dos componentes na placa *protoboard* e logo a conexão com a placa *arduino* e o servo motor, seguindo o esquema de montagem.

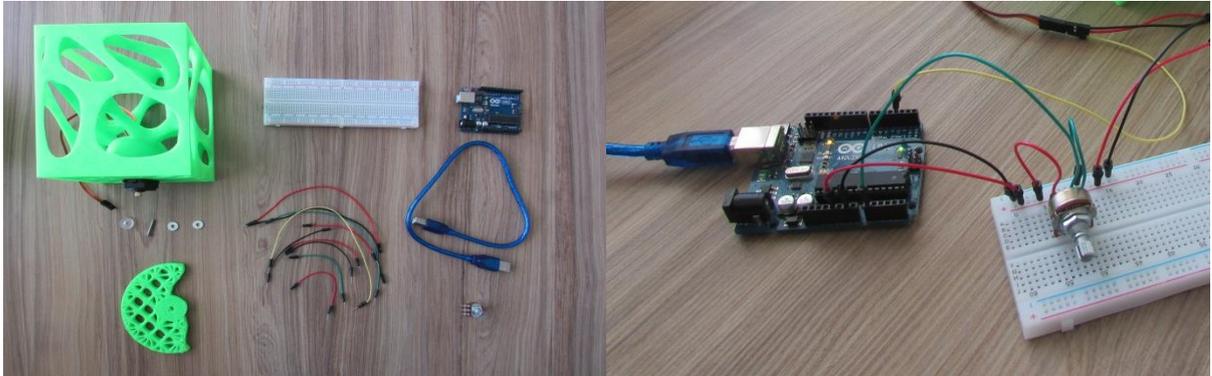


Figura 111: Montagem da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria

A gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* que consistiu no carregamento do programa no microcontrolador da placa *arduino* por meio da conexão do cabo *USB* no computador e pelo software de ambiente de desenvolvimento integrado ou *software arduino IDE*.

O reinício da placa *arduino* consistiu em fazer o reset na placa.

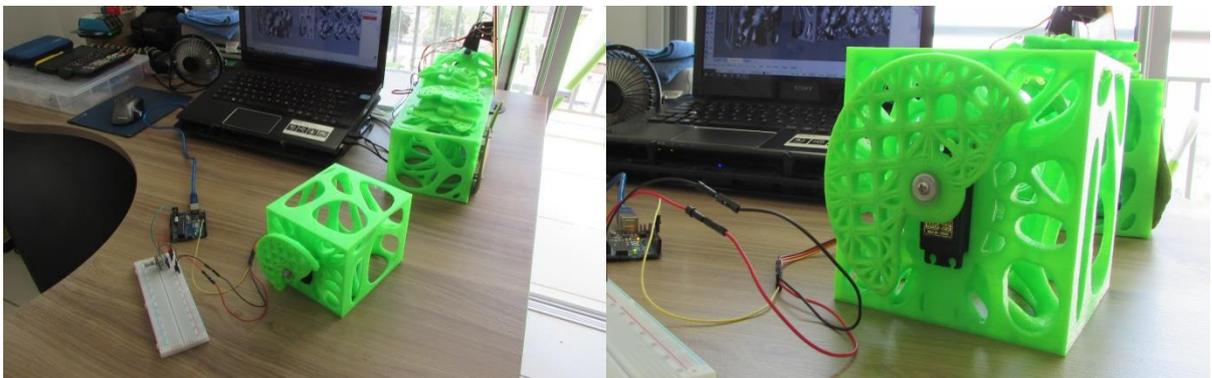


Figura 112: Gravação do programa na placa *arduino* da célula responsiva com controle por potenciômetro. Fonte: Própria

Assim, após da montagem da célula e gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino*, o protótipo da célula ficou pronto para ser testado o funcionamento.

O protótipo foi colocado a funcionar mantendo a conexão com o computador pelo cabo *USB* para o fornecimento de energia. O teste do funcionamento do protótipo consistiu na manipulação manual do potenciômetro para determinar o grau de giro da parte móvel da célula.

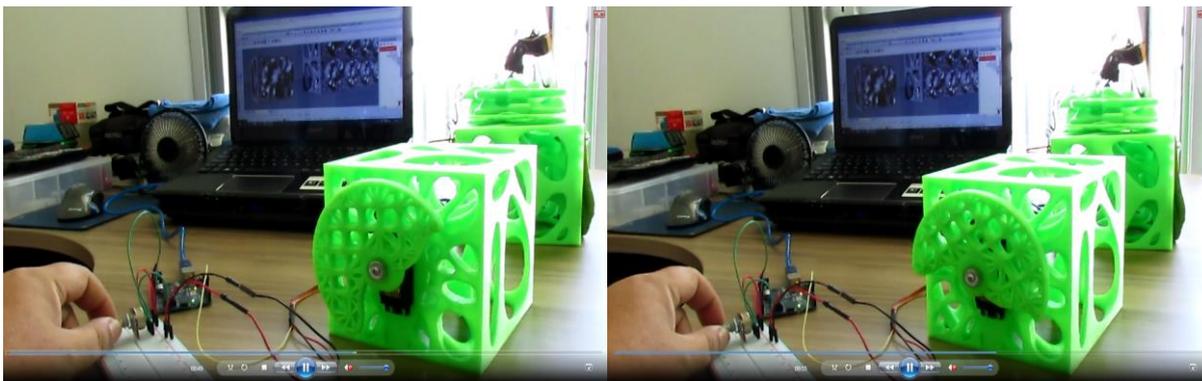


Figura 113: Funcionamento da célula responsiva com potenciômetro. Fonte: Própria

Neste protótipo foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um estímulo externo.

Assim, experimentações com sensores foram realizadas para acionar automaticamente a célula. Os sensores que foram experimentados foram: o sensor de distância ultrassônico, o sensor de temperatura e o sensor de luminosidade.

#### *2.5.5.2.1.2 Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico*

A célula responsiva com controle por sensor ultrassônico foi fabricada com impressão 3D e prototipagem robótica.

As partes, fixa e móvel, da célula foram produzidas com a tecnologia de fabricação por filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 29 horas distribuídas em 24 horas na parte fixa e 5 horas na parte móvel. As dimensões da parte fixa foram de 12cm x 12cm x 12cm e, da parte móvel foram 11cm x 6cm x 1cm.



Figura 114: Célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico – parte fixa e parte móvel.  
Fonte: Própria

A parte robótica da célula responsiva foi prototipada na plataforma *arduino*. O sistema robótico da célula foi composto por uma unidade de entrada de informação em sinais elétricos (sensores de distancia ultrassônicos), uma unidade de processamento (placa *arduino*), uma unidade de execução (servo motor) e um programa para o processamento da informação de entrada e a informação de saída.



Sensores Ultrassônicos HC-SR04

Placa *Arduino* UNO

Servo Motor MG996R

Figura 115: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria

Assim, a seguir são apresentados: a lista dos componentes utilizados, o esquema para realizar a montagem da parte física do sistema robótico, o programa para ser gravado no microcontrolador da placa *arduino*, o processo de montagem da parte física da célula e o funcionamento da célula.

Tabela 9: Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico

Quant.	Componentes
1	Placa <i>Arduino</i> UNO
1	Cabo <i>USB</i>
1	<i>Protoboard</i>

2	Sensores Ultrassônicos HC-SR04
1	Servo Motor MG996R
10 ou +	<i>Jumpers</i>
1	Parafuso
1	Porca borboleta
2	Arruelas de metal
1	Arruela de borracha
1	Célula – parte fixa e parte móvel

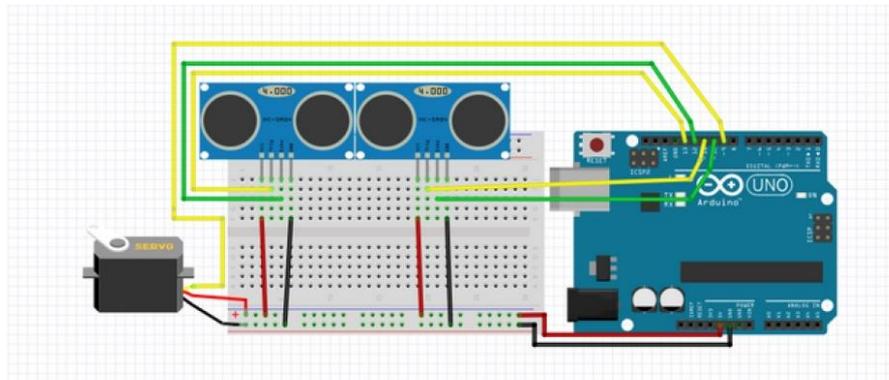


Figura 116: Esquema de montagem de sensores de distância ultrassônicos e servo motor. Fonte: *Steemit*

Tabela 10: Programa do Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico

```

/*
Programa para Célula Responsiva com Sensores Ultrassônicos

Fonte: Arduino 101: Using 2 ultrasonic sensors and servo motor
*/
Programa para Célula Responsiva com Sensores Ultrassônicos

Fonte: Arduino 101: Using 2 ultrasonic sensors and servo motor
-----
--=<| https://steemit.com/ |>=--
-----
*/

#include <Servo.h>
Servo myservo; //creates servo object
const int echopin1 = 10; //sets echopin1 @pin 10
const int trigpin1 = 11; //sets trigpin1 @pin 11
const int echopin2 = 12; //sets echopin2 @pin 12
const int trigpin2 = 13; //sets trigpin2 @pin 13
const int servo = 9; //sets servo @pin 9

```

```

long Rightduration, Leftduration, Rightinch, Leftinch; //establishes
int threshold = 10; //Sets the sensor threshold at 10 inches
int angle = 80; //Sets the Initial angle
void setup()
{
  myservo.attach(9); //attaches the servo on pin 9
}
void loop()
{
  pinMode(trigpin1, OUTPUT); //trigpin1 is set as output
  digitalWrite(trigpin1, LOW); //sets the trigpin1 to give low pulse
  delayMicroseconds(3); //duration is 3 microseconds
  digitalWrite(trigpin1, HIGH); //sets the trigpin1 to give high pu
  delayMicroseconds(5); //duration is 5 microseconds
  digitalWrite(trigpin1, LOW);
  Rightduration = pulseIn(echopin1, HIGH); //reads high pulse
  pinMode(trigpin2, OUTPUT); //trigpin2 is set as output
  digitalWrite(trigpin2, LOW); //sets the trigpin2 to give low pulse
  delayMicroseconds(3); //duration is 3 microseconds
  digitalWrite(trigpin2, HIGH); //sets the trigpin2 to give high pu
  delayMicroseconds(5); //duration is 5 microseconds
  digitalWrite(trigpin2, LOW);
  Leftduration = pulseIn(echopin2, HIGH); //reads high pulse
  //this will convert the elapsed time into the distance
  Rightinch = microsecondsToInches(Rightduration);
  Leftinch = microsecondsToInches(Leftduration);
  follow(); //follows the movement
}
long microsecondsToInches(long microseconds)
{
  // The speed of sound is 340 m/s or 73.746 microseconds per inch.
  // The ping travels out and back, so to find the distance of the
  // object we take half of the distance traveled.
  return microseconds / 74 / 2;
}
void follow() //conditions for the follow command
{
  if (Leftinch <= threshold || Rightinch <= threshold)
  {
    if (Leftinch + 2 < Rightinch)
    {
      angle = angle - 2;
    }
    if (Rightinch + 2 < Leftinch)
    {
      angle = angle + 2;
    }
  }
  if (angle > 160)
  {
    angle = 160;
  }
  if (angle < 0)
  {
    angle = 0;
  }
}

```

```
myservo.write(angle);  
}
```

O processo da montagem da célula responsiva foi realizado em 4 fases: 1) Montagem da célula, 2) Montagem da parte robótica, 3) Gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* e, 4) Reinício da placa *arduino*.

A montagem da célula consistiu na fixação do servo motor na parte fixa da célula e logo a fixação da parte móvel da célula no servo motor. A montagem da parte robótica da célula consistiu na conexão dos componentes na placa *protoboard* e logo a conexão com a placa *arduino*, com os sensores e como servo motor, seguindo o esquema de montagem.

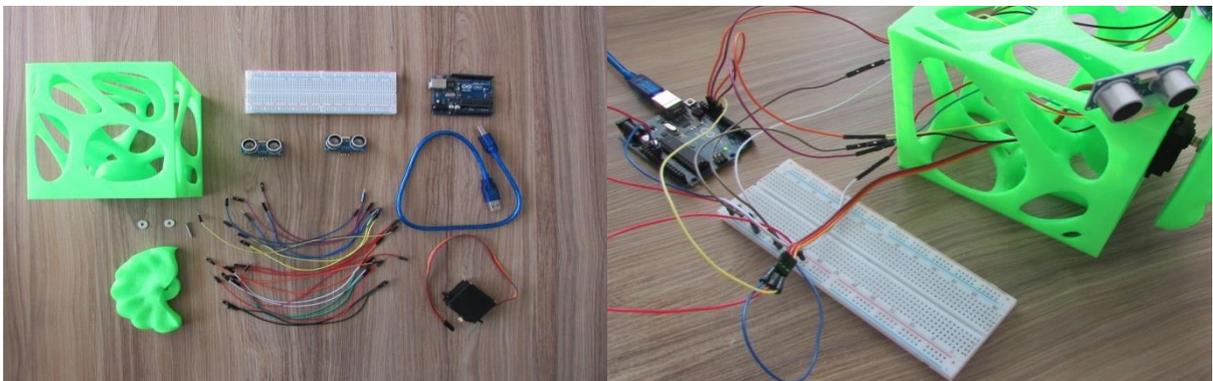


Figura 117: Montagem da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria

A gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* que consistiu no carregamento do programa no microcontrolador da placa *arduino* por meio da conexão do cabo *USB* no computador e pelo software de ambiente de desenvolvimento integrado ou *software arduino IDE*.

O reinício da placa *arduino* consistiu em fazer o *reset* na placa.

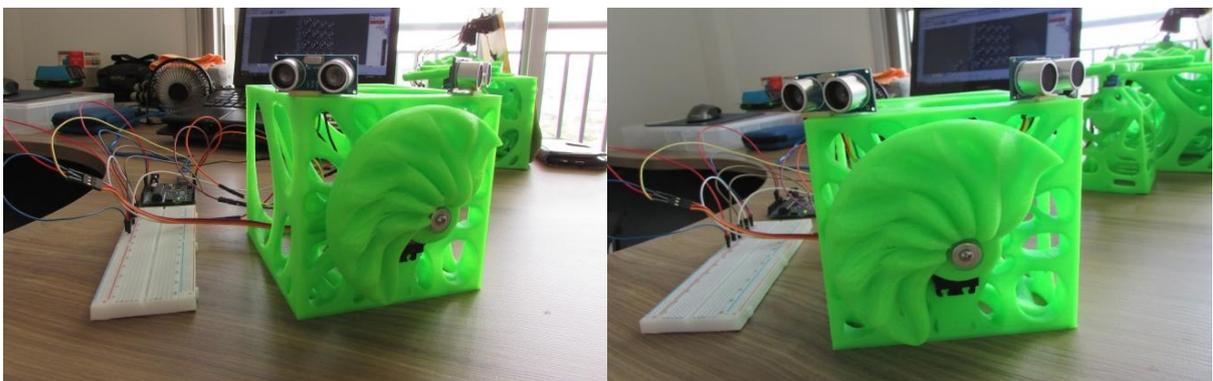


Figura 118: Gravação do programa na placa *arduino* da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria

Assim, após da montagem da célula e gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino*, o protótipo da célula ficou pronto para ser testado o funcionamento.

O protótipo foi colocado a funcionar mantendo a conexão com o computador pelo cabo *USB* para o fornecimento de energia. O teste do funcionamento do protótipo consistiu na aproximação de um obstáculo na frente do sensor na distância e ângulo do sinal sonoro emitido para determinar o giro da parte móvel da célula.

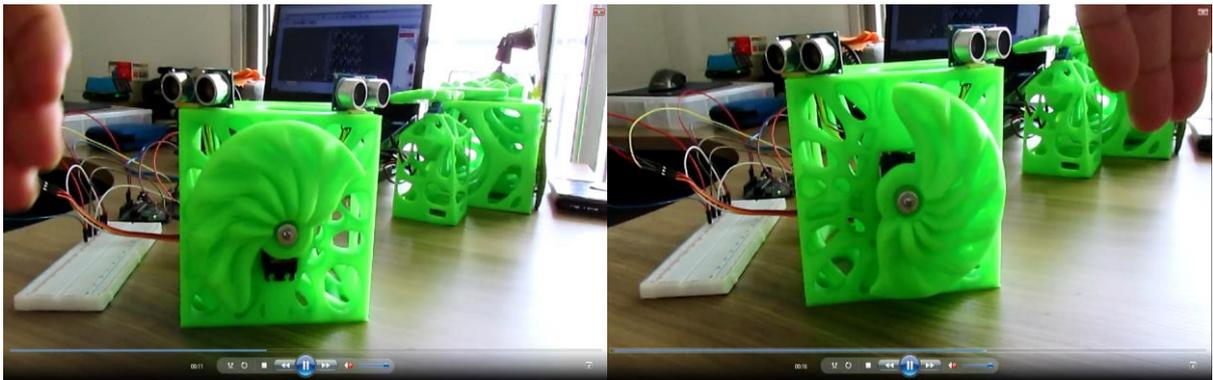


Figura 119: Funcionamento da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria

Assim, o funcionamento do protótipo da célula responsiva com controle por sensor de distância ultrassônico foi confirmado e, ao mesmo tempo, também foi confirmado que o ângulo de giro da parte móvel da célula depende do ângulo pré-estabelecido.

Neste protótipo foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um fator ambiental externo.

#### *2.5.5.2.1.3 Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura*

A célula responsiva com controle por sensor de temperatura foi fabricada com impressão 3D e prototipagem robótica.

As partes, fixa e móvel, da célula foram produzidas com a tecnologia de fabricação por filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 29 horas distribuídas em 24 horas na parte fixa e 5 horas na parte móvel. As dimensões da parte fixa foram de 12cm x 12cm x 12cm e, da parte móvel foram 11cm x 6cm x 1cm.



Figura 120: Célula responsiva com controle por sensor de temperatura – parte fixa e parte móvel. Fonte: Própria

A parte robótica da célula responsiva foi prototipada na plataforma *arduino*. O sistema robótico da célula foi composto por uma unidade de entrada de informação em sinais elétricos (sensor de temperatura), uma unidade de processamento (placa *arduino*), uma unidade de execução (servo motor) e um programa para o processamento da informação de entrada e a informação de saída.



Sensor de Temperatura LM35DZ



Placa *Arduino* UNO



Servo Motor MG996R

Figura 121: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensores de distância ultrassônicos. Fonte: Própria

Assim, a seguir são apresentados: a lista dos componentes utilizados, o esquema para realizar a montagem da parte física do sistema robótico, o programa para ser gravado no microcontrolador da placa *arduino*, o processo de montagem da parte física da célula e o funcionamento da célula.

Tabela 11: Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura

Quant.	Componentes
1	Placa <i>Arduino</i> UNO
1	Cabo <i>USB</i>
1	<i>Protoboard</i>

1	Sensor de Temperatura LM35DZ
1	Servo Motor MG996R
1	Resistor 150Ω
1	LED
10 ou +	<i>Jumpers</i>
1	Parafuso
1	Porca borboleta
2	Arruelas de metal
1	Arruela de borracha
1	Célula – parte fixa e parte móvel

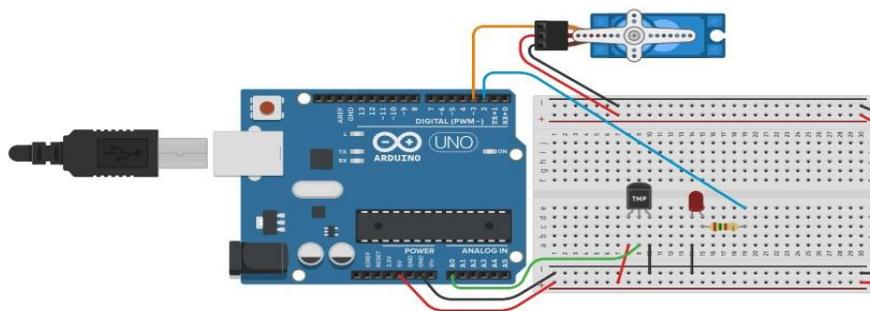


Figura 122: Esquema de montagem de sensor de temperatura e servo motor. Fonte: *Instructables Circuits*

Tabela 12: Programa do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de temperatura

```

/*
Programa para Célula Responsiva com Sensor de Temperatura

Fonte: Temperatures and Sevos
-----
--=<| https://www.instructables.com/|>=--
-----
*/

#include <Servo.h>

#define temperature A0
#define ledIndicator 2

Servo mainServo;
int position = 0;

```

```

int previousPosition;

void setup() {

  pinMode(temperature, INPUT);
  pinMode(ledIndicator, OUTPUT);
  mainServo.attach(3);

  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

  // Temperature analysis
  int tempReading = analogRead(temperature);
  // If using 5v input
  float voltage = tempReading * 5.0;

  // Divided by 1024
  voltage /= 1024.0;
  //Converting from 10mv per degree
  float tempC = (voltage - 0.5) * 100;

  // This maps temperature to degrees open for the flap
  int position = map(tempC, 0, 50, 0, 180);
  Serial.println(position);
  if(previousPosition != position){
    mainServo.write(position);
    digitalWrite(ledIndicator, HIGH);
    delay(1000);
  }

  digitalWrite(ledIndicator, LOW);
  previousPosition = position;
}

```

O processo da montagem da célula responsiva foi realizado em 4 fases: 1) Montagem da célula, 2) Montagem da parte robótica, 3) Gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* e, 4) Reinício da placa *arduino*.

A montagem da célula consistiu na fixação do servo motor na parte fixa da célula e logo a fixação da parte móvel da célula no servo motor. A montagem da parte robótica da célula consistiu na conexão dos componentes na placa *protoboard* e logo a conexão com a placa *arduino*, com o sensor e como servo motor, seguindo o esquema de montagem.

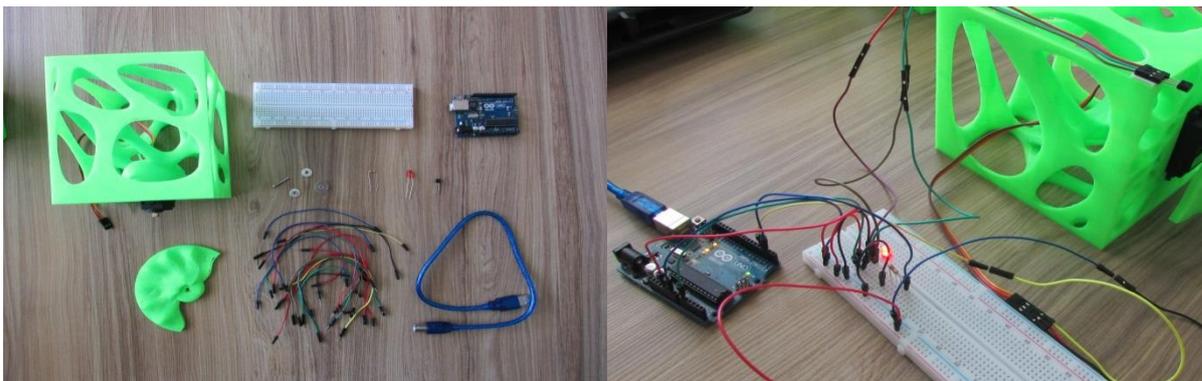


Figura 123: Montagem da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria

A gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino* que consistiu no carregamento do programa no microcontrolador da placa *arduino* por meio da conexão do cabo *USB* no computador e pelo software de ambiente de desenvolvimento integrado ou *software arduino IDE*.

O reinício da placa *arduino* consistiu em fazer o *reset* na placa. Ver figura logo abaixo.

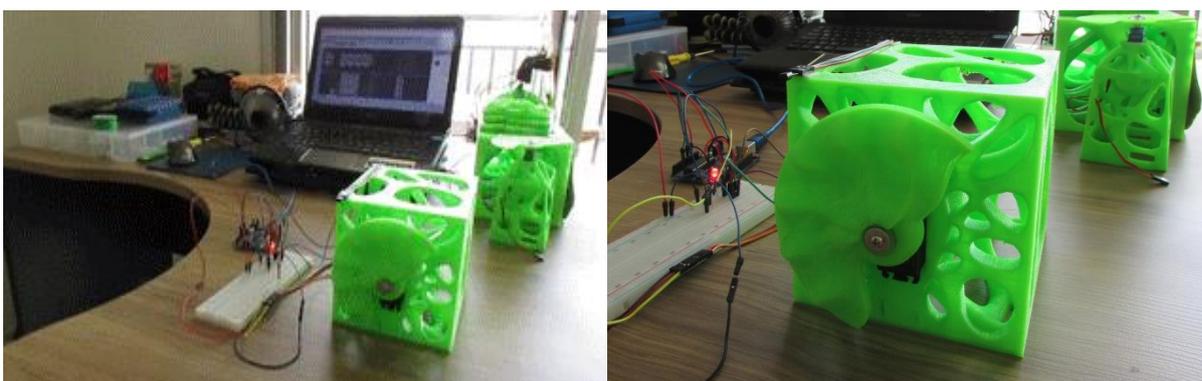


Figura 124: Gravação do programa na placa *arduino* da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria

Assim, após da montagem da célula e gravação do programa no microcontrolador da placa *arduino*, o protótipo da célula ficou pronto para ser testado o funcionamento.

O protótipo foi colocado a funcionar mantendo a conexão com o computador pelo cabo *USB* para o fornecimento de energia. O teste do funcionamento do protótipo foi realizado com um toque no sensor para observar o giro da parte móvel da célula. O teste foi realizando um toque no sensor devido a que a mudança de temperatura no sensor foi mais rápida que quando se fez o teste com a temperatura ambiente.

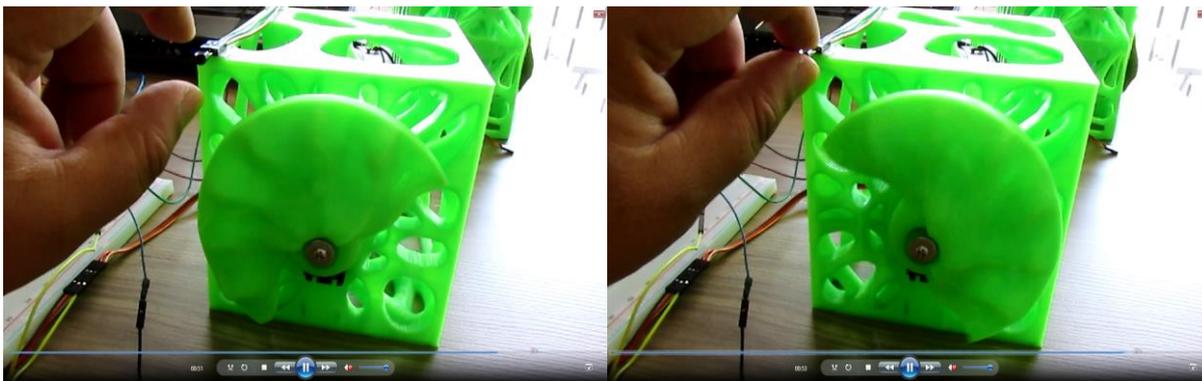


Figura 125: Funcionamento da célula responsiva com controle por sensor de temperatura. Fonte: Própria

Assim, o funcionamento do protótipo da célula responsiva com controle por sensor de temperatura foi confirmado e, ao mesmo tempo, também foi confirmado que o ângulo de giro da parte móvel da célula depende da variação da temperatura. Quanto maior a temperatura maior será o ângulo de giro dentro do intervalo estabelecido.

Neste protótipo foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um fator ambiental externo e produzir energia para seu próprio funcionamento.

#### *2.5.5.2.1.4 Protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade*

A célula responsiva com controle por sensor de luminosidade foi fabricada com impressão 3D e prototipagem robótica.

A parte fixa da célula foi produzida com a tecnologia de fabricação por filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 36 horas. As dimensões da célula foram de 12cm x 12cm x 12cm.

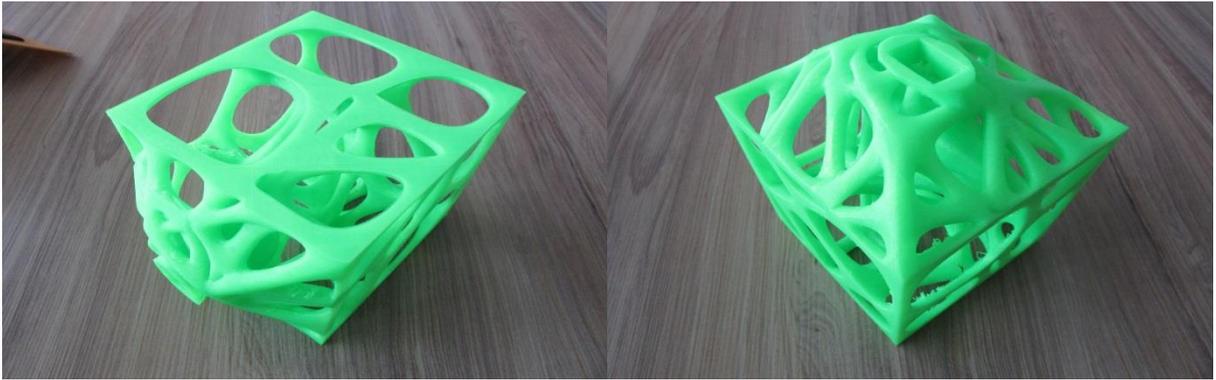


Figura 126: Célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria

A parte robótica da célula responsiva foi prototipada na plataforma *arduino*. O sistema robótico da célula foi composto por uma unidade de entrada de informação em sinais elétricos (sensor de luminosidade), uma unidade de processamento (placa *arduino*), uma unidade de execução (servo motor) e um programa para o processamento da informação de entrada e a informação de saída.



Sensor de Luminosidade



Placa *Arduino* UNO



Servo Motor MG996R

Figura 127: Unidades do sistema robótico da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria

Assim, a seguir são apresentados: a lista dos componentes utilizados, o esquema para realizar a montagem da parte física do sistema robótico, o programa para ser gravado no microcontrolador da placa *arduino*, o processo de montagem da parte física da célula e o funcionamento da célula.

Tabela 13: Componentes do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade

Quant.	Componentes
1	Placa <i>Arduino</i> UNO
1	Controlador AtMega328P - configuração Standalone
1	Painel solar 12V 3W

1	Placa fenolite 40 cm
1	Suporte metálico pitch/yaw para servo 9G
2	Servo-motores TowerPro 9G
4	LDRs
1	Bateria recarregável 9V 240mAh
8	Resistores de 1 $\Omega$
3	Resistores de 2,2 K $\Omega$
1	Resistor de 10 K $\Omega$
1	Cristal oscilador 16 MHz
3	Transistores 2n2222A
1	Botão tipo reset/push button
1	Regulador de tensão 7805
1	Capacitor eletrolítico de 220 $\mu$ F
3	Capacitores de 100 nF
2	Capacitores de 22nF
1	Diodo 1N4007
1	LED verde
1	Clipe de bateria 9V
vários	<i>Jumpers</i>
1	Protoboard
1	Célula – parte fixa

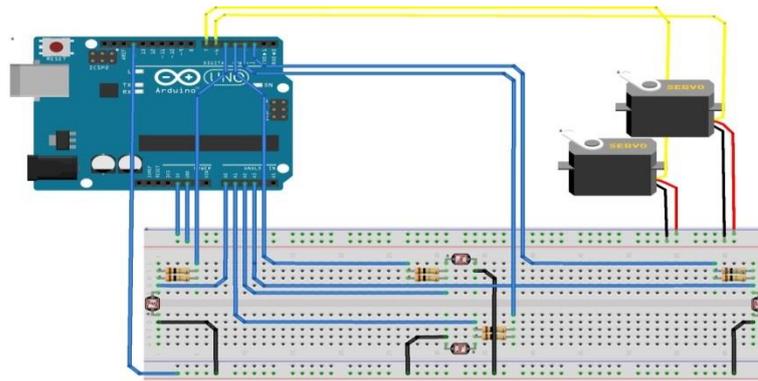


Figura 128: Esquema de montagem de sensores de luminosidade e servos motores. Fonte: Própria

Tabela 14: Programa do protótipo de célula responsiva com controle por sensor de luminosidade

```

//Programa para Célula Responsiva com Sensor de Luz
//Programação: Alexander Paschoaletto */

#include <Servo.h>
//#include "funcoes_QuasePronto.ino"

byte intensidadeEsq = A2;
byte intensidadeDir = A0;
byte intensidadeUp = A1;
byte intensidadeDwn = A3;

int i;
int val[7];
int ajuste;

int esquerdo; //na verdade é o direito
int direito; //na verdade é o esquerdo
int cima;
int baixo;

int diff;
int difLateral;
int difVertical;
int fatorDeCorrecao = 5;

Servo servoVert;
Servo servoLat;

int energiaEsq = 5;
int energiaDir = 6;
int energiaUp = 7;
int energiaDwn = 8;

void setup(){
  inicializa();
}

void loop(){

```



```

void trackingLat(){ //sumariza as capturas de ambos os sensores laterais,
  esquerdo = captura(intensidadeEsq);
  direito = captura(intensidadeDir);

  difLateral = verificaDifs(esquerdo, direito); //armazenando também a diferença de valores entre os dois
}

////////////////////
/////

void trackingVert(){ //mesma coisa que a função acima,
  cima = captura(intensidadeUp); //mas com os LDRs verticais
  baixo = captura(intensidadeDwn);

  difVertical = verificaDifs(cima, (baixo - 3)); //calibragem
}

////////////////////
/////

int verificaDifs(int sensor1, int sensor2){ //função que armazena o módulo das diferenças de iluminação
  entre os sensores LDR
  diff = (sensor1 - sensor2);
  diff = abs(diff);
  return diff;
}

////////////////////
/////

void ajustaLat(){ //função que corrige o posicionamento lateral do painel solar.
  while(difLateral > fatorDeCorrecao){ //enquanto os sensores ainda estiverem com valores
  diferentes,
    //verificaFimDeCurso(); //verifica se o sensor está impedido de seguir a luz pelo fim de
    curso do servo
    Serial.println(servoLat.read());
    if(servoVert.read() > 75){ //a partir daí, verifica se o painel está inclinado para + ou - da
    metade.
      if(esquerdo > direito){ //se inclinação + e esquerdo > direito,
        servoLat.write(servoLat.read() + 2); //gira para um lado, 2 graus de cada vez, 15 graus por passo
        delay(15);
      }
      else{ //caso contrário, comportamento espelhado
        servoLat.write(servoLat.read() - 2);
        delay(15);
      }
    }
    else{ //se a inclinação for -, todo o comportamento do servoLat tem que ser
    espelhado em relação ao +
      if(esquerdo > direito){

```

```

servoLat.write(servoLat.read() - 2);
delay(15);
}
else{
servoLat.write(servoLat.read() + 2);
delay(15);
}
}
trackingLat();          //faz uma nova captura para ver se precisa continuar mudando
}
}

////////////////////////////////////
//

void ajustaVert(){          //esta função a princípio não precisa ser alterada, mas como ainda
nãotestei com os sensores verticais,
while(difVertical >= 4){   //pode ser que precise de mudanças. O ajuste vertical não depende se o
valor do sensorLat é + ou -,
if(cima > baixo){         //por isso esta função é necessariamente bem mais enxuta
servoVert.write(servoVert.read() + 2);
delay(15);
}
else{
servoVert.write(servoVert.read() - 2);
delay(15);
}
trackingVert();
}
}

////////////////////////////////////
//

void verificaFimDeCurso(){          //para proceder, a função precisa saber em qual ângulo o
servoLat chegou ao fim de curso
if(servoLat.read()==180){          //se foi 180°,
delay(1000);                        //espera 2s pra ver se o sensor ainda precisa exceder os 180°
trackingLat();                      //ainda precisa?
if(esquerdo < (direito + fatorDeCorrecao)){ //SIM!
servoLat.write(80);                //então volta à posição intermediária
delay(1000);                        //espera meio segundo
if(servoVert.read() > 85){         //e espelha o servoGiro
servoVert.write(65);
}
else{
servoVert.write(105);
}
}
else{
servoLat.write(80);                //então volta à posição intermediária
delay(1000);                        //espera meio segundo
if(servoVert.read() < 85){         //e espelha o servoGiro

```



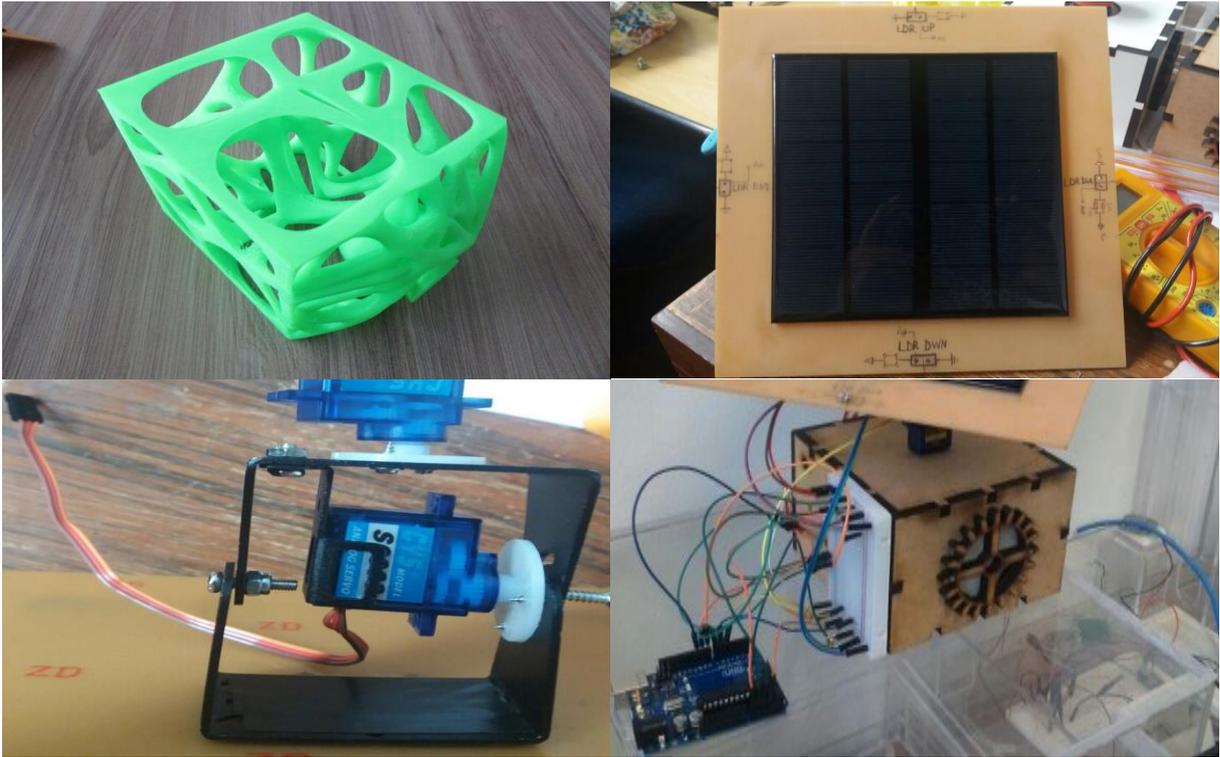


Figura 129: Protótipo e gravação do programa da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade.  
Fonte: Própria

A montagem do carregador de energia consistiu na conexão de componentes na placa *protoboard* para carregar uma bateria com a energia gerada na placa solar e logo alimentar o sistema robótico da célula a partir da energia armazenada na bateria.

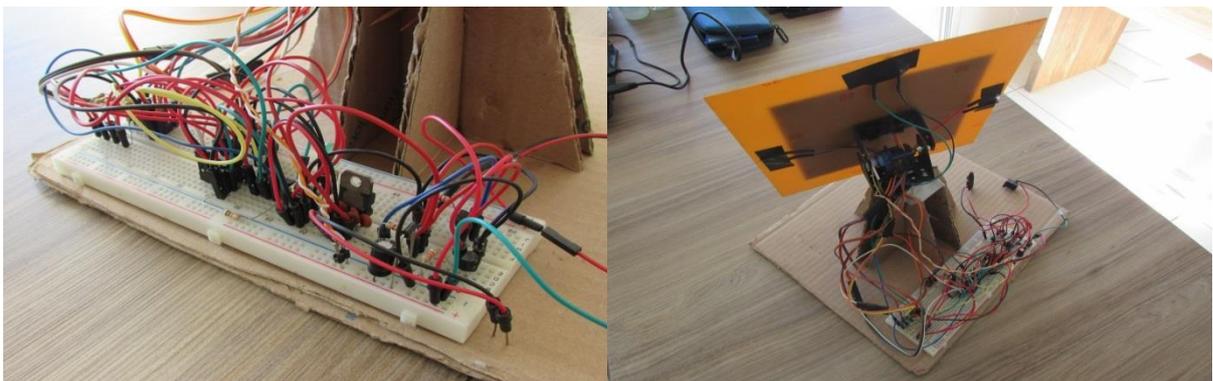


Figura 130: Protótipo da placa com carregador de energia para a célula responsiva com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria

A produção da placa mãe da célula e reinício da placa consistiu na fabricação de uma placa com o circuito integrado do sistema robótico, a conexão dos componentes e o *reset* do sistema.

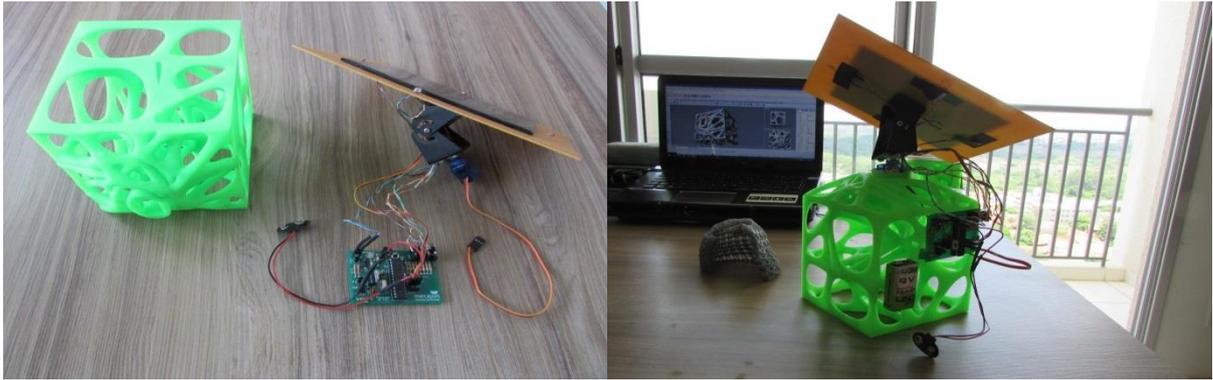


Figura 131: Protótipo da célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade. Fonte: Própria  
Assim, após a produção da placa mãe da célula e a conexão dos componentes, o protótipo da célula ficou pronto para ser testado.

O protótipo foi colocado a funcionar mantendo sem conexão com o computador pelo cabo *USB* para o fornecimento de energia. O teste do funcionamento do protótipo foi realizado verificando que a bateria estava carregada e reiniciando o sistema. No teste foi observado que o painel móvel da célula procurou a área com maior luminosidade no ambiente. Na figura abaixo pode ser observado que a célula começou o funcionamento com a orientação para a uma área com baixa luminosidade do ambiente e procurou uma área com alta luminosidade.

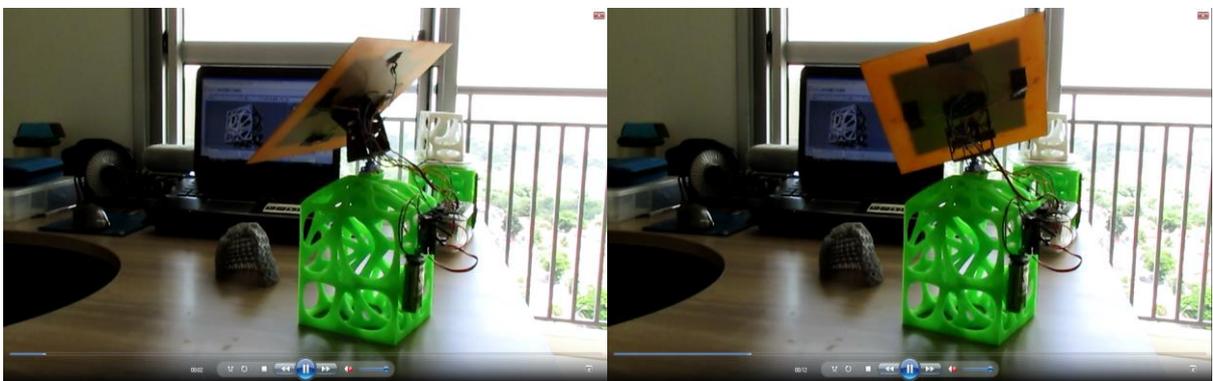


Figura 132: Funcionamento da célula responsiva autônoma com controle por sensor de luminosidade. Fonte: Própria

Assim, o funcionamento do protótipo da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade foi confirmado e, ao mesmo tempo, também foi confirmado que a orientação autônoma da célula permite ganho de energia para a bateria e também permite a autonomia no funcionamento do sistema.

Neste protótipo foi observado que a célula também podia ser desenvolvida aproveitando o comportamento dos materiais.

#### *2.5.5.2.1.5 Observação nosp protótipos de células responsivas com robótica*

Assim, sendo que:

No protótipo da célula responsiva com controle por potenciômetro foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um estímulo externo.

No protótipo da célula responsiva com controle por sensores ultrassônicos foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um fator ambiental externo.

No protótipo da célula responsiva com controle por sensor de temperatura foi observado que a parte móvel da célula devia reagir automaticamente a um fator ambiental externo e produzir energia para seu próprio funcionamento.

No protótipo da célula responsiva com controle por sensor de luminosidade foi observado que a célula também podia ser desenvolvida aproveitando o comportamento dos materiais.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

A célula responsiva autônoma com acionamento pelo comportamento do material pode ser produzida com fabricação digital e robótica. E, que a célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade se apresenta como a melhor alternativa para evitar a insolação direta devido a sua orientação automática.

#### *2.5.5.2.2 Protótipos de células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material*

A prototipagem das células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material foram realizadas em 3 fases: 1) Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático, 2) Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial dos materiais, 3) Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico.

Onde, foi observado que a célula responsiva autônoma com acionamento pelo comportamento do material pode ser produzida com fabricação digital e com materiais que reajam a fatores ambientais.

#### *2.5.5.2.2.1 Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático*

A célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático foi fabricada com impressão 3D, material de escritório e material de construção.

A célula foi fabricada com filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 12 horas. As dimensões da célula foram de 12cm x 12cm x 12cm. As lâminas colocadas entre as espaços livres da célula foram fabricadas com acetato transparente de 20 micras de espessura e logo cobertas com tinta fotocromática.

O teste do funcionamento da célula foi realizado com a preparação de um painel composto por 4 células e exposto à sombra e à luz do sol. No teste foi observado que quando a luz do sol atingiu a lâmina coberta com a tinta fotocromática, a lâmina mudou de cor e não permitiu a passagem da luz do sol. Também foi observado que a célula permitiu a passagem de correntes de vento.

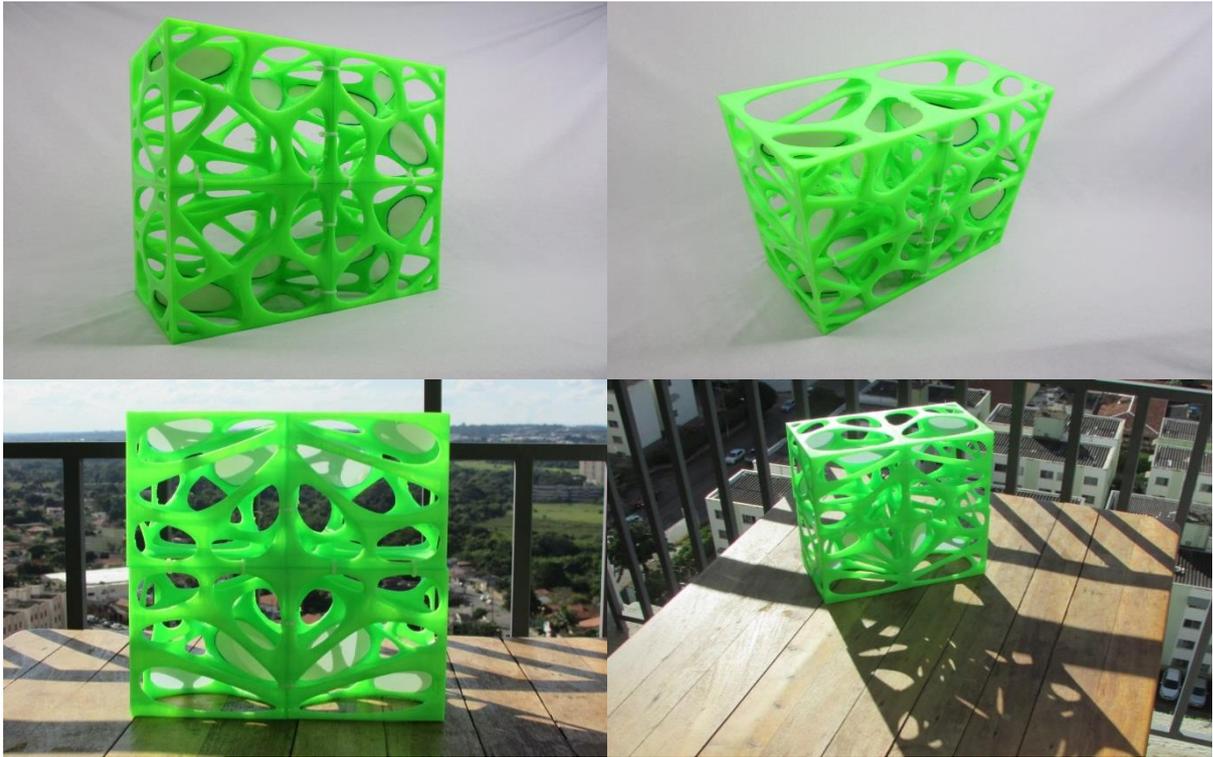


Figura 133: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático. Fonte: Própria

Assim, a célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático mostrou a geração de sombra mais intensa em função do maior brilho da luz do sol e, ao mesmo tempo permitiu a passagem de correntes de vento.

Neste protótipo foi observada a necessidade de usar materiais que reagissem à temperatura do ambiente.

#### *2.5.5.2.2.2 Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial dos materiais*

A célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial dos materiais foi fabricada com impressão 3D e material de escritório.

A célula foi fabricada com filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 16 horas. As dimensões da célula foram de 12cm x 12cm x 12cm. As lâminas colocadas na frente da célula foram fabricadas com papel de 75gr e papel alumínio para cozinha.

O teste do funcionamento da célula foi realizado com a preparação de um painel composto por 2 células e exposto ao ambiente. O painel foi observado por um período de 12 horas (das 6h00min às 18h00) em um dia com temperatura amena na parte da manhã e quente na parte da tarde tirando fotografias cada 5 minutos (a técnica utilizada foi o *timelapse*).

No teste foi observado que quanto aumentava a temperatura do ambiente, maior foi a dilatação da lâmina de alumínio que a dilatação da lâmina de papel. A dilatação diferencial entre as lâminas do alumínio e do papel provocou que a lâmina bimaterial curvasse em direção à lâmina de papel permitindo a passagem de correntes de vento para o interior da célula.



Figura 134: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento da dilatação diferencial da lâmina de bimaterial – lâmina: papel de 75gr e alumínio para cozinha. Fonte: Própria

Em um segundo teste de funcionamento da célula foi trocada a lâmina bimaterial por uma outra lâmina bimaterial composta por papel branco de 75gr e fita adesiva de alumínio. O painel, também, foi observado por um período de 12 horas (das 6h00min às 18h00) em um dia com temperatura fria na parte da manhã e amena na parte da tarde, tirando fotografias cada 5 minutos (a técnica utilizada foi o *timelapse*).

No teste foi observado que quanto aumentava a temperatura do ambiente, aumentava a dilatação da lâmina de fita de alumínio. A dilatação diferencial entre as lâminas do alumínio e do papel provocou que a lâmina bimaterial curvada para o lado da fita de alumínio se estendesse até chegar ao equilíbrio com o lado da lâmina de papel diminuindo a passagem de correntes de vento.



Figura 135: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento da dilatação diferencial da lâmina de bimaterial – lâmina: papel de 75gr e fita adesiva de alumínio. Fonte: Própria

Assim, a célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial dos materiais mostrou movimentação de abertura e fechamento em função da variação da temperatura do ambiente.

Neste protótipo foi observada a necessidade de usar materiais em estado natural que reagissem à umidade do ambiente.

#### *2.5.5.2.2.3 Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico*

A célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico foi fabricada com impressão 3D e carpintaria.

A célula foi fabricada com filamento fundido em impressora 3D *Anet A8*. A fabricação levou 16 horas. As dimensões da célula foram de 12cm x 12cm x 12cm. As lâminas de madeira colocadas na frente da célula foram fabricadas madeiras: pinus, pinus com revestimento de plástico e eucalipto.

O teste do funcionamento da célula foi realizado com a preparação de um painel composto por 2 células e exposto ao ambiente e aplicação de água em intervalos de 1 hora. O painel foi testado por um período de 12 horas (das 6h00min às 18h00) em um dia com temperatura amena na parte da manhã e quente na parte da tarde tirando fotografias cada 5 minutos (a técnica utilizada foi o *timelapse*).

Nos testes foi observado que quanto aumentava a temperatura do ambiente e se aplicava água nas lâminas de madeira, elas se curvavam em direção da célula e no sentido transversal à direção das fibras da madeira. E, quando a água era evaporada das lâminas de madeira, elas se curvavam em direção contrária à célula e no sentido transversal à direção das fibras da madeira.

No primeiro teste foram utilizadas lâminas de madeira de pinus de dimensões de 11cm x 11cm x 1cm. Neste teste foi observado que a movimentação da lâmina foi lenta e quase imperceptível.



Figura 136: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de pinus. Fonte: Própria

No segundo teste foram utilizadas lâminas de madeira de pinus com revestimento de plástico pela parte posterior e de dimensões de 11cm x 11cm x 0.5cm. Neste teste foi observado que a movimentação da lâmina foi um pouco mais rápida e perceptível.



Figura 137: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de pinus com revestimento plástico na parte posterior. Fonte: Própria

No terceiro teste foram utilizadas lâminas de madeira de eucalipto de dimensões de 11cm x 11cm x 0.5cm. Neste teste foi observado que a movimentação da lâmina foi rápida e perceptível.

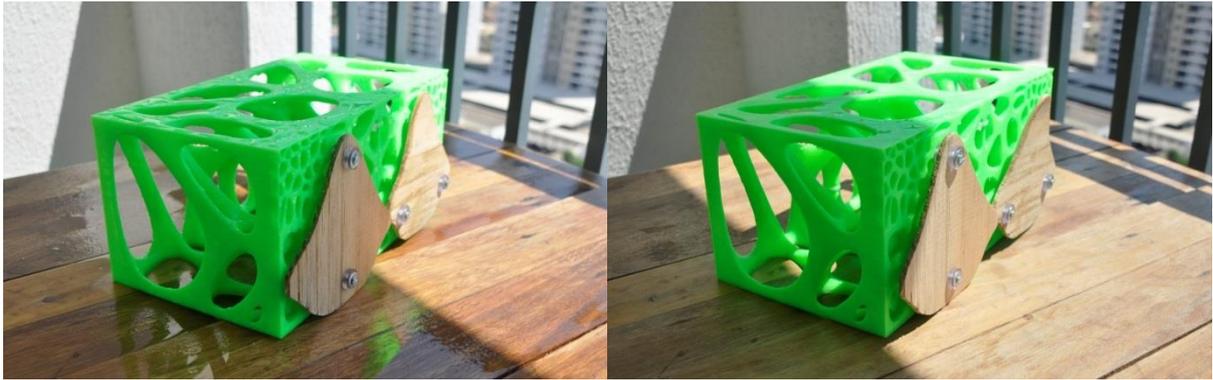


Figura 138: Protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico – dispositivo móvel em madeira de eucalipto. Fonte: Própria

Assim, nos experimentos foi observado que a movimentação das lâminas de madeira, curvamento, foi no sentido transversal à direção das fibras das madeiras e que a movimentação foi mais rápida quando a espessura da lâmina foi  $1/22$  da dimensão da lâmina no sentido das fibras da madeira.

Neste protótipo foi observado que esta célula precisa de que se lhe aplique água quando a umidade do ambiente é baixa.

#### *2.5.5.2.2.3.1 Estudo de texturas para o protótipo de célula responsiva autônoma com acionamento higroscópico*

Após a observação de que a curvatura da lâmina de madeira foi no sentido transversal da direção das fibras, foram realizados estudos de fabricação de texturas para captar água em uma forma mais rápida na superfície das lâminas de madeira.

Os protótipos das texturas foram modelados no *software rhinoceros 5.0* e o *plugin grasshopper* e fabricados em madeira de cedro vermelho utilizando o software SRP Player CAM na máquina de usinagem Roland MDX 40a. No laboratório de Fabricação digital e Customização em Massa – LFDC – da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Ver figura logo abaixo.

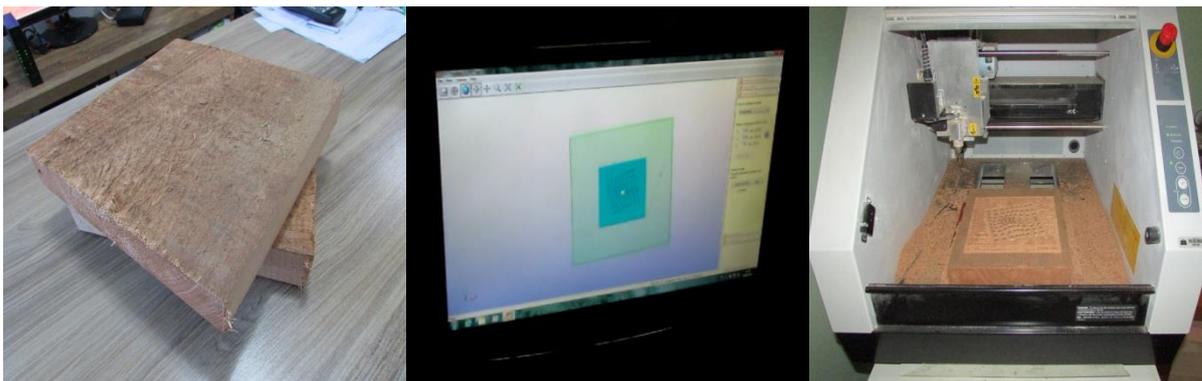
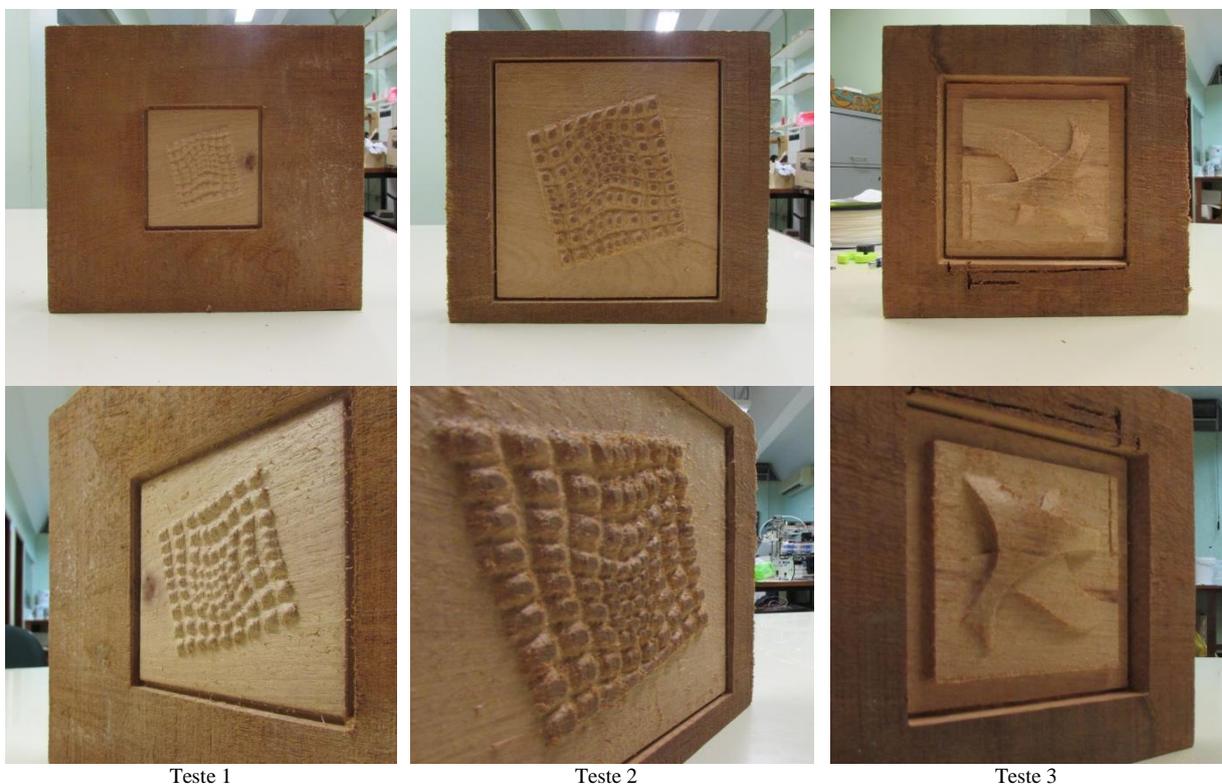


Figura 139: Fabricação dos protótipos testes de texturas para as lâminas de madeira. Fonte: Própria

Três testes de protótipos foram produzidos com dois tipos de textura. As texturas foram produzidas em diferentes tamanhos e com diferentes orientações com relação ao sentido das fibras da madeira. No teste 1, a textura foi orientado na direção das fibras da madeira, o que significa que a madeira curvaria em forma diagonal. No teste 2, a textura foi orientada em um ângulo de 10 graus em relação à direção das fibras da madeira, o que significa que a madeira curvaria em forma transversal à direção das fibras. E no teste 3, a textura foi de forma livre mas o sentido das fibras da madeira foi horizontal, o que significa que a madeira curvaria em forma transversal à direção das fibras.



Teste 1

Teste 2

Teste 3

Figura 140: Protótipos testes de texturas para as lâminas de madeira. Fonte: Própria

Assim, nos testes dos protótipos das texturas foi observado que as texturas podem ter qualquer geometria, mas o que vai determinar o sentido da curvatura da lâmina é a direção das fibras da madeira.

#### *2.5.5.2.2.4 Observação nos protótipos de células responsivas autônomas com acionamento pelo comportamento do material*

Assim, sendo que:

No protótipo da célula responsiva autônoma com acionamento fotocromático foi observada a necessidade de usar materiais que reagissem à temperatura do ambiente.

No protótipo da célula responsiva autônoma com acionamento por dilatação diferencial foi observada a necessidade de usar materiais em estado natural que reagissem à umidade do ambiente.

No protótipo da célula responsiva com acionamento higroscópico foi observado que a célula precisa de que se lhe aplique água quando a umidade do ambiente é baixa.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

A célula responsiva autônoma com acionamento pelo comportamento do material pode ser produzida com fabricação digital e com materiais que reajam a fatores ambientais. E, que o uso de matérias que reagem aos fatores ambientais na sua maioria não precisam de dispositivos complementares. e alimentação de energia.

#### *2.5.5.2.3 Observação nas experimentações e prototipagem das células responsivas*

Assim, sendo que:

A célula responsiva autônoma com acionamento pelo comportamento do material pode ser produzida com fabricação digital e robótica. E, que a célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade se apresenta como a melhor alternativa para evitar a insolação direta devido a sua orientação automática.

A célula responsiva autônoma com acionamento pelo comportamento do material pode ser produzida com fabricação digital e com materiais que reajam a fatores ambientais. E, que o uso de matérias que reagem aos fatores ambientais na sua maioria não precisam de dispositivos complementares. e alimentação de energia.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

A célula responsiva autônoma pode ser produzida com tecnologia de fabricação digital e robótica ou com materiais que reajam a fatores ambientais. E, que o uso de matérias que reagem aos fatores ambientais na sua maioria não precisam de dispositivos complementares. e alimentação de energia. Mas a célula responsiva autônoma com controle por sensores de luminosidade se apresenta como a melhor alternativa para evitar a insolação direta devido a sua orientação automática.

#### *2.5.5.3 Prototipagem de painéis com células responsivas*

A prototipagem dos painéis com células responsivas foi realizado em 2 fases: 1) Protótipo de painel com célula estrutural 5 responsiva com sensor ultrassônico em superfície plana, 2) Protótipo de painel com célula estrutural 4 responsiva com sensores.

Onde, foi observado que o painel responsivo autônomo pode ser produzido com células pontudas ou planas em superfícies planas ou de dupla curvatura. E, que as células responsivas

autônomas podem ser acionadas por diferentes sensores individualmente ou acionadas em forma agrupada pelo mesmo sensor. Tal como é apresentado a seguir:

#### *2.5.5.3.1 Protótipo de painel com célula responsiva pontuda com acionamento por sensor ultrassônico em superfície plana*

O protótipo de painel com célula responsiva pontuda com acionamento por sensor ultrassônico em superfície plana foi produzido com 9 células de diferentes tamanhos e formas. O painel foi composto por células organizadas em 3 filas e 3 colunas. Onde, o centro do painel foi implementado com uma célula responsiva autônoma com controle por sensor ultrassônico. As dimensões do painel foram 21cm x 21cm x 12cm. E, a fabricação por filamento fundido de *PLA* levou 93 horas.

O painel foi testado duas vezes com variação na distância de detecção de obstáculos e no ângulo de emissão da onda sonora. No primeiro teste com uma distancia de detecção de 1m e um ângulo de emissão de onda sonora de 120 graus foi observado que interferência entre os sensores. No segundo teste com uma distancia de detecção de 25cm e um ângulo de emissão de onda sonora de 80 graus foi observado um melhor funcionamento.

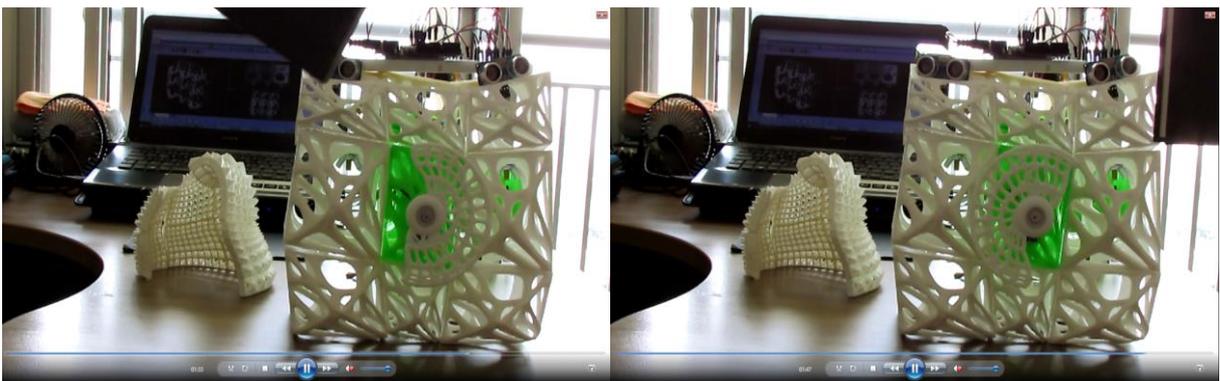


Figura 141: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva pontuda com sensor ultrassônico em superfície plana. Fonte Própria

Assim, nos testes de funcionamento do painel foi observado que a distancia de detecção de obstáculos e o ângulo de emissão da onda sonora devem ser configurados dependendo da finalidade para a qual seria utilizado o painel.

### 2.5.5.3.2 *Protótipo de painel com célula responsiva plana com acionamento por sensores de distância ultrassônicos e de temperatura em superfície de dupla curvatura*

O protótipo de painel com célula responsiva plana com acionamento por sensores de distância ultrassônicos e de temperatura em superfície de dupla curvatura foi produzido com 32 células de diferentes tamanhos e formas. O painel foi composto por células organizadas em 4 filas e 8 colunas. Onde, começando pelo lado esquerdo do painel, a terceira célula da coluna 2 e a segunda célula da coluna 7 foram implementadas com células responsivas autônomas com controle por sensores de distância ultrassônicos e de temperatura. As dimensões do painel foram 60cm x 46cm x 9cm. E, a fabricação por filamento fundido de *PLA* levou 384 horas.



Painel com células responsivas autônomas com acionamento por sensores de distância ultrassônicos



Painel com células responsivas autônomas com acionamento por sensor de temperatura

Figura 142: Protótipo de painel com célula responsiva autônoma plana com sensores de distância ultrassônicos e de temperatura em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria

O painel foi testado com os sensores de distância ultrassônicos e de temperatura. No teste com os sensores de distância ultrassônicos, a distância de detecção de obstáculo e o ângulo de emissão da onda sonora foram configuradas para 1m e 80cm, respectivamente. No teste as duas células foram conectadas para funcionar com o mesmo sensor. Dessa maneira, as células reagiram ao mesmo tempo quando um obstáculo se aproximou de qualquer um dos sensores.



Figura 143: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva autônoma com sensor de distância ultrassônico em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria

No teste com o sensor de temperatura, um sensor fez o acionamento de duas células. No teste foi observado que o acionamento do dispositivo móvel foi demorado devido a que a temperatura do ambiente foi constante. Mas para verificar o funcionamento do sistema foi tocado manualmente o sensor por 2 segundo e o dispositivo móvel das duas células giraram 180 graus.



Figura 144: Funcionamento do protótipo de painel com célula responsiva autônoma com sensor de temperatura em superfície de dupla curvatura. Fonte: Própria

Assim, sendo que no teste de funcionamento do painel com os sensores de distância ultrassônicos foi observado que as células responsivas podem ser controladas por um mesmo sensor ou controladas individualmente por sistemas individuais; que no teste de funcionamento do painel com sensor de temperatura foi observado que as células responsivas podem ser controladas por um mesmo sensor ou controladas individualmente por sistemas individuais; em tais observações, nesta tese, será adotado que o painel responsivo autônomo pode ser composto por células que reajam a um ou mais sensores do mesmo tipo ou de diferente tipo.

### 2.5.5.3.3 Observação na prototipagem de painéis com células responsivas

Assim, sendo que nos teste de funcionamento do painel responsivo autônomo com células pontudas em superfície plana foi observado que a distância e de detecção de obstáculo e o ângulo de emissão da onda sonora devem ser configuradas dependendo da finalidade para o qual seria utilizado o painel; que no teste de funcionamento do painel responsivo autônomo com células planas e sensores do mesmo tipo ou de diferentes tipos; em tais observações, nesta tese, será adotado que o painel responsivo autônomo pode ser produzido com células pontudas ou planas em superfícies planas ou de dupla curvatura. E, que as células responsivas autônomas podem ser acionadas por diferentes sensores individualmente ou acionadas em forma agrupada pelo mesmo sensor.

### 2.5.6 Síntese

Nesta tese será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se a hipótese guia do experimento. As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper* - permitem projetar um um painel de células responsivas inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. As tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, *software sprintray rayware 1.4.6*, impressora *reprap anet a8*, impresora *moonray S*, - permitem a produção de um painel de células responsivas pela fundição de filamento de ácido poliláctico - *PLA* - e processamento de luz direta em resina *moonray gray*. E, a tecnologia de prototipagem eletrônica – *arduino* – permite a produção de células responsivas e painéis de células responsivas Na cidade de Goiânia (GO).

A partir das observações listadas na tabela a seguir:

Tabela 15: Observações no Protocolo do Experimento 5

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Estudos preliminares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maquete Rápida de papel e/ou papelão.</li> </ul>	<p>O dispositivo da parte móvel da célula deve ter liberdade de giro para fazer a orientação, que a parte dos eixos deve ocupar o menor espaço possível e que o dispositivo deve ser autônomo.</p>
2	Experimentação e Prototipagem de células	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros;</i></li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>▪ <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6;</i></li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S;</i></li> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA;</i></li> <li>▪ Resina <i>Moonray Gray;</i></li> <li>▪ Papel <i>Chamex Branco</i>, formato A4, 75gr;</li> <li>▪ Folhas de Acetato transparente de 30 micras em formato A4;</li> <li>▪ Seringas descartáveis;</li> <li>▪ Mangueirinhas de silicone;</li> <li>▪ Placa <i>Arduino Uno;</i></li> </ul>	<p>A célula responsiva autônoma pode ser produzida com tecnologia de fabricação digital e robótica ou com materiais que reajam a fatores ambientais. E, que o uso de matérias que reagem aos fatores ambientais na sua maioria não precisam de dispositivos complementares. e alimentação de energia. Mas a célula responsiva autônoma com controle por sensores se apresenta como a melhor alternativa para evitar a insolação direta devido a sua orientação automática.</p>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cabo USB;</li> <li>▪ Protoboard;</li> <li>▪ <i>Jumpers</i>;</li> <li>▪ Micro Servo 9g SG90 TowerPro;</li> <li>▪ Servo Motor MG996R;</li> <li>▪ Potenciômetro 100k;</li> <li>▪ Sensores de Luminosidade LDR 5mm;</li> <li>▪ Sensores de Temperatura LM35DZ;</li> <li>▪ Sensores Ultrassônicos HC-SR04;</li> <li>▪ Suporte Pan/Tilt com Servo Motor 9G;</li> <li>▪ Controlador AtMega328P - configuração Standalone;</li> <li>▪ Painel solar 12V 3W;</li> <li>▪ Placa fenolite 40 cm<sup>2</sup>;</li> <li>▪ Bateria recarregável 9V 240mAh;</li> <li>▪ Resistores de 1 ?;</li> <li>▪ Resistores de 2,2 K?;</li> <li>▪ Resistor de 10 K?;</li> <li>▪ Resistor de 150?;</li> <li>▪ Cristal oscilador 16 MHz ;</li> <li>▪ Transistores 2n2222A;</li> <li>▪ Botão tipo reset/push button;</li> <li>▪ Regulador de tensão 7805;</li> <li>▪ Capacitor eletrolítico de 220 uF;</li> <li>▪ Capacitores de 100 nF;</li> </ul>	
--	--	--	--

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capacitores de 22nF;</li> <li>▪ Diodo 1N4007;</li> <li>▪ LEDs;</li> <li>▪ Clipe de bateria 9V;</li> <li>▪ Tinta fotocromática;</li> <li>▪ Madeira de Pinho;</li> <li>▪ Madeira de Eucalipto;</li> <li>▪ Fita adesiva de alumínio.</li> </ul>	
3	Prototipagem de painéis	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros;</i></li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S;</i></li> <li>▪ Filamento de ácido polilático - <i>PLA;</i></li> <li>▪ Resina Moonray Gray;</li> <li>▪ Placa Arduino Uno;</li> <li>▪ Cabo USB;</li> <li>▪ Protoboard;</li> <li>▪ <i>Jumpers;</i></li> </ul>	<p>O painel responsivo autônomo pode ser produzido com células pontudas ou planas em superfícies planas ou de dupla curvatura. E, que as células responsivas autônomas podem ser acionadas por diferentes sensores individualmente ou acionadas em forma agrupada pelo mesmo sensor.</p>

		<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Servo Motor MG996R;</li><li>▪ Sensores de Temperatura LM35DZ;</li><li>▪ Sensores Ultrassônicos HC-SR04;</li><li>▪ Bateria recarregável 9V 240mAh;</li><li>▪ Clipe de bateria 9V.</li></ul>	
--	--	--	--

## **2.6. Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica**

### 2.6.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais junto às tecnologias de fabricação convencionais têm permitido a projeção e fabricação de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de peça biônica.

### 2.6.2 Hipótese

As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper*, *Autodesk T-spline para rhinoceros* - permitem projetar uma peça biônicas inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. As tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, impressora *reprap anet a8* - permitem a produção de um protótipo de peça biônica pela fundição de filamento de ácido polilático. E, a tecnologia de fundição com modelo perdido em caixa de areia permite a produção de peças biônicas. Na cidade de Goiânia (GO).

### 2.6.3 Objetivo geral

Determinar as possibilidades e limitações da fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de um protótipo de peça biônica inspirada nas estruturas

naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas presentes na cidade de Brasília (DF).

#### 2.6.3.1 *Objetivos específicos*

- Determinar as possibilidades e limitações da impressão 3D com fabricação de filamento fundido de ácido poliláctico – *PLA* – do modelo da peça;
- Determinar as possibilidades e limitações da colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça;
- Determinar as possibilidades e limitações do uso de fornos para a fundição do material para conformação do modelo da peça;
- Determinar as possibilidades e limitações da montagem do modelo da peça com os canais para aplicação do material fundido em caixa de areia;
- Determinar as possibilidades e limitações da aplicação do material fundido no modelo da peça;
- Determinar as possibilidades e limitações da peça produzida.

#### 2.6.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo foi estruturado em 6 fases.

- Preparação do modelo da peça;
- Estudo da colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça;
- Aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça;
- Preparação do modelo da peça para conformação e colocação dos canais para aplicação do material fundido em caixa de areia;
- Aplicação do material fundido no modelo da peça;

- Retiro da peça conformada da caixa de areia.

## 2.6.5 Desenvolvimento do Experimento

### 2.6.5.1 Preparação do modelo da peça

O modelo foi inspirado nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas presentes na região centro-oeste do Brasil, como a atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pihna ou fruta do conde.

A preparação do modelo da peça foi realizada em 2 fases: 1) Modelagem do modelo da peça, 2) Impressão 3D do modelo da peça.

A modelagem do modelo da peça foi realizada utilizando algoritmos generativos no ambiente do *software rhinoceros 5.0* com auxílio do *plugin grasshopper* e *plugin Autodesk T-spline*.

A impressão 3D foi realizada utilizando a uma impressora *RepRap* e a tecnologia de fabricação por filamento fundido. A impressora utilizada foi a *Anet A8* com *software de fatiamento Cura 15.04.6* e, o filamento utilizado foi o ácido polilático ou PLA. O modelo foi imprimido em um período de 10 horas nas dimensões de 12cm x 7cm x 6cm.

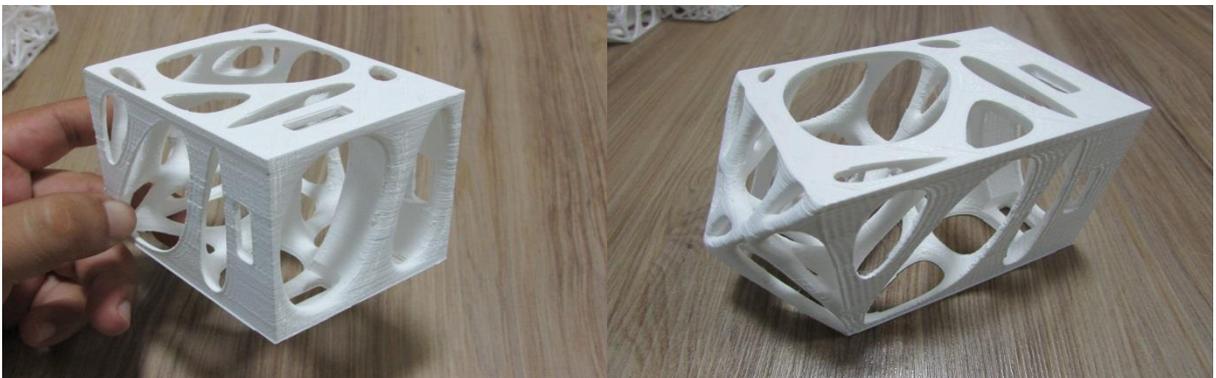


Figura 145: Modelo da peça produzida com impressão 3D com filamento fundido de ácido polilático ou PLA.  
Fonte: Própria

Na impressão 3D com fabricação por filamento fundido do modelo da peça foi observado que a altura da camada, a camada exterior horizontal e a densidade de impressão podem ser configuradas para obter uma melhor qualidade na impressão da peça.

Nesse sentido, para utilizar o modelo da peça para fabricação por fundição com modelo perdido em caixa de areia, o modelo deve ser impresso com a maior altura da camada sem prejudicar a qualidade do modelo. Deve-se configurar a espessura da camada exterior horizontal sem prejudicar a continuidade da superfície do modelo da peça. Deve-se configurar a densidade de impressão no menor nível sem prejudicar a resistência do modelo da peça.

De outro lado, embora a impressão 3D com fabricação por filamento fundido permita a preparação do modelo da peça, essa tecnologia apresenta limitações na fabricação de superfícies com inclinação superior a 45 graus. Perante essa limitação, a impressão 3D com tecnologia de processamento de luz direta em resina calcinável é uma alternativa que precisa ser pesquisada.

#### *2.6.5.2 Estudo da colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça*

A colocação dos canais para aplicação do material fundido precisou do estudo prévio da geometria do modelo.

Os canais foram preparados em isopor de densidade F1. Pela geometria do modelo da peça, onde a parte com mais volume se encontrou na base do modelo, os canais foram colocados para começar o enchimento pela base do modelo.

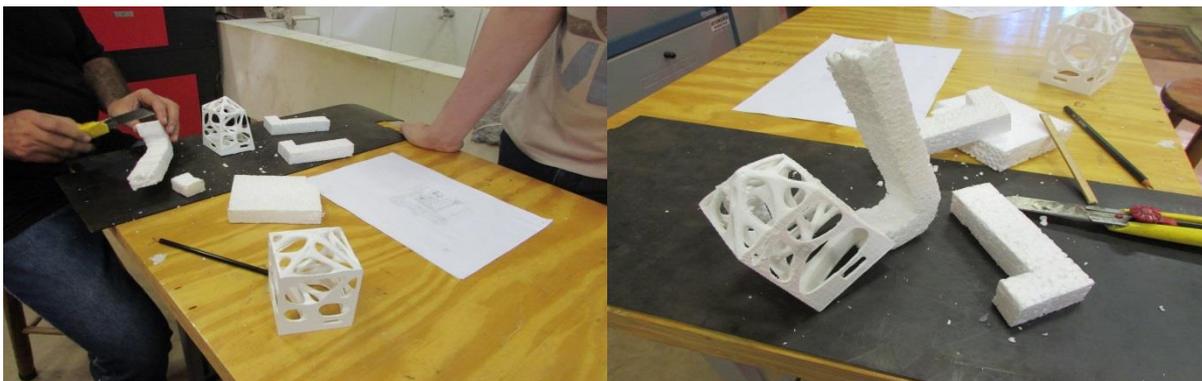


Figura 146: Colocação de canais para aplicação do material fundido no modelo da peça. Fonte: Própria

No estudo para colocação dos canais para aplicação do material fundido no modelo da peça foi observado que o enchimento pela parte de baixo do modelo com o material fundido não chegaria a diluir o PLA nas partes mais finas devido a que o material diminuiu a vazão e foi esfriando.

Nesse sentido, a aplicação do material fundido pela base do modelo, com a base orientada para cima, possibilitaria o preenchimento das partes finas do modelo devido a que haveria maior pressão pela parte de cima. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### *2.6.5.3 Aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça*

A fundição foi realizada como o forno elétrico JUNG modelo 3810 e o forno de fundição FORTELAB modelo POB 1300-7 do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação – LAMAF – da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás.

No forno elétrico foi aquecido até 1000 graus de temperatura e o forno de fundição foi aquecido, também até os 1000 graus de temperatura. No forno elétrico foi colocada para aquecer a vasilha que recebeu o material fundido e, no forno de fundição foram colocadas para derreter peças de alumínio.

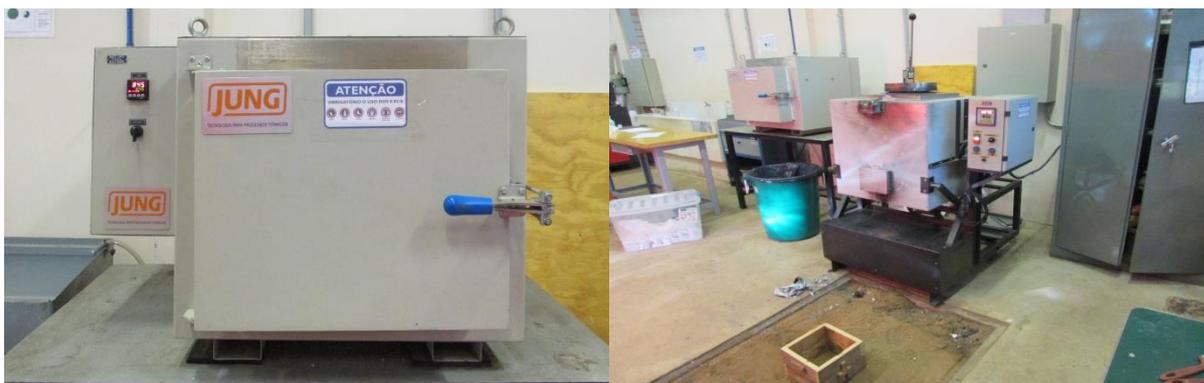


Figura 147: Aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça. Fonte: Própria

No aquecimento dos fornos e fundição do material para conformação do modelo da peça foi observado que para fabricar peças maiores seria necessário uma vasilha de maior tamanho.

Nesse sentido, para a conformação de peças de tamanhos maiores seriam necessários fornos e vasilha de tamanhos maiores para conformar de uma única vez. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### *2.6.5.4 Montagem do modelo da peça e dos canais para aplicação do material fundido em caixa de areia*

A montagem do modelo da peça com a colocação dos canais para aplicação do material fundido foi realizado em 4 fases: 1) Preparação da caixa de madeira, 2) Tamisação da areia, 3) Preparação da camada de base, 4) Montagem do modelo da peça com os canais para aplicação do material fundido.

A preparação da caixa de madeira consistiu em construir uma caixa de madeira sem as tapas inferior e superior com dimensões adequadas ao modelo e à quantidade de areia a ser utilizada. A caixa utilizada foi construída com madeira de cedro de 2.5cm de espessura e de dimensões de 20cm x 20cm.

A tamisação da areia consistiu em passar a areia por uma malha de metal ou de nylon para separar os grãos maiores. O objetivo é manter uma granulometria uniforme nos grãos de areia para evitar falhas na produção da peça.

A preparação da camada base consistiu em formar uma camada de areia na base da caixa para apoiar o modelo da peça a ser produzida.

A montagem do modelo da peça com os canais para aplicação do material fundido consistiu em orientar o modelo da peça e distribuir os canais em diferentes alturas e lados. O objetivo foi conseguir uma melhor distribuição do material fundido na conformação da peça. Parte dos canais deve ficar exposta para fazer a aplicação do material fundido.



Figura 148: Preparação do modelo da peça para conformação e colocação dos canais para aplicação do material fundido em caixa de areia. Fonte: Própria

Na montagem do modelo da peça e dos canais para aplicação do material fundido na caixa de areia foi observado a pouca área de contato dos canais de isopor nas partes mais finas do modelo.

Nesse sentido, as partes finas do modelo teriam que ter um maior volume para poderem ser conformadas pelo processo de fundição com modelo perdido em caixa de areia. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### 2.6.5.5 Aplicação do material fundido no modelo da peça

A aplicação do material fundido no modelo da peça foi realizado em 3 fases: 1) Retirada da vasilha para o material fundido, 2) Vertido do material fundido na vasilha, 3) Vertido do material fundido no modelo para conformação.

A retirada da vasilha para o material fundido consistiu em tirar a vasilha aquecida a 1000 graus centígrados do forno elétrico para vertido do material fundido, alumínio.

O vertido do material fundido na vasilha consistiu na passagem do alumínio fundido a 1000 graus centígrados no forno de fundição para a vasilha.



Figura 149: Retirada da vasilha e vertido do alumínio fundido. Fonte: Própria

O vertido do material fundido no modelo para conformação consistiu no derramamento do alumínio fundido nas partes expostas dos canais de isopor.



Figura 150: Vertido do alumínio fundido no modelo da peça. Fonte: Própria

Na aplicação do alumínio fundido no modelo da peça foi observado que o deslocamento do alumínio teve dificuldade em passar dos canais de isopor para as partes finas do modelo.

Nesse sentido, as partes finas do modelo seriam conformadas se também fossem construídas com isopor ou fossem condutos vazios para facilitar o deslocamento do alumínio. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### *2.6.5.6 Retiro da peça conformada da caixa de areia*

Após o vertido do alumínio fundido no modelo da peça esperou-se o esfriamento da peça e logo foi retirada da caixa de areia.

A conformação da peça não teve sucesso. As partes mais finas do modelo não foram conformadas e , a parte da base foi conformada com algumas falhas.





Figura 151: Retiro da peça conformada da caixa de areia. Fonte: Própria

No retiro da peça conformada da caixa de areia foi observado que a conformação não teve sucesso nas partes finas do modelo e que a vazão do alumínio, nas partes finas, não foi suficiente para manter a temperatura.

Nesse sentido, existiriam 3 possibilidades para conformar a peça com o modelo impresso em 3D. 2 possibilidades utilizando a fabricação por filamento fundido com PLA e, 1 possibilidade utilizando o processamento por luz direta em resina.

Na primeira possibilidade utilizando a fabricação por filamento fundido com PLA, primeiro, a peça teria que ter um tamanho maior a fim de que as partes mais finas tivessem maiores seções. Segundo, a peça deveria ser produzida com a camada de filamento tão alta como for possível sem prejudicar o modelo da peça, a camada horizontal exterior mais fina possível sem prejudicar o modelo da peça e, a mínima densidade de impressão possível sem prejudicar a resistência da peça. Esta primeira possibilidade ainda precisa de mais pesquisa.

Na segunda possibilidade utilizando a fabricação por filamento fundido com PLA, primeiro, o modelo da peça deveria ser coberto com gesso deixando canais para entrada e saída do material fundido e dos gases; segundo, o modelo da peça deveria ser derretido em forno e; terceiro, o material fundido deveria ser vertido na forma de gesso obtida. Esta segunda possibilidade ainda precisa de mais pesquisa.

Na terceira possibilidade utilizando o processamento de luz direta em resina, primeiro, o modelo da peça deveria ser impresso com resina calcinável; segundo, o modelo deveria ser coberto com gesso deixando canais para entrada e saída do material fundido e dos gases; terceiro, a resina deveria ser derretida em forno e; quarto, o material fundido deveria ser vertido na forma obtida. Embora, se o modelo da peça fosse impresso em resina não seria

necessário fazer a conformação por fundição já que a peça estaria pronta para uso direto. Esta terceira observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### *2.6.5.7 Observação na fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de peça biônica*

Assim, sendo que:

Embora a impressão 3D com fabricação por filamento fundido permita a preparação do modelo da peça, essa tecnologia apresenta limitações na fabricação de superfícies com inclinação superior a 45 graus. Perante essa limitação, a impressão 3D com tecnologia de processamento de luz direta em resina calcinável é uma alternativa que precisa ser pesquisada.

A aplicação do material fundido pela base do modelo, com a base orientada para cima, possibilitaria o preenchimento das partes finas do modelo devido a que haveria maior pressão pela parte de cima. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

A conformação de peças de tamanhos maiores só seria possível com fornos e vasilha de tamanhos maiores para conformar a peça de uma única vez. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

As partes finas do modelo teriam que ter um maior volume para poderem ser conformadas pelo processo de fundição com modelo perdido em caixa de areia. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

As partes finas do modelo seriam conformadas se também fossem construídas com isopor ou fossem condutos vazios para facilitar o deslocamento do alumínio. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

O modelo da peça poderia ser fabricado por processamento de luz direta em resina em uma impressora 3D de grandes formatos com resina calcinável para produzir o molde para a conformação por fundição de ligas metálicas. Ou, a peça poderia ser fabricada em resina de alta resistência para seu uso direto. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

Em tais observações, nesta tese, será dotado que:

A peça biônica poderia ser fabricada por processamento de luz direta em resina em uma impressora 3D de grandes formatos com resina calcinável para produzir o molde para a conformação por fundição de ligas metálicas. Ou, a peça poderia ser fabricada em resina de alta resistência ou ligas metálicas para seu uso direto. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.

#### 2.6.6 Síntese

Nesta tese, será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se a hipótese guia do experimento. As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper*, *Autodesk T-spline para rhinoceros* - permitem projetar uma peça biônicas inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. As tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, impressora *reprap anet a8* - permitem a produção de um protótipo de peça biônica pela fundição de filamento de ácido poliláctico - *PLA*. E, a tecnologia de fundição com modelo perdido em caixa de areia permite a produção de peças biônicas. Na cidade de Goiânia (GO).

A partir da observação na tabela a seguir:

Tabela 16: Observação no Protocolo do Experimento 6

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Preparação do Modelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros;</i></li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6.</i></li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>▪ Filamento de ácido polilático – <i>PLA.</i></li> </ul>	<p>A peça biônica poderia ser fabricada por processamento de luz direta em resina em uma impressora 3D de grandes formatos com resina calcinável para produzir o molde para a conformação por fundição de ligas metálicas. Ou, a peça poderia ser fabricada em resina de alta resistência ou direto em ligas metálicas para seu uso direto. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.</p>
2	Estudo da aplicação do material fundido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isopor.</li> </ul>	
3	Preparação dos fornos para fundição do material	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Forno Elétrico <i>JUNG</i> Modelo 3810;</li> <li>▪ Forno de Fundição <i>FORTELAB</i> Modelo POB 1300-7.</li> </ul>	
4	Preparação do Modelo na caixa de areia	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Areia;</li> <li>▪ Madeira.</li> </ul>	
5	Aplicação do material fundido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alumínio.</li> </ul>	
6	Retiro da peça da caixa de areia	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alumínio.</li> </ul>	

## 2.7 Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente

### 2.7.1 Motivação

O avanço das tecnologias digitais junto às tecnologias de fabricação robótica têm permitido a projeção e produção de protótipos de artefatos com formas complexas ou de geometrias não euclidianas na área da arquitetura; mas poucas são as experiências que apontam quais são as possibilidades e as limitações dessas tecnologias para a produção de um protótipo de peça biônica.

### 2.7.2 Hipótese

As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper*, *Autodesk T-spline para rhinoceros* - permitem projetar uma peça biônica inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, impressora *reprap anet a8*, célula robotizada de soldagem Robô *HP-20 Yaskawa Motoman* com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocessado, *Kuka prc*, *RoboDK* - permitem a produção de um protótipo de peça biônica em isopor pelo processo de corte com fio quente em braço robótico industrial. Na cidade de Goiânia (GO).

### 2.7.3 Objetivo geral

Determinar as possibilidades e limitações da fabricação digital por adição e por corte a fio quente em braço robótico industrial de um protótipo de peça biônica inspirada nas estruturas

naturais encontradas nas cascas dos frutos de algumas espécies frutíferas presentes na cidade de Brasília (DF).

#### *2.7.3.1 Objetivos específicos*

- Determinar as possibilidades e limitações da fabricação robótica em peças de formas complexas de duplas curvaturas;
- Determinar as possibilidades e limitações do corte a fio quente no braço robótico industrial em isopor em simulação computacional;
- Determinar as possibilidades e limitações na construção do dispositivo de corte a fio quente no braço robótico industrial;
- Determinar as possibilidades e limitações no corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em isopor;
- Determinar as possibilidades e limitações do corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial em isopor em experiência real;
- Determinar as possibilidades e limitações das peças produzidas.

#### 2.7.4 Protocolo

Dessa maneira, o protocolo foi estruturado em 6 fases.

- Preparação dos modelos da peça;
- Simulação da aplicação robótica;
- Construção do dispositivo de corte a fio quente para braço robótico industrial;
- Testes de corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em bloco de isopor;
- Testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa em isopor;
- Resultados dos cortes.

## 2.7.5 Desenvolvimento do Experimento

### 2.7.5.1 Preparação dos modelos da peça

A preparação dos modelos das peças foi realizada utilizando o *software rhinoceros 5.0* e transformando os modelos em malhas.

Três modelos de peças foram preparados com diferentes níveis de complexidade. O modelo 1, modelo simples, foi preparado com uma superfície de dupla curvatura de ondas contínuas e suaves e de dimensões de 30cm x 10cm x 40cm. O modelo 2, modelo semicomplexo, foi preparado com superfícies planas e de dupla curvatura acentuadas de dimensões de 30cm x 20cm x 30cm. E, o modelo 3, modelo complexo, foi preparado com superfícies planas e de dupla curvatura acentuadas em diferentes direções e de dimensões de 40cm x 40 cm x 40cm.

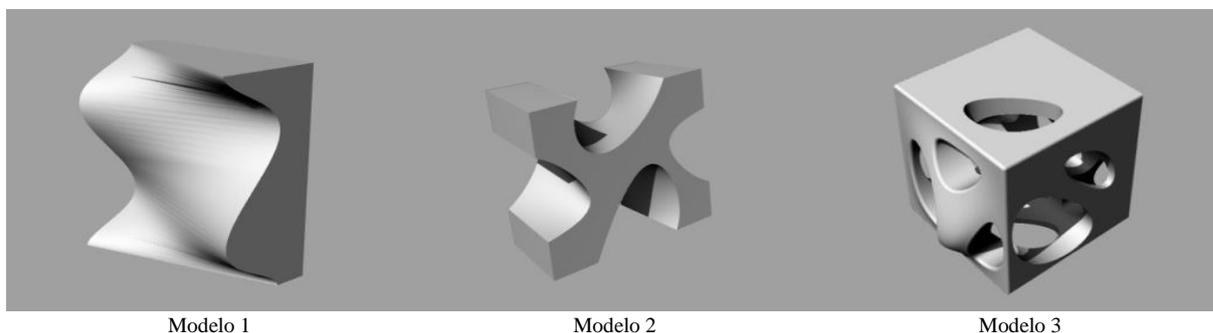


Figura 152: Modelos de peças de formas simples e complexas para fabricação robótica. Fonte: Própria

Assim, na preparação dos modelos das peças com diferentes níveis de complexidade nas formas foi observado que o modelo de forma complexa precisaria de uma estratégia diferente de fabricação devido a que a parte interna da peça não podia ser cortada com o dispositivo de corte a fio quente no braço robótico industrial.

Nesse sentido, a simulação da aplicação robótica utilizando os dispositivos de corte a fio quente e de formação com retificadora no braço robótico industrial foi necessária para observar as possibilidades e limitações na fabricação das peças de formas simples e complexas. Os softwares de controle paramétrico de robôs da marca *KUKA - KUKA prc* - e, o simulador de aplicações de robôs industriais em geral - *RoboDK* - foram utilizados para realizar as simulações.

### 2.7.5.2 Simulação da aplicação robótica

A simulação das aplicações robóticas foram realizadas em 3 fases: 1) Modelagem do dispositivo de corte a fio quente, 2) Simulação em braço robótico industrial da marca *KUKA*, 3) Simulação em braço robótico industrial da marca *Yaskawa - Motoman*.

O dispositivo de corte a fio quente foi modelado no *software rhinoceros 5.0* e convertido em malha para sua utilização nos softwares para simulação de aplicações robóticas. O dispositivo foi projetado com perfil retangular de 0,035m x 0,025m com as dimensões de 1m x 1m. Onde, a parte superior teve a dimensão de 1,50m para a colocação das partes de fixação do dispositivo.



Figura 153: Modelagem do dispositivo de corte a fio quente para o braço robótico industrial. Fonte: Própria

Na simulação em braço robótico industrial da marca *KUKA* foram realizadas duas simulações com diferentes dispositivos.

A primeira simulação foi realizada com o dispositivo de corte a fio quente no robô de marca *KUKA - KR120 R1800 nano* no modelo da peça de forma simples, modelo 1, no *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *KUKA prc*. Nesta simulação, o movimento do dispositivo de corte foi executado no eixo “Y” a partir do planejamento de 5 parâmetros: 1) Definição do ponto de início do movimento do robô, 2) Definição do ponto de aproximação ao bloco para corte, 3) Definição da sequência de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte, 4) Definição do ponto de retração do robô e, 5) Retorno ao ponto de início do movimento do robô.

A segunda simulação foi realizada com uma retificadora no robô de marca *KUKA – KR5 2* no modelo da peça de forma complexa, modelo 3, no *software rhinoceros 5.0* e os *plugins grasshopper* e *KUKA prc*. Nesta simulação, o movimento do dispositivo de corte foi

executado ao redor da peça de baixo para cima a partir do planejamento de 5 parâmetros: 1) Definição do ponto de início do movimento do robô, 2) Definição do ponto de aproximação ao bloco para corte, 3) Definição da sequência de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte, 4) Definição do ponto de retração do robô e, 5) Retorno ao ponto de início do movimento do robô.

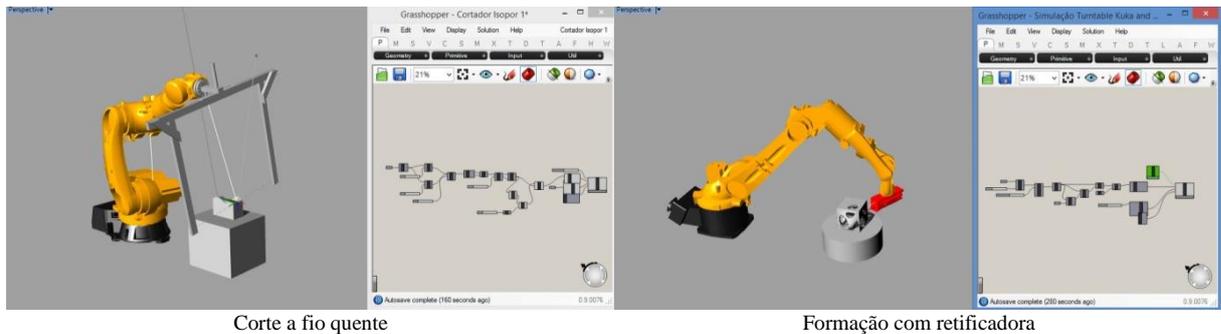


Figura 154: Simulações computacionais de corte a fio quente e formação com retificadora utilizando o *plugin kuka prc* no *plugin grasshopper* no *rhinoceros 5.0* de modelos de peças de formas simples e complexa, respectivamente. Fonte: Própria

Embora as simulações foram feitas em robôs da marca *KUKA*, não foi possível encontrar um robô dessa marca acessível para realizar os testes reais. Em tal situação, duas simulações com o dispositivo de corte a fio quente nas peças de formas simples e semicomplexa, modelo 1 e modelo 2, foram realizadas na célula robótica do robô *Yaskawa Motoman - HP20D A80*, encontrada no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação - *LAMAF* - da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás. A célula robótica foi modelada no *software rhinoceros 5.0* e exportada para o *software RoboDK*.

A primeira simulação foi realizada no modelo da peça de forma simples, modelo 1. Nesta simulação, o movimento do dispositivo de corte foi executado nos eixos “Y” e “Z” a partir do planejamento de 5 parâmetros: 1) Definição do ponto de início do movimento do robô, 2) Definição do ponto de aproximação ao bloco para corte, 3) Definição da sequência de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte, 4) Definição do ponto de retração do robô e, 5) Retorno ao ponto de início do movimento do robô.



Figura 155: Simulação computacional de corte a fio quente utilizando o *software robodk* de modelo de peça de forma simples. Fonte: Própria

A segunda simulação foi realizada no modelo da peça de forma semicomplexa, modelo 2. Nesta simulação, o movimento do dispositivo de corte foi executado nos eixos “X”, “Y” e “Z” a partir do planejamento de 5 parâmetros: 1) Definição do ponto de início do movimento do robô, 2) Definição do ponto de aproximação ao bloco para corte, 3) Definição da sequência de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte, 4) Definição do ponto de retração do robô e, 5) Retorno ao ponto de início do movimento do robô.

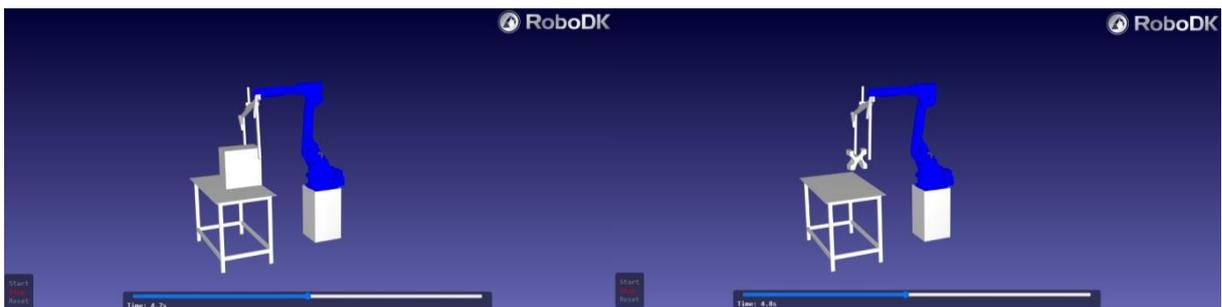


Figura 156: Simulação computacional de corte a fio quente utilizando o *software robodk* de modelo de peça de forma complexa. Fonte: Própria

Assim, na simulação da aplicação robótica foi observado que qualquer dispositivo pode ser modelado em 3D para ser utilizado no braço robótico industrial, que a estratégia de fabricação depende da complexidade da peça, que o tamanho da peça a ser fabricada depende dos limites de movimentação do braço robótico industrial na célula robótica.

Nesse sentido, a construção do dispositivo de corte a fio quente foi necessária para realizar as simulações reais no braço robótico industrial *Yaskawa Motoman – HP20D A80*.

### 2.7.5.3 Construção do dispositivo de corte a fio quente para braço robótico industrial

A construção do dispositivo foi realizada em 2 partes. Uma parte da estrutura e a outra parte do alimentador de energia do fio de corte.

A parte da estrutura foi composta pela conexão com o braço robótico industrial e o suporte para o fio de corte. A conexão com o braço robótico industrial foi construída utilizando uma placa de aço, um tubo eletrosoldado isolado com fita de autofusão e soldadura. Onde, a placa de aço teve as dimensões de: 0,30m x 0,06m x 0,005m; o tubo eletrosoldado teve a dimensão de 0,20m e 0,005 de diâmetro.

O suporte para o fio de corte foi construído utilizando um perfil de alumínio de 0,035m x 0,025m. No perfil foram cortados 5 componentes nas dimensões a seguir: 1,50m (1), 1,00m (2), 0,30m. E, os componentes foram unidos utilizando parafusos, arruelas e porcas borboleta.



Figura 157: Construção do dispositivo de corte a fio quente para o braço robótico industrial. Fonte: Própria

A parte do alimentador de energia do fio de corte foi construído utilizando um transformador de 220 volts/110 volts para 12 volts, um *dimmer* para ventilador e fios elétricos.



Figura 158: Transformador industrial de 220 volts/110 volts para 12 volts. Fonte: Própria

Assim, na construção do dispositivo de corte a fio quente para braço robótico industrial foi observada a necessidade de que o dispositivo seja rígido, leve, de material que não conduza a energia e, que o fio de níquel seja tensionado automaticamente.

Nesse sentido, o dispositivo pode ser construído no tamanho necessário segundo o trabalho a ser executado utilizando um perfil de alumínio de seção circular, conformado por uma única peça em forma de U, revestido de fita isolante e, com uma mola para manter o fio de níquel tensionado.

#### *2.7.5.4 Testes de corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em bloco de isopor*

O robô de marca *Yaskawa Motoman - HP20D A80* de capacidade de carga de 20 kg, alcance vertical de 3063mm e, alcance horizontal de 1717mm foi utilizado nos testes de corte de isopor. O robô faz parte de uma célula robótica de soldagem.

Dois testes de corte de isopor por controle manual foram realizados com o dispositivo instalado no braço robótico industrial: 1) Corte reto com controle manual e, 2) Corte livre com controle manual.

No corte reto com controle manual foram testadas a velocidade de corte e a tensão elétrica no fio de níquel. Neste teste foi observado que a velocidade de corte e a tensão no fio de níquel dependem do tipo de material que será cortado. No bloco de isopor que foi utilizado, de densidade F1, foram obtidos resultados satisfatórios no corte com a velocidade de 10mm/seg e a tensão elétrica de 2 volts.



Figura 159: Teste de corte reto com controle manual de isopor com o robô *yaskawa motoman – hp20d a20*.  
Fonte: Própria

No corte livre com controle manual foram testadas a velocidade de corte e a tensão elétrica no fio de níquel. Neste teste foi observado que com a velocidade automática do robô e a tensão elétrica de 2 volts no fio de níquel também foram obtidos resultados satisfatórios.



Figura 160: Teste de corte livre com controle manual de isopor com o robô *yaskawa motoman – hp20d a20*.  
Fonte: Própria

Assim, nos testes de corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em bloco de isopor foi observado que a velocidade de corte e a tensão elétrica no fio de níquel dependem do material que vai ser cortado, que previamente ao corte de uma peça tem que ser feitos os testes para encontrar a velocidade de corte e a tensão elétrica necessária no fio de níquel e, que o corte com controle manual não permite a reprodução do corte seja reto ou livre.

Nesse sentido, testes automatizados foram necessários para verificar a reprodução do corte em peças de formas simples e semicomplexas.

#### *2.7.6.5 Testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa em isopor*

Dois testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa foram realizados em isopor: 1) Corte do modelo de peça de forma simples e, 2) Corte do modelo de peça de forma semicomplexa.

No corte do modelo de peça de forma simples foram testadas a velocidade automática do braço robótico e a tensão elétrica de 2 volts no fio de níquel. Neste teste foi observado que a suavidade da superfície de corte depende do número de pontos configurados no eixo imaginário para o movimento do dispositivo de corte. Na superfície obtida do corte podem ser

observadas as marcas do deslocamento do dispositivo de corte de um ponto para outro, a superfície ficou com uma aparência facetada. Ver figura logo abaixo.



Figura 161: Corte a fio quente no braço robótico industrial de modelo de peça de forma simples. Fonte: Própria

No corte do modelo de peça de forma semicomplexa foram testadas a velocidade automática do braço robótico e a tensão elétrica de 2 volts no fio de níquel. Neste teste foi confirmado que a suavidade da superfície de corte depende do número de pontos configurados no eixo imaginário para o movimento do dispositivo de corte. Nas superfícies obtidas dos cortes pode ser observada a continuidade do deslocamento do dispositivo de corte de um ponto para outro, as superfícies ficaram com uma aparência suave.



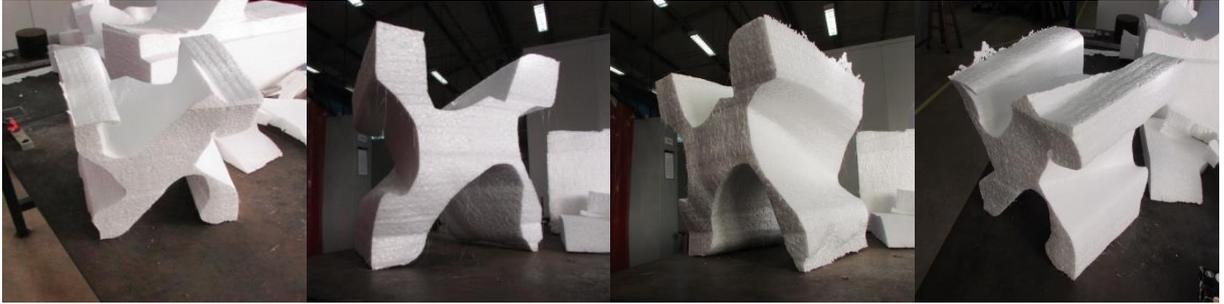


Figura 162: Corte a fio quente no braço robótico industrial de modelo de peça de forma complexa. Fonte: Própria Assim, nos testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa em isopor foi observado que formas complexas com perfurações interiores não podem ser fabricadas com o dispositivo de corte a fio quente, que formas complexas sem perfurações podem ser fabricadas com o corte a fio quente a partir de cortes em diferentes direções, que para conseguir uma superfície de aparência suave é necessário configurar o maior número possível de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte e, que uma baixa velocidade de deslocamento do dispositivo de corte e uma tensão elétrica de 2 volts no fio de níquel permitem resultados satisfatórios nos cortes.

#### 2.7.5.6 Resultados dos cortes

Os resultados dos testes de corte automatizado a fio quente em braço robótico industrial das peças de formas simples e semicomplexa apresentaram deformações em relação aos modelos digitais.

Na peça de forma simples a deformação correspondeu ao facetamento da superfície resultado do corte. No modelo digital da peça, a superfície resultado do corte foi projetada para ser uma superfície de onda suave.



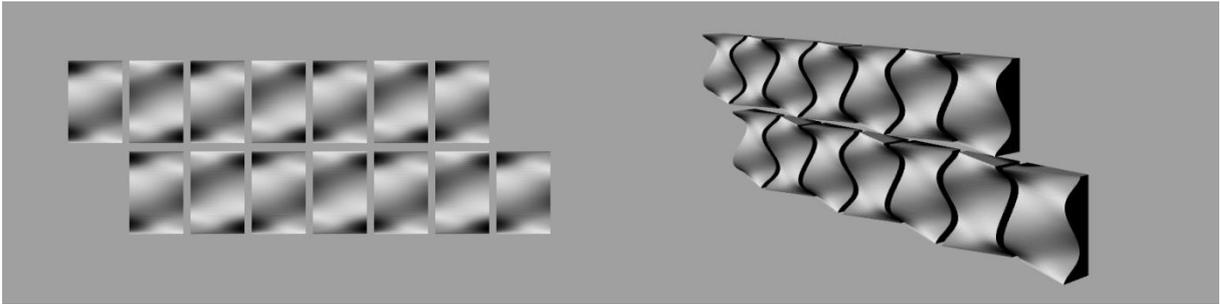


Figura 163: Comparação do painel obtido com o painel projetado digitalmente. Fonte: Própria

Na peça de forma semicomplexa a deformação foi maior e correspondeu à descontinuidade das superfícies curvadas da peça. No modelo digital da peça, as superfícies curvadas resultadas do corte foram projetadas para serem superfícies contínuas.

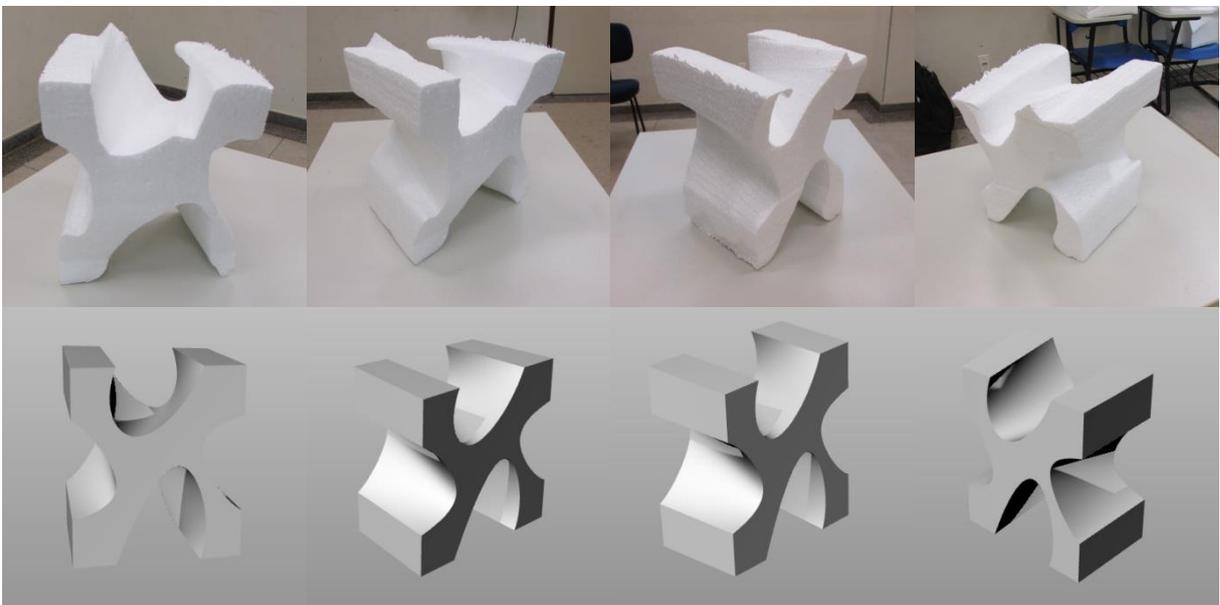


Figura 164: Comparação da peça obtida com a peça projetada digitalmente. Fonte: Própria

Assim, nos resultados dos cortes automatizados das peças de formas simples e semicomplexa foi observado que quanto maior quantidade de pontos de controle forem colocados no eixo do deslocamento do dispositivo de corte, mais suave será a superfície curvada. E; que quanto mais acentuada seja a superfície curvada, maior será a deformação da peça.

Nesse sentido, o corte automatizado com fio quente em braço robótico industrial é mais eficiente quando as superfícies curvadas são suaves e, quando são configurados mais pontos de controle no eixo do deslocamento do dispositivo. E, formas complexas sem perfurações podem ser fabricadas utilizando maior quantidade de cortes de formas simples.

#### 2.7.5.7 Observação na fabricação robótica de peça com corte a fio quente

Assim, sendo que:

Na preparação dos modelos das peças com diferentes níveis de complexidade nas formas foi observado que o modelo de forma complexa precisaria de uma estratégia diferente de fabricação devido a que a parte interna da peça não podia ser cortada com o dispositivo de corte a fio quente no braço robótico industrial.

Na simulação da aplicação robótica foi observado que qualquer dispositivo pode ser modelado em 3D para ser utilizado no braço robótico industrial, que a estratégia de fabricação depende da complexidade da peça, que o tamanho da peça a ser fabricada depende dos limites de movimentação do braço robótico industrial na célula robótica.

Na construção do dispositivo de corte a fio quente para braço robótico industrial foi observada a necessidade de que o dispositivo seja rígido, leve, de material que não conduza a energia e, que o fio de níquel seja tensionado automaticamente.

Nos testes de corte controlado manualmente a fio quente no braço robótico industrial em bloco de isopor foi observado que a velocidade de corte e a tensão elétrica no fio de níquel dependem do material que vai ser cortado, que previamente ao corte de uma peça tem que ser feitos os testes para encontrar a velocidade de corte e a tensão elétrica necessária no fio de níquel e, que o corte com controle manual não permite a reprodução do corte seja reto ou livre.

Nos testes de corte automatizado a fio quente no braço robótico industrial dos modelos das peças de formas simples e semicomplexa em isopor foi observado que formas complexas com perfurações interiores não podem ser fabricadas com o dispositivo de corte a fio quente, que formas complexas sem perfurações podem ser fabricadas com o corte a fio quente a partir de cortes em diferentes direções, que para conseguir uma superfície de aparência suave é necessário configurar o maior número possível de pontos para o deslocamento do dispositivo de corte e, que uma baixa velocidade de deslocamento do dispositivo de corte e uma tensão elétrica de 2 *volts* no fio de níquel permitem resultados satisfatórios nos cortes.

Nos resultados dos cortes automatizados das peças de formas simples e semicomplexa foi observado que quanto maior quantidade de pontos de controle forem colocados no eixo do deslocamento do dispositivo de corte, mais suave será a superfície curvada. E; que quanto mais acentuada seja a superfície curvada, maior será a deformação da peça.

Em tais observações, nesta tese, será adotado que:

Peças com formas complexas com perfurações não podem ser produzidas com fabricação robótica industrial automatizada com subtração por corte a fio quente. Mas peças de formas complexas de superfícies suaves sem perfurações podem ser produzidas utilizando vários cortes em diferentes direções e configurando a maior quantidade possível de pontos no eixo do movimento de corte.

#### 2.7.6 Síntese

Nesta tese será adotada a proposição a seguir:

Confirmou-se em parte a hipótese guia do experimento. As tecnologias digitais - *software rhinoceros 5.0*, *software grasshopper*, *Autodesk T-spline para rhinoceros* - permitem projetar uma peça biônica inspirada nas estruturas naturais encontradas nas cascas dos frutos das espécies frutíferas da atemoia, buriti, coco babaçu, graviola e pinha ou fruta do conde. E, as tecnologias para fabricação digital – *software cura 15.04.6*, impressora *reprap anet a8*, célula robotizada de soldagem Robô *HP-20 Yaskawa Motoman* com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocessado, *Kuka prc*, *RoboDK* - permitem a produção de um protótipo de peça biônica em isopor pelo processo de corte com fio quente em braço robótico industrial. Na cidade de Goiânia (GO)

A partir da observação na tabela a seguir:

Tabela 17: Observação no Protocolo do Experimento 7

Nº	Fase	Materiais/Processos/Equipamentos	Observações
1	Preparação do Modelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros;</i></li> <li>▪ <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>▪ Filamento de ácido polilático – <i>PLA.</i></li> </ul>	<p>Peças com formas complexas com perfurações não podem ser produzidas com fabricação robótica industrial automatizada com subtração por corte a fio quente. Mas peças de formas complexas de superfícies suaves sem perfurações podem ser produzidas utilizando vários cortes em diferentes direções e configurando a maior quantidade possível de pontos no eixo do movimento de corte.</p>
2	Simulação da aplicação robótica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Software RoboDK.</i></li> </ul>	
3	Preparação do cortador a fio quente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Perfil de alumínio;</li> <li>▪ Fio de níquel;</li> <li>▪ Transformador industrial com dimmer de 220 volts/110 volts para 12volts.</li> </ul>	
4	Simulação de corte controlado manualmente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Célula robotizada de soldagem - Robô HP-20 Yaskawa Motoman com capacidade de carga de 20 kg e</li> </ul>	

		<p>manipulador multiprocesso;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cortador com fio quente;</li> <li>▪ Transformador industrial com dimmer de 220 volts/110 volts para 12volts;</li> <li>▪ Isopor de densidade F1.</li> </ul>	
5	Simulação de corte automatizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Célula robotizada de soldagem - Robô HP-20 Yaskawa Motoman com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocesso;</li> <li>▪ Cortador com fio quente;</li> <li>▪ Transformador industrial com dimmer de 220 volts/110 volts para 12volts;</li> <li>▪ Isopor de densidade F1.</li> </ul>	
6	Resultado	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isopor de densidade F1.</li> </ul>	

## CONCLUSÕES

Acredita-se que a presente tese constitui-se uma contribuição nova e original ao conhecimento por ter-se demonstrado o seguinte:

Um conjunto de técnicas digitais e robóticas podem viabilizar a projeção, fabricação e construção de uma arquitetura biomimética, de forma complexa, celular e responsiva em Brasília, DF.

Tabela 18: Protocolo de Projeção-Fabricação-Construção.

Projeção				Fabricação Industrial	Construção
Pavilhão	Células	Reformulação do Pavilhão	Células e Painéis/ Responsivos	Células	Células e Pavilhão
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protótipo em Papelão (Modelagem 3D digital - fabricação digital - fabricação manual);</li> <li>▪ Protótipo em <i>PLA</i></li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Protótipo em Papel e Papelão (Modelagem manual - fabricação manual);</li> <li>2. Protótipo em <i>PLA</i> (Modelagem 3D -</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Protótipo em Resina (Modelagem 3D digital - fabricação digital);</li> <li>2. Modelo 3D para BIM (Modelagem 3D</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protótipo em Resina (Modelagem 3D digital - fabricação digital).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protótipo por Fundição de liga Metálica com Modelo Perdido (Modelagem 3D digital - fabricação digital - fabricação industrial);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diretrizes para execução da construção das células e do Pavilhão.</li> </ul>

(Modelagem 3D digital - fabricação digital).	fabricação digital); 3. Protótipo em Resina (Modelagem 3D - fabricação digital).	digital).		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protótipo em Resina ou Ligas Metálicas (Modelagem 3D digital - fabricação digital).</li> </ul>	
--	---	-----------	--	---	--

Tabela 19: Possibilidades e Limitações das tecnologias digitais utilizadas nos Experimentos

Nº	Experimento	Processo	Tecnologias Digitais de Modelagem 3D	Tecnologias de Fabricação Digital	Outras tecnologias	Possibilidades	Limitações
1	Projeção e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Levantamento Fotográfico;</li> <li>2. Maquete Rápida de Papel;</li> <li>3. Restituição Fotogramétrica;</li> <li>4. Parametrização;</li> <li>5. Prototipagem Rápida 3D;</li> <li>6. Planejamento da Fabricação;</li> <li>7. Fabricação;</li> <li>8. Montagem.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Autodesk ReCap Pro;</i></li> <li>2. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>3. <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>4. <i>Software Coreldraw 7.0.</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impressora 3D <i>Delta;</i></li> <li>2. Impressora <i>RepRap Uberblock;</i></li> <li>3. <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>4. Cortadora a Laser de marca <i>Thunder Laser</i>, modelo Nova 51, mesa de corte de 1400mm x1030mm;</li> <li>5. Cortadora a Laser de marca <i>Laser Engraving &amp; Cutting Machine</i>, mesa</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Câmera Fotográfica de marca DSLR Nikon modelo D600.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ As maquetes rápidas de papel com dobraduras de formas irregulares (papel amassado) apresentam maiores opções na definição de formas de superfície de dupla curvatura.</li> <li>▪ A restituição fotogramétrica da maquete rápida de papel com dobraduras irregulares, papel amassado, permite parametrizar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A fabricação por corte 2D ou corte por contorno é um processo de produção manual que apresenta limitação em termos de correspondência do artefato produzido e o modelo digital, redução da resistência do artefato função do aumento de tamanho.</li> <li>▪ A fabricação digital- manual gera maior deformação no</li> </ul>

				<p>de corte de 1400mm x1030mm.</p> <p>6. <i>Software Thunder Laser;</i></p> <p>7. <i>Software Lasercut 5.3;</i></p> <p>8. Papelão de onda simples, formato de 1,40 m x 1,00 m.</p>		<p>melhor as curvaturas do modelo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A parametrização e prototipagem do modelo permite o estudo das estratégias de fabricação digital e uso final, estudo do planejamento da fabricação, a própria fabricação e a montagem do produto final.</li> </ul>	<p>artefato final quando comparado com uma fabricação digital.</p>
2	<p>Projeção Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Código Gráfico;</li> <li>2. Operacionalização da Fabricação;</li> <li>3. Tecnologia de Fabricação Digital;</li> <li>4. Fabricação Digital.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>2. <i>Software Grasshopper;</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impressora RepRap Uberblock;</li> <li>2. Impressora RepRap Anet A8;</li> <li>3. Software Cura 15.04.6;</li> <li>4. Filamento de ácido poliláctico - PLA.</li> </ol>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A projeção digital utilizando código gráfico permite a customização de formas de geometrias não euclidianas e euclidianas em massa automaticamente e guardando as proporções estabelecidas na projeção dos componentes.</li> <li>▪ A fabricação por filamento fundido utilizando o</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ O tamanho máximo do artefato depende diretamente do tamanho da mesa de impressão da impressora 3D disponível para realizar a fabricação.</li> </ul>

						<p>filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i> - em uma impressora <i>RepRap</i> é um processo de fabricação rápido, de boa resolução de impressão e com continuidade de adesão entre as camadas do objeto produzido.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ O modelo 3D de tamanho reduzido é necessário para estudar e analisar a operacionalização da montagem do artefato.</li> </ul>	
3	<p>Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinação das características estruturais das cascas dos frutos;</li> <li>2. Determinação da forma da célula estrutural;</li> <li>3. Tecnologia de fabricação digital.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>2. <i>Software Grasshopper.</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>2. Impressora <i>Moonray S;</i></li> <li>3. <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>4. <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6.</i></li> <li>5. Filamento de</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Metalizador <i>Belzier SCD 050;</i></li> <li>2. Microscópio <i>MEV Jeol JSM-7000F.</i></li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ As tecnologias de modelagem 3D digital, na mistura da modelagem direta e modelagem por programação, são ferramentas importantes que permitem a modelagem e manipulação de formas complexas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Superfícies com mais de 45 graus de inclinação não são recomendáveis para serem produzidas pelas tecnologias de fabricação digital por adição em filamento fundido. Nas superfícies com mais de 45 graus de inclinação</li> </ul>

				<p>ácido poliláctico - <i>PLA</i>;</p> <p>6. Resina Moonray Gray.</p>		<p>inspiradas nas estruturas naturais.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A fabricação digital por adição utilizando a tecnologia de processamento de luz direta sobre resina permite a produção de formas complexas inspiradas em estruturas naturais com uma alta qualidade de impressão, rapidez, resistência e prontas para uso.</li> </ul>	<p>se encontram falhas de adesão entre as camadas, deformação na fabricação e alta geração de resíduos pelo uso de suportes de apoio para a impressão.</p>
4	Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definição da Forma;</li> <li>2. Modelagem Computacional;</li> <li>3. Simulação Computacional;</li> <li>4. Prototipagem Rápida 3D;</li> <li>5. Exportação para BIM.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>2. <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>3. <i>Software Ecotect 5.5</i></li> <li>4. <i>Software Ladybug;</i></li> <li>5. <i>Software Autodesk Flow Design;</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Impressora <i>Moonray S.</i></li> <li>2. <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6;</i></li> <li>3. Resina Moonray Gray.</li> </ol>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ O uso de código gráfico permite estabelecer parâmetros segundo uma determinada necessidade. O código gráfico pode ser mais complexo em função da necessidade de controle dos parâmetros de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quanto mais complexa for a forma da célula em termos de quantidade de componentes, mais demorada será a modelagem da superfície. E, quanto mais complexa a forma da célula, maior será a demanda por memória e</li> </ul>

			6. <i>Software Archicad 23.</i>			<p>entrada de informação.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Células estruturais compostas por elementos que emulenn fibras e com forma pontuda na parte externa permitem uma menor pressão do vento e uma boa passagem do vento através das células.</li> <li>▪ Estruturas naturais podem ser fabricadas com impressão 3D utilizando a tecnologia de processamento por luz direta em resina.</li> </ul>	<p>velocidade de processamento do computador.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ As modelagens compostas por malhas demandam maior memória do computador.</li> </ul>
5	Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas	<p>1. Estudos preliminares;</p> <p>2. Experimentação e Prototipagem de células;</p> <p>3. Prototipagem de</p>	<p>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></p> <p>2. <i>Software Grasshopper;</i></p> <p>3. <i>Software</i></p>	<p>1. <i>Software Cura 15.04.6;</i></p> <p>2. <i>Software Sprintray Rayware 1.4.6;</i></p> <p>3. Impressora</p>	<p>1. <i>Arduino;</i></p> <p>2. <i>Tinta fotocrômica;</i></p> <p>3. <i>Placas de Alumínio;</i></p> <p>4. <i>Madeira (pinus ou eucalipto).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Células responsivas autônomas podem ser produzidas com tecnologias de fabricação digital (fabricação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Células biônicas com superfícies com mais de 45 graus de inclinação não são recomendáveis para serem</li> </ul>

		painéis.	<i>Autodesk T-spline para rhinoceros.</i>	<i>RepRap Anet A8;</i> 4. Impressora <i>Moonray S;</i> 5. Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA;</i> 6. Resina <i>Moonray Gray.</i>		por adição com processamento de luz direta em resina) e robótica ou com materiais que reajam aos fatores ambientais.	produzidas pelas tecnologias de fabricação digital por adição em filamento fundido. Nessas células se encontram falhas de adesão entre as camadas, deformação na fabricação e alta geração de resíduos pelo uso de suportes de apoio para a impressão.
6	Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preparação do Modelo;</li> <li>2. Estudo da aplicação do material fundido;</li> <li>3. Preparação dos fornos para fundição do material;</li> <li>4. Preparação do Modelo na caixa de areia;</li> <li>5. Aplicação do material fundido;</li> <li>6. Retiro da peça da caixa de areia.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>2. <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>3. <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros.</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>2. Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>3. Filamento de ácido poliláctico – <i>PLA.</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forno Elétrico <i>JUNG</i> Modelo 3810;</li> <li>2. Forno de Fundição <i>FORTELAB</i> Modelo POB 1300-7;</li> <li>3. Caixa com areia.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A peça biônica poderia ser fabricada por processamento de luz direta em resina em uma impressora 3D de grandes formatos com resina calcinável para produzir o molde para a conformação por fundição de ligas metálicas. Ou, a peça poderia ser fabricada em resina de alta resistência ou</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A fabricação da peça biônica por fundição de ligas metálicas com modelo perdido produzido em <i>PLA</i> precisa de maior pesquisa.</li> </ul>

						direto em ligas metálicas para seu uso direto. Mas essa observação ainda precisa de mais pesquisa.	
7	Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preparação do Modelo;</li> <li>2. Simulação da aplicação robótica;</li> <li>3. Preparação do cortador a fio quente;</li> <li>4. Simulação de corte controlado manualmente;</li> <li>5. Simulação de corte automatizado;</li> <li>6. Resultado.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Software Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>2. <i>Software Grasshopper;</i></li> <li>3. <i>Software Autodesk T-spline para rhinoceros.</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. <i>Software Cura 15.04.6;</i></li> <li>5. Impressora <i>RepRap Anet A8;</i></li> <li>6. Filamento de ácido polilático – <i>PLA;</i></li> <li>7. <i>Software RoboDK;</i></li> <li>8. Célula robotizada de soldagem - Robô HP-20 Yaskawa Motoman com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocesso.</li> </ol>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças de formas complexas de superfícies suaves sem perfurações podem ser produzidas utilizando vários cortes em diferentes direções e configurando a maior quantidade possível de pontos no eixo do movimento de corte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peças com formas complexas com perfurações não podem ser produzidas com fabricação robótica industrial automatizada com subtração por corte a fio quente.</li> </ul>

Impressoras 3D desktop para fabricação por filamento fundido e processamento por luz direta em resina, cortadoras a plasma e a laser, máquinas de usinagem e células robóticas foram localizadas nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO):

Tabela 20: Máquinas controladas por Computador nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).

Nº	Equipamento	Empresa/Instituição	Cidade/Estado
1	Impressora 3D desktop.	Laboratório de Design - LADES/Protip (Prototipagem) do Departamento de Design da Universidade de Brasília.	Brasília/Distrito Federal
2	Impressora ZCorp Printer 310	Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa (LFDC) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.	
3	Modela MDX-40A 3D Milling Machine		
4	Células robotizadas de soldagem - Robôs ABB	Laboratório de Processos de Soldagem no Grupo de Automação e Controle (GRACO) da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.	
5	Cortadora a Plasma	GRAVIA	RA Taguatinga/Distrito Federal
6	Cortadora a Laser de marca Thunder Laser - modelo Nova 51, mesa de corte de 1400mm x1030mm.	Recortes a Laser	
7	Impressora 3D desktop da marca RepRap Anet A8	Juan Carlos Guillen Salas	Goiânia/Goiás
8	Impressora 3D desktop da marca Creality LD-002R		
9	Impressora 3D de marca Moonray S		

		Inovação da Universidade Federal de Goiás.	
10	Cortadora a Laser de marca Laser Engraving & Cutting Machine - mesa de corte de 1400mm x1030mm.	Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG)	
11	Célula robotizada de soldagem - Robô HP-20 Yaskawa Motoman com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocessado.		
12	Centro de usinagem ROMI – Modelo D600		

Máquinas curvadoras de tubos controladas por computador e Impressoras 3D de grandes formatos não foram encontradas nas cidades de Brasília (DF) e Goiânia (GO).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS E PESQUISAS FUTURAS

No desenvolvimeto dos experimentos foram levantados vários questionamentos em relação as tecnologias digitais e robóticas que permitiriam a fabricação do protótipo do pavilhão biomimético de forma complexa, celular e responsivo em escala 1:1.

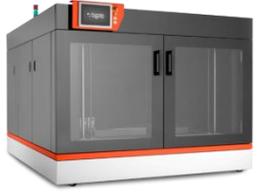
Esses questionamentos apontaram como tecnologias promissoras para alcançar esse objetivo: Usinagem em braço robótico industrial, impressão 3D com braço robótico industrial, impressora 3D para grandes formatos com filamento fundido, impressora 3D para grandes formatos com processamento de luz direta em resina ou liga metálica e, curvamento de tubos em máquinas com controle numérico por computador.

Mas, considerando a possibilidade da fabricação de formas complexas de geometrias não euclidianas inspiradas em formas naturais, a tecnologia de impressão 3D para grandes formatos com processamento de luz direta em resina ou liga metálica se apresenta como a mais promissora alternativa para a fabricação do protótipo do pavilhão na escala 1:1.

Tabela 21: Sugestão para Pesquisas Futuras

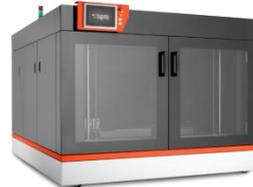
Nº	Experimento	Questionamentos	Hipóteses	Tecnologia Alternativa
1	<p>Experimento 1: Projetação e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1</p>	<p>Como deveria ser o processo de fabricação do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa para evitar ou diminuir a deformação no produto final em relação ao modelo digital?</p>	<p>Que o protótipo do pavilhão biônico poderia ser fabricado com a tecnologia de usinagem por braço robótico industrial com 6 eixos. Utilizando como materiais: Isopor de média densidade e fibra de vidro com resina. O isopor seria utilizado para usinar os moldes das peças e, a fibra de vidro com a resina seriam para conformar as peças. E, também, o protótipo do pavilhão poderia ser fabricado utilizando com a tecnologia de impressão 3D por processamento de luz direta em resina, ligas metálicas ou outros.</p>	<p>Robô industrial da marca KUKA da série KR CYBERTECH com capacidade de carga de 8-22kg e com raio de alcance de 1612-2013mm ou similar em outras marcas.</p>  <p>Fonte: <a href="http://www.kuka.com/pt-br">www.kuka.com/pt-br</a></p> <p>Impressora 3D ProX 950 e Resina FabPro Proto GRY ou similares.</p>  <p>Fonte: <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>

		<p>Como seria a estrutura de suporte para o pavilhão, se ele for construído com células de pouca resistência e leves?</p>	<p>Que a estrutura de suporte do pavilhão poderia ser modelada em 3D para ser desmontável e fabricada com perfil circular de alumínio. Utilizando uma máquina curvadora de tubos controlada numericamente por computador para dar a forma curva aos perfis de alumínio.</p>	<p>Curvadora de Tubos 3D com Furação – TM-TH32 3D-F da marca TECNOMAQ com controle numérico por computador ou similar em outras marcas.</p>  <p>Fonte: www. <a href="https://www.tecnomaqcurvadoras.com.br/">https://www.tecnomaqcurvadoras.com.br/</a></p>
2	<p>Experimento 2: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido</p>	<p>Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição que permita a produção das peças quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas em escala 1:1?</p>	<p>Que o protótipo do pavilhão biônico poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato de processamento de luz direta. Utilizando como material de fabricação resina.</p>	<p>Uma impressora 3D com processamento de luz direta seria necessária para a construção do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa celular em escala 1:1: Impressora 3D ProX 950 e Resina FabPro Proto GRY ou similares.</p> 

3	<p>Experimento 3: Projetação Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde</p>	<p>Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição que permita a produção das peças quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas em escala 1:1?</p>	<p>Que o protótipo da célula estrutural poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora para filamento fundido. Utilizando como material de fabricação os filamentos de Nylon ou ASA.</p> <p>Que o protótipo da célula estrutural poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato de processamento de luz direta. Utilizando como material de fabricação resina.</p>	<p>4 impressoras 3D poderiam ser utilizadas na fabricação das células estruturais em grandes formatos dependendo da inclinação das superfícies das células. Das quais, 3 impressoras são por fundição de filamento e 1 impressora por processamento de luz direta em resina. Onde, as impressoras BigBot, BigRep e a impressora 3D em braço robótico industrial seriam para fabricar células com uma inclinação máxima de 45 graus:</p> <div style="text-align: center;">  <p>Impressora 3D BigBot. Fonte: <a href="https://www.wietech.com.br/bigbot/">https://www.wietech.com.br/bigbot/</a></p>  <p>Impressora 3D BigRep Pro. Fonte: <a href="https://bigrep.com/bigrep-pro/">https://bigrep.com/bigrep-pro/</a></p> </div>
---	---	---	--	---

				 <p>Impressora 3D em Braço Robótico KUKA. Fonte: <a href="https://twitter.com/ai_build">https://twitter.com/ai_build</a></p> <p>E; a impressora ProX 950 poderia ser utilizada para fabricar células com qualquer inclinação.</p>  <p>Impressora 3D ProX 950. Fonte: <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>
4	Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa	Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição que permita a produção das peças quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas em escala 1:1?	Que o protótipo do pavilhão biônico poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato de processamento de luz direta. Utilizando como material de fabricação resina.	Uma impressora 3D com processamento de luz direta seria necessária para a construção do protótipo do pavilhão biônico de forma complexa celular em escala 1:1: Impressora 3D ProX 950 e Resina FabPro Proto GRY ou similares.

				 <p>Impressora 3D ProX 950. Fonte: <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>
5	<p>Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas</p>	<p>Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição que permita a produção das peças de grande formato quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas?</p>	<p>Que o protótipo de painel de células responsivas poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato para filamento fundido. Utilizando como material de fabricação os filamentos de Nylon ou ASA.</p> <p>Que o protótipo de painel de células responsivas poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato de processamento de luz direta. Utilizando como material de fabricação resina.</p>	<p>3 impressoras 3D de grandes formatos poderiam ser utilizadas na fabricação do protótipo de painel de células responsivas, dependendo da inclinação das superfícies das células. Das quais, 2 impressoras produzem peças por fundição de filamento e, 1 impressora produz peças por processamento de luz direta em resina. Onde, as impressoras BigBot e BigRep, impressoras que produzem peças por fundição de filamento, seriam para fabricar células com uma inclinação máxima nas superfícies de 45 graus e; a impressora ProX 950, que produz peças por processamento de luz direta, poderia ser utilizada para fabricar células com superfícies de qualquer inclinação.</p> 

				<p>Impressora 3D BigBot. Fonte:  <a href="https://www.wietech.com.br/bigbot/">https://www.wietech.com.br/bigbot/</a></p>  <p>Impressora 3D BigRep Pro. Fonte:  <a href="https://bigrep.com/bigrep-pro/">https://bigrep.com/bigrep-pro/</a></p>  <p>Impressora 3D ProX 950. Fonte:  <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>
6	Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica	Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição em liga metálica que permita a produção das peças de grande formato quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas?	Que o protótipo de peça biônica poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato para ligas metálicas. Utilizando como material de fabricação a liga de alumínio.	Uma impressora 3D com processamento de luz direta seria necessária para a construção do protótipo de peça biônica de forma complexa celular em grande formato: Impressora 3D ProX 950 e liga de alumínio LaserForm AISi10Mg (A) ou similares.

				 <p>Impressora 3D ProX 950. Fonte: <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>
7	Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente	Qual seria a tecnologia de fabricação digital por adição em liga metálica que permita a produção das peças de grande formato quase sem deformação e sem falhas nas superfícies das formas complexas ou de geometrias não euclidianas?	Que o protótipo de peça biônica poderia ser fabricado pela tecnologia por adição em impressão 3D em uma impressora de grande formato para ligas metálicas. Utilizando como material de fabricação a liga de alumínio.	<p>Uma impressora 3D com processamento de luz direta seria necessária para a construção do protótipo de peça biônica de forma complexa celular em grande formato: Impressora 3D ProX 950 e liga de alumínio LaserForm AlSi10Mg (A) ou similares.</p>  <p>Impressora 3D ProX 950. Fonte: <a href="https://br.3dsystems.com/">https://br.3dsystems.com/</a></p>

## REFERÊNCIAS

- ACAR, M. S. *Bio-inspired design of a kinetic node for adaptable structures*. 2011. 132 f. Dissertação (Master of Science in Architecture) – Department of Architecture, Graduate School of Engineering and Sciences, İzmir Institute of Technology, Urla, İzmir, Turkey. 2011.
- ADEL, A. et al. *Design of robotically fabricated timber frame structures*. In: ACADIA, 2018. p. 394-403.
- AGGOUR, M. M. H.; SOLIMAN, O. A. E. *Smart materials – toward a new architecture*. In: BUE-FISC, 2013. 13 p.
- AL FALEH, O. *Responsive architecture. A place making design strategy*. 2017. 94 f. Thesis (Master of Arts) – The School of Graduate Studies, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- AL-OBAIDI, K. M. et al. *Biomimetic building skins: an adaptive approach*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 79 (2017) 1472–1491.
- ANDRADE, G. R. *Biomimética no Design: Abordagens, Limitações e Contribuições para o Desenvolvimento de Produtos e Tecnologias*. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. Minas Gerais. Brasil. 2014.
- ANIS, M. *Designing an adaptive building envelope for warm-humid climate with bamboo veneer as a hygroscopically active material*. AUTONOMOUS + SMART. 2019.
- ARDUINO Guia iniciante. Versão 1.0. Multilógica shop. 150 p.
- ARRUDA, A. *Como a Biônica e Biomimética se relacionam com as estruturas naturais na busca de um novo modelo de pesquisa projetual*. Disponível em: ([https://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/encuentro2010/administracion-concursos/archivos\\_conf\\_2013/1345\\_68759\\_2401con.pdf](https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/encuentro2010/administracion-concursos/archivos_conf_2013/1345_68759_2401con.pdf)). Acesso em: 25 mar. 2017.
- AUGUSTIN, N. *Motion with Moisture. Creating passive dynamic envelope systems using the hygroscopic properties of wood veneer*. 2018. 130 p. Thesis (Master of Architecture) – University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- BADARNAH, L. *Form follows environment: biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation*. **Buildings** 2017, 7, 40; doi:10.3390. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings7020040>.

BADARNAH, L.; KADRI, U. *A methodology for the generation of biomimetic design concepts. Architectural Science Review*, Vol. 58, No. 2, 120–133, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>.

BANZI, M.; SHILOH, M. *Getting started with arduino. Maker Media, Sebastopol, CA, United States of America. 2015. 262 p.*

BENYUS, J. M. *Biomimicry. Innovation inspired nature.. HarperCollins e-books. 1997*

BONWETSCH, T. et al. *The Informed Wall. applying additive digital fabrication techniques on architecture. In: ACADIA, 2006. p. 489-495.*

BRAUMANN, J.; STUMM, S.; BRELL-COKCAN, S. *Towards new robotic design tools. Using collaborative robots within the creative industry. In: ACADIA, 2016. p. 164-173.*

BRAUMANN, J.; BRELL-COKCAN, S. *Adaptive Robot Control New Parametric Workflows Directly from Design to KUKA Robots. In: ECAADE, 2015. Volume 2, p. 243-250.*

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *Digital and physical computing for industrial robots in architecture. Interfacing arduino with industrial robots. In: T. Fischer, K. De Biswas, J.J. Ham, R. Naka, W.X. Huang, Beyond Codes and Pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 317–326. 2012, Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.*

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *Parametric Robot Control. Integrated CAD / CAM for architectural design. In: ACADIA, 2011. Proceedings...*

BRELL-COKCAN, S.; BRAUMANN, J. *Toward adaptive robot control strategies. Robotics / responsive environments 1. 2015. p. 222-231.*

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *Robotic production immanent design creative toolpath design in micro and macro scale. In: ACADIA, 2014. p.579-588.*

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. (Eds.) *Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design. Springer. Wien, New York, 2012. 321 p.*

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *A new parametric design tool for robot milling. In: ACADIA, 2010. p.357-363.*

BRELL-COKCAN, S. et al. *Digital design to digital production. Flank milling with a 7-axis cnc-milling robot and parametric design. In: ECAADE, 2009. p. 323-329.*

CAMPOS, J. C. G. *Fabricação robótica em arquitetura. Princípios, processos e aplicações. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto. Porto, Portugal.*

CANEPARO, L. *Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction. Springer Science+Business Media Dordrecht: New York, London. 2014.*

CELANI, G.; DUARTE, J.; PUPO, R. *Introducing digital fabrication laboratories in architecture schools. Planning and operating. 2010. Disponível em:*

(<http://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/celani-duarte-pupo-2010.pdf>). Acesso em: 04 nov. 2017.

CHIARELLA, M.; BARENTIN, C. C.; BÖHME, L. F. G. *Robots: automatización en diseño y construcción para la enseñanza de arquitectura*. ResearchGate. 2013. p. 339-443.

CHUNG, K. J. *Adaptive biodynamics in architecture: design of a prototype for an immersive sun shading system*. 2011. 141 f. Tese (Doctor of Architecture) - School of Architecture, University of Hawai`i at Mānoa. Honolulu, Hawaii, United States. 2011.

COHEN, Y. H.; REICH, Y. *Biomimetic design method for innovation and sustainability*. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.

CORREA, D. et al. *3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic material transformations*. 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING, Volume 2, Number 3, 2015. DOI: 10.1089/3dp.2015.0022

CORREA, D. et al. *Hygoskin: a climate-responsive prototype project based on the elastic and hygroscopic properties of wood*. In: ACADIA, 2013. p. 33-42.

CRAWFORD, S. *A Breathing Building Skin*. In: ACADIA, 2010. p. 211-217.

CRUZ, L. S. da et al. Caracterização física e química das frações do fruto atemoia Gefner . *Ciência Rural*, Santa Maria, 2013. v.43, n.12, p.2280-2284, dez. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v43n12/a33713cr2012-0439.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2019.

DAI, R.; KERBER, E.; BRELL-COKCAN, S. *Robot assisted assembly of steel structures. Optimization and automation of plasma cutting and assembly*. In: *Intelligent & Informed, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2019, Volume 1, 163-172*. 2019 and published by the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.

DASH, S. P. *Application of biomimicry in building design*. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Volume 9, Issue 2, February 2018, pp. 644–660. Disponível em: ([http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/IJCIET\\_09\\_02\\_062-2-3/IJCIET\\_09\\_02\\_062-2-3.pdf](http://www.iaeme.com/MasterAdmin/UploadFolder/IJCIET_09_02_062-2-3/IJCIET_09_02_062-2-3.pdf)). Acesso em: 10 jul. 2019.

DAVIS, D.; SALIM, F.; BURRY, J. *Designing responsive architecture. Mediating analogue and digital modelling in studio*. In: C. M. Herr, N. Gu, S. Roudavski, M. A. Schnabel, *Circuit Bending, Breaking and Mending: Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 155–164*. 2011, Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong

DEVADASS, P.; STUMM, S.; BRELL-COKCAN, S. *Adaptive haptically informed assembly with mobile robots in unstructured environments*. In: *36 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 2019. p. 469-476.

DEVEIGA, J.; FERREIRA, P. *Smart and nano materials in architecture*. In: ACADIA, 2005. p. 58-67.

DETANICO, F. B.; TEIXEIRA, F. G.; SILVA, T. K. A Biomimética como método criativo para o projeto de produto. **Design & Tecnologia** – 02 – 2010.

DUBOR, A. et al. *Sensors and work flow evolutions: developing a framework for instant robotic toolpath revision*. In: D. Reinhardt et al. (eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Springer International Publishing Switzerland 2016. DOI 10.1007/978-3-319-26378-6\_33.

DUNN, N. **Digital fabrication in architecture**. Laurence King Publishing: London. 2012. 192 p.

EL AHMAR, S. A. S. *Biomimicry as a tool for sustainable architectural Design. Towards morphogenetic architecture*. 133 f. 2011. Dissertação (Master of Science in Architecture) – Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egipt 2011.

ELMOKADEM, A. et al. *Kinetic architecture: Concepts, history and applications*. **International Journal of Science and Research (IJSR)**. Volume 7 Issue 4, April 2018.

EL-ZEINY, R. M. A. *Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture*. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. 50 ( 2012 ) 502 – 512.

ESTÉVEZ, A. T.; NAVARRO, D. *Del microscopio electrónico a la estrategia digital en arquitectura*. In: *SIGraDi 2016*, p. 734-742.9-11, November, 2016 - Buenos Aires, Argentina

EVANS, B. **Beginning arduino programming**. Writing code for the most popular microcontroller board in the world. Friends of Apress, 2016. F. 271 p.

FAHMY, S. F. A. *Biomimicry as an innovation in modern architecture design*. 2018. DOI: 10.12816/0044834

FBS Eletrônica. Apostila arduino. Com aplicações baseada na placa arduino uno. 70 p.

FECHERYR-LIPPENS, D.; BHIWAPURKAR, P. *Applying biomimicry to design building envelopes that lower energy consumption in a hot-humid climate*. **Architectural Science Review**. vol. 60, no. 5, 2017, 360–370. Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/319239529\\_Applying\\_biomimicry\\_to\\_design\\_building\\_envelopes\\_that\\_lower\\_energy\\_consumption\\_in\\_a\\_hot-humid\\_climate](https://www.researchgate.net/publication/319239529_Applying_biomimicry_to_design_building_envelopes_that_lower_energy_consumption_in_a_hot-humid_climate)). Acesso em 15 set. 2018.

FUNDUINO Tutorials for Arduino. 2016.

GEBESHUBER, L. C.; MAJLIS, B. Y. STACHELBERGER, H. *Biomimetics in Tribology, Chapter 3*. In: **Biomimetics – Materials, Structures and Processes**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

GERSHENFELD, N. *How to Make Almost Anything .The Digital Fabrication Revolution*. **Foreign Affairs**. Volume 91, No. 6, 2012.

GROBMAN, Y. J.; YEKUTIEL, T. P. *Autonomous movement of kinetic cladding components in building facades*. In: *International Conference on Research into Design, 2013*.

GRUBER, P. *Biomimetics in architecture: Architecture of life and buildings*. Springer-Verlag/Wien, 2011. Disponível em: (file:///C:/Users/JnKrllos.VAIO/Downloads/Gruber-2011-Biomimeticsinarchitecturearchitectureoflifeandbuildings%20(1).pdf). Acesso em: 14 jun. 2017.

GRUBER, P.; GOSZTONYI, S. *Skin in architecture: Towards bioinspired facades*. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 138, WIT Press, 2010. doi:10.2495/DN100451.

GRUBER, P. *Biomimetics in architecture – inspiration from plants*. In: *Plant Biomechanics Conference, 6 th. Cayenne, November 16 – 21, 2009*.

\_\_\_\_\_. *Transfer of nature to architecture - analysis of case studies*. 2008.

GUZIK, A. *Digital fabrication inspired design: Influence of fabrication parameters on a design process*. 2009, 71 f. Dissertação (Master of Science in Adaptive Architecture and Computation) - Bartlett School of Graduate Studies, University College of London, London, UK.

HELM, V. et al. *In-situ robotic construction: extending the digital fabrication chain in architecture*. In: *ACADIA, 2012*. p.169-177.

HENRIQUES, G. C. Sistemas responsivos: relevância, estado da arte e desenvolvimentos. In: *SIGRADI, 2015*. p. 200-206.

HOLSTOV, A.; FARMER, G.; BRIDGENS, B. *Implementing hygromorphic wood composites into responsive building skins*. In: *11th Conference on Advanced Building Skins. 2016, Bern, Switzerland: Advanced Building Skins GmbH*.

HORNUNG, P. et al. *Robotic woodcraft. Creating tools for digital design and fabrication*. In: *ECAADE, 2015. Volume 2*, p. 33-36.

HSUAN-AN, T. Método de Análise Biônica no Ensino de Design e Arquitetura. In: *ARRUDA, A. J. V. (Org.) Métodos e processos em biônica e biomimética: A revolução tecnológica pela natureza*. Blucher Open Access. 2018. p. 35-50.

ISHAK, I.; LAROCHELLE, P. *Robot arm platform for additive manufacturing: 3D lattice structures*. In: *30th Florida Conference on Recent Advances in Robotics May 11-12, 2017, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida*.

ISHAK, I.; FISHER, J.; LAROCHELLE, P. *Robot arm platform for additive manufacturing: multi-plane printing*. **Proceedings of the 29th Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRR 2016, Miami, Florida, May 12-13, 2016**.

IWAMOTO, L. *Digital fabrications. Architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press: New York, United States of America. 2009. 144 p.

IZARD, J. B. et al. *Large scale 3d printing with cable-driven parallel robots*. **Construction Robotics**. Springer. volume 1, pages 69–76(2017)

KENNEDY, E. B. *Biomimetic Buildings: The emerging future of architecture*. **GBER** Vol 10 Issue 1 Oct 2016. Disponível em: (<http://globalbuiltenvironmentreview.co.uk/wp->

content/uploads/2018/05/10.1-Kennedy\_Revised-Biomimicry-MS\_Clean-Copy\_080916.pdf). Acesso em: 8 ago. 2018.

KHOO, C. K. *Designing a responsive material system with physical computing*. In: N. Gu, S. Watanabe, H. Erhan, M. Hank Haeusler, W. Huang, R. Sosa (eds.), *Rethinking Comprehensive Design Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2014*, 97–106. 2014, The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.

KHOO, C. K.; SALIM, F. *Responsive materiality for morphing architectural skins*. In: *ACADIA, 2013*. p. 243-252.

KHOO C. K.; BURRY, J.; BURRY, M. *Soft responsive kinetic system. An elastic transformable architectural skin for climatic and visual control*. In: *ACADIA, 2011. Proceedings...*

KOLAREVIC, B.; KLINGER, K. R. (Ed.) *Manufacturing material effects: Rethinking design and making in architecture*. Routledge is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business: New York, United States of America. 2008. 321 p.

KOLAREVIC, B. (Ed.) *Architecture in the digital age. design and manufacturing*. Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group. 2003

\_\_\_\_\_. *Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age*. In: *ACADIA, 2001, Suny Buffalo, Proceedings... Buffalo, New York, United States of America. Section 4, 2001*. p. 268-278.

KONTOVOURKIS, O.; TRYFONOS, G. *Integrating parametric design with robotic additive manufacturing for 3D clay printing: An experimental study*. In: *35 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018.

KRIEG, O. D. et al. *Hygroskin – Metereosensitive Pavilion*. *ResearchCate*. 2014.p. 61-67.

LENAU, T. *Biomimetics as a design methodology – Possibilities and challenges*. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED'09, 24 - 27 august 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA*.

LENG, J. et al. *Shape-Memory Polymers—A class of novel smart materials*. *MRS BULLETIN*, volume 34, November, 2009.

LIANG, H. N. et al. *Responsive, dynamic architectural surfaces: From conceptualization to implementation*. *IAENG International Journal of Computer Science*, 40:3, IJCS\_40\_3\_06. 2013.

LÓPEZ, M. et al. *How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 692–703. Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211630510X>). Acesso em: 23 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. *Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles*. **Journal of Facade Design and Engineering** 3 (2015) 27–38. DOI 10.3233/FDE-150026.

LUBLASSER, E. et al. *Robotic forming. rapidly generating 3d forms and structures through incremental forming*. In: S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, S. Roudavski (eds.), *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016*, 539–548. 2016, The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.

MAGLIC, Michael J. *Biomimicry: Using nature as a model for design*. 2012. 88 f. Dissertação (Master of Architecture) – Architecture + Design Program. University of Massachusetts Amherst, Amherst, Massachusetts, USA. Disponível em: ([http://scholarworks.umass.edu/theses/871?utm\\_source=scholarworks.umass.edu%2Ftheses%2F871&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](http://scholarworks.umass.edu/theses/871?utm_source=scholarworks.umass.edu%2Ftheses%2F871&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)). Acesso em: 16 jun. 2017

MAHMOUD, E. *Biomimicry: A New Approach to Enhance the Efficiency of Natural Ventilation Systems in Hot Climate*. In: *International Seminar Architectonics Network, Architecture and Research*, 2010, Barcelona, Spain. **Proceedings... Barcelona**, 2010. Disponível em: ([https://pdfs.semanticscholar.org/204b/2efe8f55ff439e1586be90a6ca0c6a5d9193.pdf?\\_ga=2.51571309.514357249.1578450818-1536409723.1546030185](https://pdfs.semanticscholar.org/204b/2efe8f55ff439e1586be90a6ca0c6a5d9193.pdf?_ga=2.51571309.514357249.1578450818-1536409723.1546030185)). Acesso em: 5 maio 2017.

MARTINS, P. F.; SOUSA, J. P. *Digital fabrication technology in concrete architecture*. In: *ECAADE, 2014*. p. 475-484.

MAZZOLENI, I. *Architecture Follows Nature. Biomimetic principles for innovation design*. CRC Pres: Boca Raton, Palm Beach, Florida, USA. 2013.

McGEE, W.; LEON, M. P. de. (Eds.) **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design**. Taubman College of Architecture and Urban Planning University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. Springer, 2014.

McGEE, W.; FERINGA, J.; SØNDERGAARD, A. *Processes for an architecture of volume. Robotic wire cutting*. **Workshop**. 2013.

McROBERTS, M. **Arduino básico**. Novatec Editora Ltda., São Paulo, SP – Brasil. 2011. 456 p.

MEAGHER, M. *Responsive architecture and the problem of obsolescence*. *International Archnet-IJAR, Volume 8 - Issue 3 – November 2014 - (95-104)*.

MENGES, A.; SCHWINN, T.; KRIEG, O. D. **Advancing wood architecture**. A computational approach. Routledge Taylor & Francis Group. London, New York. 2017. 259 p.

MENGES, A.; REICHERT, S. KIEG, O. D. *Meteorosensitive architectures*. **ResearchGate**. 2014.p. 39-42.

MENGES, A. *Performative wood: Integral computational design for timber constructions*. In: ACADIA, 2009. p. 66-74.

MINSOLMAZ YELER, G.; YELER, S. *Models from nature for innovative building skins*. *Minsolmaz Yeler&Yeler / Kırklareli University Journal of Engineering and Science* 3 (2017) 142-165.

MONK, S. **30 projetos com arduino**. Bookman, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2014. 217 p.

NACHTIGALI, W.; POHL, G. *Bau-Bionik. Natur – Analogien – Technik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

NERI, H. G. F. Utilização da plataforma arduino para controle de experimentos remotos de física. 2014. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto de Física – Campus Santa Mônica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. Brasil. 2014.

NESSIM, M. A. *Biomimetic architecture as a new approach for energy efficient buildings*. 2016. 154 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt. 2016. Disponível em: (<http://www.cpas-egypt.com/pdf/MarianAzmyNessim/Ph.D.pdf>). Acesso em: 4 fev. 2018.

NOUR ELDIN, N.; ABDOU, A; ABD ELGAWAD, L. *Biomimetic potentials for building envelope adaptation in Egypt*. *Procedia Environmental Sciences* 34 ( 2016 ) 375 – 386.

ORGANTINI, G. **Scientific arduino programming**. *Arduino programming for scientists. a free addendum to "scientific programming"*. Sapienza Universit`a di Roma & INFN–Sez. di Roma. 2016. 71 p.

ÖZTOPRAK, Z. *A biomimetic perspective on (retro)fitting of building envelopes*. 2018. 200 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Architecture, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Çankaya, Ankara, Turkey. 2018. Disponível em: (<http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12621923/index.pdf>). Acesso em: 17 jul. 2019.

PAN, C. A.; JENG, T. *Exploring sensing-based kinetic design for responsive architecture*. 2008. Disponível em: ([http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2008\\_35\\_session4a\\_285.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2008_35_session4a_285.content.pdf)). Acesso em: 11 jul. 2018.

PANCHUK, N. *An Exploration into Biomicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design*. 2006. 203 f. Dissertação (Master of Architecture) – Architecture, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. 2006. Disponível em: (<https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/2876/ntpanchu2006.pdf?sequence=1&isAllowed=y>). Acesso em: 18 abril 2018

PARK, D.; BECETHOLD, M. *Designing biologically-inspired smart building systems: Processes and guidelines*. *International journal of architectural computing*. 2013, issue 4, volume 11. p. 437-463.

PAWLYN, M. *Biomimicry in architecture*. RIBA Publishing, Newcastle upon Tyne, England, United Kingdom. 2016

POHL, G.; NACHTIGALL, W. *Biomimetics for architecture & design*. Springer International Publishing. Switzerland 2015.

PRESENTI, M. et al. *Kinetic solar skin: a responsive folding technique*. *Energy Procedia* 70 (2015) p. 661 – 672.

RADWAN, G. A. N.; OSAMA, N. *Biomimicry, an approach, for energy effecient building skin design*. *Procedia Environmental Sciences* 34 ( 2016 ) 178 – 189. Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/302485908\\_Biomimicry\\_an\\_Approach\\_for\\_Energy\\_Effecient\\_Building\\_Skin\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/302485908_Biomimicry_an_Approach_for_Energy_Effecient_Building_Skin_Design)). Acesso em: 20 nov. 2017.

RAGHAVAN, A.; NEETHU, P. P.; AJIJOY. *3D Printing Robotic Arm*. *International Journal of Engineering and Management Research*. Volume-7, Issue-3, May-June 2017. p. 631-634.

RAO, R. *Biomimicry in Architecture*. *International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing*. Volume: 1 Issue: 3 08-Apr-2014,ISSN\_NO: 2320-723X.

RANGEL, E. R. et al. *Biomimética: innovación sustentable inspirada por la naturaleza*. *Investigación y Ciencia*. Número 54, (56-61) Mayo-Agosto, 2012.

REDOLFI, G.; KHOSHTINAT, S. *Algorithms in nature & architecture*. Biomimetic architecture. 2016.

REINHARDT, D.; SAUNDERS, R.; BURRY, J. (Eds.) *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

REIS, S. B.; MELLO, A. C. M. P.; OLIVEIRA, D. M. T. *Pericarp formation in early divergent species of Arecaceae (Calamoideae, Mauritiinae) and its ecological and phylogenetic importance*. *Plant Syst Evol* (2017) 303:675–687. DOI 10.1007/s00606-017-1399-6. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez54.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs00606-017-1399-6.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2019.

RON, R. *Exploration of eco-kinetic systems in architecture*. *Development of dynamic interactive building elements*. In: *ECAADE, 2012*. Volume 2. p. 381-390.

ROSSI, L. *Arquitectura y biomimesis. Caso de estudio: análisis del tejido del cactus para modelos arquitectónicos inspirados en la naturaleza*. 2009. 95 f. Dissertação (Master Oficial en Tecnología de la Arquitectura Construcción e Innovación Tecnológica) - Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad Politécnica de Catalunya.

ROYALL, E. *Defining biomimicry: architectural applications in systems and products*. Disponível em: ([https://soa.utexas.edu/sites/default/disk/analytic\\_tools/analytic\\_tools/09\\_02\\_su\\_royall\\_emily\\_paper\\_ml.pdf](https://soa.utexas.edu/sites/default/disk/analytic_tools/analytic_tools/09_02_su_royall_emily_paper_ml.pdf)). Acesso em: 14 nov. 2019.

RUST, R.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M. *Force adaptive hot-wire cutting. Integrated design, simulation, and fabrication of double-curved surface geometries. ResearchGate. 2016. p. 288-305.*

RUST et al. *Spatial wire cutting. In: S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, S. Roudavski (eds.), Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2016, 529–538. 2016, The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Hong Kong.*

SANCHEZ, R. U. *Parametric performative systems: designing a bioclimatic responsive skin. International journal of architectural computing. issue 03, volume 08. 2010. p. 279-300.*

SANTOS, R. C. dos et al. *Atemoya fruit development and cyto-logical aspects of GA3-induced growth and parthenocarpy. Protoplasma. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00709-019-01382-2>>. Acesso em: 31 maio 2019.*

\_\_\_\_\_. *Stenospermy and seed development in the “Brazilian seedless” variety of sugar apple (Annona squamosa). Anais da Academia Brasileira de Ciências (2014) 86(4): 2101-2108. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201420140206>>. Acesso em: 31 maio 2019.*

SACRAMENTO, C. K. do et al. *Caracterização física e química de frutos de três tipos de gravioleira (Annona muricata L.). Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 25, n. 2, p. 329-331, Agosto 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbf/v25n2/a37v25n2.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2019.*

SANTOS, C. dos. *O desenho como processo de aplicação da biomimética na arquitetura e no design. TÓPOS. V. 4, N° 2, p. 144 - 192, 2010.*

SANTOS, J. J. do P. *Biomimetismo. Como imitar a natureza na arquitetura. 2009. 186 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.*

SALIM, N. A. A.; MYDIN, M. A. O.; ULANG, N. H. Md. *Biomimetic Architecture in Building Envelope Maintenance (A Literature). E3S Web of Conferences 3, 01007. 2014. Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/273811106\\_Biomimetic\\_Architecture\\_in\\_Building\\_Envelope\\_Maintenance\\_A\\_Literature](https://www.researchgate.net/publication/273811106_Biomimetic_Architecture_in_Building_Envelope_Maintenance_A_Literature)). Acesso em: 25 jun. 2017*

SANDAK, A. et al. *Bio-based building skin. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3747-5>*

SCOPIGNOET, R. et al. *Digital fabrication techniques for cultural heritage: A survey. In: COMPUTER GRAPHICS Forum. 2015. p. 1–17.*

SEELY, J. C. K. *Digital fabrication in the architectural design process. 2004, 77 f. Master (Master of Science in Architecture Studies) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, Boston, United States of America. 2004.*

- SELÇUK, S. A. *proposal for a non-dimensional parametric interface design in architecture: a biomimetic approach*. 2009. 188 f. Tese (Doctor of Philosophy in Building Science in Architecture) - The Graduate School of Natural and applied Sciences of Middle East Technical University. 2009.
- SHARADIN, K. *Kinetic Facades: Towards design for environmental performance*. 2014, 247 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Spatial Information Architecture Laboratory (SIAL), School of Architecture and Design, RMIT University.
- SHEIKH, W. T.; ASGHAR, Q. *Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings*. *ScienceDirect*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>
- SHEMIRANI, I. T. *Interactive façade*. 2017. 144 p. Dissertation (Master in Architecture) - Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
- SILVA, R. S. et al. *Seed structure and germination in buriti (Mauritia flexuosa), the Swamp palm*. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, Volume 209, Issue 11, November 2014, Pages 674-685. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.flora.2014.08.012>>. Acesso em: 31 maio 2019.
- SINGH, A.; NAYYAR, N. *Biomimicry-An Alternative Solution to Sustainable Buildings*. **Journal of Civil Engineering and Environmental Technology**. Print ISSN: 2349-8404; Online ISSN: 2349-879X; Volume 2, Number 14; July-September, 2015 pp. 96-101
- SOARES, T. L. de F. et al. *Princípios Analógicos da Biomimética e sua aplicação nos Domus Geodésicos de Fuller*. <http://dx.doi.org/10.4995/IFDP.2016.3369>. 2016.
- SOUZA, M. P. M. de. **Curso básico de arduino**. 2017. 83 p.
- SOUSA, J. P.; VARELA, P. A.; MARTINS, P. F. *Between manual and robotic approaches to brick construction in architecture. Expanding the craft of manual bricklaying with the help of video projection techniques*. In: *ECAADE, 2015. Volume 2, p. 361-370*.
- SOUSA, J. P.; XAVIER, J. P. *A fabricação robótica no ensino da arquitetura: uma experiência sobre o projecto e construção de estruturas em tijolo*. In: *SIGRADI, 2015. p. 143-147*.
- SOUSA, J. P. **Robotic technologies for a non-standard design and construction in architecture**. *Robotic Technologies*. 2014. 92 p.
- STERK, T.d'E. *Using actuated tensegrity structures to produce a responsive architecture*. In: *ACADIA, 2003. p. 84-93*.
- STUMM, S. C. *Interconnecting Design Knowledge and Construction by Utilizing Adaptability and Configurability in Robotics. Mediating digital information from architectural design to construction through parametric design intent based robot programming*. 2018. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de arquitetura de RWTH Aachen University. Aachen, Alemanha.
- STUMM, S.; BRAUMANN, J.; BRELL-COKCAN, S. *Human-Machine Interaction for Intuitive Programming of Assembly Tasks in Construction*. **Procedia CIRP** 44 ( 2016 ) 269 – 274.

SUNG, D. *Skin Deep: Making Building Skins Breathe with Smart Thermo bimetals, Where Do You Stand. In Proceedings of the 2011 ACSA National Conference, Washington, DC: ACSA Press.145-152.*

\_\_\_\_\_. *Prototyping a self-ventilating building skin with smart thermobimetals.*

SWANSON, M.; SPURGEON, W.; VASS, T. 3D Printing Robotic Arm. 2016. 67 p. Underground (Bachelor of Science) – Faculty of Worcester Polytechnic Institute. Worcester, Massachusetts, United States of America.

SZABO, A. et al. *Revisiting Folded Forms with Digital Fabrication. In: ECAADE/SIGraDI, 2019. Volume 2, p. 191-200.*

TAHA, N. et al. *Robotic aerocrete. A novel robotic spraying and surface treatment technology for the production of slender reinforced concrete elements. In: ECAADE/SIGraDI, 2019. Volume 2, p. 245-254.*

TASHAKORI, M. *Design of a computer controlled sun-tracking façade model. 2014. 91 f. Dissertation (Master of Architecture) - College of Arts and Architecture, The Graduate School, The Pennsylvania State University.*

TOKUÇ, A.; ÖZKABAN, F. F.; ÇAKIR, Ö. A. Biomimetic Facade Applications for a More Sustainable Future. 2018. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73021>

TROMMELEN, J. GARCÍA, J. C.; RICHTERS, L. KHATTI, P. *3d printing with robotic arm. Using a robotic arm to create more sophisticated 3d prints. European Project Semester. 2017. Novia University of Applied Sciences. Vaasa, Finland.*

TÜBINGEN, D. H. B. aus. *Bionisch inspirierte Gebäudehüllen. Konzeption einer Bionisch inspirierter Gebäudehülle nach dem Vorbild natürlicher Hüllen und Häute. 2008. 474 f. Tese (Doktor-Ingenieurs) - Fakultät Architektur und Stadtplanung, Universität Stuttgart. Stuttgart, Baden-Württemberg, Deutschland. 2008.*

TUTORIAL arduino. 2017. 80 p.

VAZ, C. E. V. et al. O desenvolvimento de elementos de proteção de fachada responsivos – exploração e controle de um processo. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 73-87, jul-set. 2016.

VERMA, S.; DEVADASS, P. *Adaptive[skins]: Responsive building skin systems based on tensegrity principles. FUTURE TRADITIONS, 1 ST ECAADE Regional International Workshop. 2013. p. 155-170.*

VINCENT, J. F. V. et al. *Biomimetics: its practice and theory. J. R. Soc. Interface (2006) 3, 471–482.* Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/6937083\\_Biomimetics\\_Its\\_Practice\\_and\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/6937083_Biomimetics_Its_Practice_and_Theory)). Acesso em: 4 nov. 2017.

VOMHOF, M. et al. *Robotic fabrication of acoustic brick walls. In: ACADIA, 2014. p.555-564.*

WILLMANN, J. et al. (Eds.) *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Springer Nature. Switzerland AG 2019

WOOD, D. M. et al. Material computation—4D timber construction: Towards building-scale hygroscopic actuated, self-constructing timber surfaces. *International Journal of Architectural Computing*. 2016, Vol. 14(1) 49 –62, DOI: 10.1177/1478077115625522.

WRANGLER, T. *et al. Digital concrete: opportunities and challenges*. **RILEM Technical Letters** (2016) 1: 67 – 75, ISSN 2518-0231, DOI 10.21809/rilemtechlett.2016.16

YEDEKCI ARSLAN, G. *Biomimetic architecture a new interdisciplinary approach to architecture*. Disponível em: (<https://pdfs.semanticscholar.org/ac2a/090d95616637635f942a9a9bc23486409618.pdf>). Acesso em: 3 abril 2017.

YOWELL, J. *Biomimetic building skin. A phenomenological approach using tree bark as model*. 2011. 81 f. Dissertação (Master of Architecture) – Department of Architecture, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, USA. 2011. Disponível em: (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.75&rep=rep1&type=pdf>). Acesso em: 8 jul. 2018.

## FONTES CONSULTADAS

ABDELMOHSEN, S. et al. *A computational method for tracking the hygroscopic motion of wood to develop adaptive architectural skins*. In: *ECAADE*, 2018. p. 253-262.

AGIRBAS, A. The use of digital fabrication as a sketching tool in the architectural design process. A case study. In: *ECAADE*, 2015. p. 319-324.

AHMAR, S. E.; FIORAVANTI, A. *Biomimetic-computational design for double facades in hot climates*. In: *ECAADE*, 2015. Volume 2. p. 687-696.

ALVARADO, R. G.; LAGOS, P. S.; BRUSCATO, U. *Assessment of Digital Fabrication in Architectural Teaching*. In: *Conference ICBL*. Florianopolis, Brasil. 2009. 1(12)-12(12) p.

ARBABZADEH, M.; ETESAM, I.; MOFIDI, S. M. *Biomimetic and vernacular building design in connection with environment*. *EurAsian Journal of BioSciences*. *Eurasia J Biosci* 11, 37-44 (2017). Disponível em: (<http://www.ejobios.org/download/biomimetic-and-vernacular-building-design-in-connection-with-environment.pdf>). Acesso em: 8 set. 2018

AUSTERN, G.; CAPELUTO, G.; GROBMAN, J. Y. *Adapting architectural form to digital fabrication constraints*. *Advances in Architectural Geometry*, 2018.

AVERY, P. C. *The biomimetic envelope: A suitable way to achieve passivhaus comfort using skin as a model*. 2014. 57 p. *Dissertation (RIBA and school of Architecture) - Oxford Brookes University*.

BAKSHAEI, O.; RIDOLFI, G.; SABERI, A. *Adaptive skin conceptual prototype for mediterranean climate*. High | Bombastic.

BEORKREM, C. *Material strategies in digital fabrication*. Taylor and Francis: New York, United States of America. 2<sup>nd</sup>. Edition. 2017.

\_\_\_\_\_,. *Material strategies in digital fabrication*. Taylor and Francis: New York, United States of America. 2013.

BERBESZ, A. M. *From multiplication to biomimetics – playing with structure and architectural games or an actual attempt to shape objects in the 21 st century*. 2015.

BONIFACIO, P. P.; AMEN, F. G. *Pieles responsivas em arquitetura y sistemas de integración info-ambiental através de tecnología arduino*. In: *SIGRADI*, 2013. p. 430-435.

BOSWELL, C. K. *Exterior Building Enclosures. Design Process and Composition for Innovative Facades*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 2013.

BRAUMANN, J.; BRELL-COKCAN, S. *Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design*. In: ECAADE, 2012. Volume 2, p. 469-476.

CARDENAS M. F.; GONZÁLES, F. J. N. *Biomimicry in climate adaptive building skins: relevance of applying principles and strategies*. VII International Congress on Architectural Envelopes, May 27, 28, 29 2015, San Sebastian-Donostia, Spain.

CARVALHO, M. A. de. *Inovação em produtos. novação em Produtos: IDEATRIZ, uma aplicação da TRIZ / Inovação Sistemática na ideação de produtos*. 2. Ed. - São Paulo: Blucher, 2017.

CERRILLO, J. C. *Nitinol y la disolución de los espacios arquitectónicos. Implementación del nitinol em la reconfiguración de los espacios*. 2018. 51 f. Monografía (Graduação em Arquitetura) – Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

CHANG, T. W.; HUANG, H. Y.; DATTA, S. *Design and fabrication of a responsive carrier component envelope*. *Buildings* 2019, 9, 84; doi:10.3390/buildings9040084

CHEN, X. *Interactive pavillions: responsive transformation of structure*. 2015. 58 f. Syracuse University Syracuse University.

CORREA, D. et al. *3D-Printed wood: Programming hygroscopic material transformations*. *3d Printing and Additive Manufacturing*, Volume 2, Number 3, 2015.

CORVALÁN, K. C.; CASTILLO, F. C. *Pieles responsivas: desarrollo de infraestructuras adaptables a su entorno*. In. SIGRADI, 2011.

ČUČAKOVIĆ, A.; JOVIĆ, B.; KOMNENOV, M. *Biomimetic geometry approach to generative design*. *Periodica Polytechnica Architecture*. <https://doi.org/10.3311/PPar.10082>. 2016.

DEWIDAR, K. M.; MOHAMED, N. M.; ASHOUR, Y. S. *Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems*. In: SB13 Dubai, paper 28, 2013.

DUTT, F.; DAS, S. *Responsive architectural surface design from nonlinear systems biology. Responsive architectural design by computational methods*. In: T. Fischer, K. De Biswas, J.J. Ham, R. Naka, W.X. Huang, *Beyond Codes and Pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 465–474. 2012, Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRRIA), Hong Kong.

ELGHAZI, Y.; HAMZA, N.; DADE-ROBERTSON, M. *Responsive plant-inspired skins: A review*. In: PLEA, 2017.

EL AHMAR, S.; FIORAVANTI, A. *Biomimetic-Computational Design for Double Facades in Hot Climates. A Porous Folded Façade for Office Buildings*. *Smart and Responsive Design - Applied - Volume 2*. 2015.

ELEINEN, O. M. A.; SHAHDA, M. M.; ABDELHAMED, E. Z. *Bio-openings Skin as a Practical Application of Biomimicry(Butterfly Inspiration)*. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**. Vol. 8, Issue 3, March 2019. Disponível em: ([http://www.ijirset.com/upload/2019/march/247\\_Bio-openings%20.pdf](http://www.ijirset.com/upload/2019/march/247_Bio-openings%20.pdf)). Acesso em: 24 maio. 2019.

ELGHAZI, Y. HAMZA, N.; DADE-ROBERTSON, M. *Responsive Plant-inspired skins: A review*. PLEA 2017 Edinburgh.

ELGHAZI, Y. S. *Building skin in the age of information technology*. 2009. 281 F. Master (Master of Science in Architectural Engineering) - Faculty of Engineering, Cairo University. Giza, Egypt.

ENGLHARDT, O. (Ed.) *Advanced building skins*. In: **proceedings of International Conference on Building Envelope Design and Technology**. Graz, Austria. April, 2015

FOX, M. A.; YEH, B. P. *Intelligent kinetic systems*. Kinetic Design Group.

GIFTTHALER, M. et al. *Mobile robotic fabrication at 1:1 scale:the in situ fabricator. System, experiences and current developments*. 2017 Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/312374839\\_Mobile\\_Robotic\\_Fabrication\\_at\\_11\\_scale\\_the\\_In\\_situ\\_Fabricator](https://www.researchgate.net/publication/312374839_Mobile_Robotic_Fabrication_at_11_scale_the_In_situ_Fabricator)). Acesso em: 15 jan. 2020.

GLYNN, R.; SHEIL, B. **Fabricate: making digital architecture**. UCLPRESS. 2011. 262 p.

GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; LANGENBERG, S. (Ed.) **Fabricate: negotiating design & making**. UCLPRESS. 2014. 318 p.

GROBMAN, Y. J. *Cellular building envelopes*. In: *International Conference on Research into Design, 2013*.

GUNDERSON, R. D. *Responsive building envelopes. Active apertures for chinooks*. 2015. 92 f. *Dissertação (Master of Architecture) Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada*. 2015. Disponível em: ([https://curve.carleton.ca/system/files/etd/81885ba3-3765-49b7-b87d-e8bae664185d/etd\\_pdf/b61f02ba1bf5426245c34b8545f37fb5/gunderson-responsivebuildingenvelopesactiveapertures.pdf](https://curve.carleton.ca/system/files/etd/81885ba3-3765-49b7-b87d-e8bae664185d/etd_pdf/b61f02ba1bf5426245c34b8545f37fb5/gunderson-responsivebuildingenvelopesactiveapertures.pdf)). Acesso em: 20 out. 2018.

GRUBER, P.; IMHOF, B. *Patterns of Growth—Biomimetics and Architectural Design*. **Buildings**, 2017, 7, 32; doi:10.3390/buildings7020032.

GUTIÉRREZ, J. M. R. **Manual de programación arduino**. 2007. 70 p.

GUZIK, A. *Digital fabrication inspired design. influence of fabrication parameters on a design process*. In: *ECAADE, 2010*. p. 227-236.

HARRY, S. *Dynamic adaptive building envelopes – An innovative and state-of-the-art technology*. **Creative Space**, Vol-3, No-2, January 2016, pp. 167–183.

HENRIQUES, G. C.; DUARTE, J. P.; LEAL, V. *Strategies to control daylight in a responsive skylight system*. *Automation in Construction* 28 (2012) 91–105.

HENRIQUES, G. C. *TetraScript: A Responsive Pavilion, From Generative Design to Automation*. *International journal of architectural computing*. issue 01, volume 10. 2012. p. 87-104.

HOLSTOV, A.; FARMER, G.; BRIDGENS, B. *Sustainable materialisation of responsive architecture*. *Sustainability* 2017, 9, 435; doi:10.3390/su9030435

HSUAN-AN, T. **Design**. Conceitos e métodos. Blucher: São Paulo, Brasil. 2017. 318 p.

\_\_\_\_\_, T. **Sementes do Cerrado e Design Contemporâneo**. Editora da UCG: Goiânia, Brasil. 2009. 219 p.

IENNARELLA, S. SERRA, V. VERSO, V. R. M. L. *A novel concept of a responsive transparent facade module: Optimization of energy performance through parametric design*. *Energy Procedia* 78 (2015) 358 - 363.

INTERACTIVE prototyping. An introduction to physical computing using arduino, grasshopper, and firefly.

KEEN, E. Starter Kit for Arduino. Guide v1.0. 86 p.

KHOO, C. K.; SALIM, F. D. *A responsive morphing media skin*. In: T. Fischer, K. De Biswas, J.J. Ham, R. Naka, W.X. Huang, *Beyond Codes and Pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 517–526. 2012.

KIN, J.; PARK, K. *The design characteristics of nature-inspired buildings*. *Civil Engineering and Architecture* 6(2): 88-107, 2018. Disponível em: (<http://www.hrpub.org/download/20180330/CEA6-14811143.pdf>). Acesso em: 22 nov. 2019.

KIRKEGAARD, P. H.; PARIGI, D. *On Control Strategies for Responsive Architectural Structures*. In *IASS-APCS 2012 Proceedings: from spatial structures to space structures The International Association for Shell and Spacial Structures*.

KNIPPERS, J.; NICKEL, K. G.; SPECK, T. (Ed) *Biomimetic research for architecture and building construction. Biological design and integrative structures. Biologically-Inspired Systems*. Vol. 9. Series Editor. Stanislav N. Gorb. Christian Albrecht University of Kiel, Kiel, Germany. Springer International Publishing Switzerland 2016. Disponível em: (<https://profs.info.uaic.ro/~avitcu/AD8.pdf>). Acesso em: 27 jul. 2018.

KOLAREVIC, B. Exploring architecture of change. In: *ACADIA, 2009*. p. 58-61.

KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. M. (Ed.) *Performative architecture. Beyond instrumentality*. 2005. Spon Press Taylor & Francis Group: New York, United States of America. 273 p.

KOVACS, R. et al. *TrussFormer: 3D Printing large kinetic structures*. In: *UIST '18, 2018*, <https://doi.org/10.1145/3242587.3242607>

KSHIRSAGAR, A. P.; MALANI, S. S.; TIWARE, V. *Biomimicry – Nature Inspired Building Structures*. *International Journal of Engineering Research and Technology*. ISSN 0974-3154 Volume 10, Number 1 (2017). Disponível em:

([https://www.ripublication.com/irph/ijert\\_spl17/ijertv10n1spl\\_29.pdf](https://www.ripublication.com/irph/ijert_spl17/ijertv10n1spl_29.pdf)). Acesso em: 17 out. 2018.

KURU, A. et al. *Multi-functional biomimetic adaptive façades: A case study. FACADE 2018 – Final Conference of COST Action TU1403 “Adaptive facades network”*.

LA MAGNA, R. et al. *From nature to fabrication: Biomimetic design principles for the production of complex spatial structures. International Journal of Space Structures. Volume 28 · Number 1 · 2013*

LARSEN, N. M.; BOYE, A. M. *Perspectives on digital fabrication in tomorrow’s architecture. ARKITEKTSOLEN AARHUS. 2018.*

LÓPEZ, M. et al. *Adaptive architectural envelopes for temperature, humidity, carbon dioxide and light control. In: 10th Conference on Advanced Building Skins, 2015. p. 1206-1215.*

LLORET, E. et al. *Complex concrete structures Merging existing casting techniques with digital fabrication. Computer-Aided Design 60 (2015) 40–49.*

MACRI, S. *Practical applications of rigid thick origami in kinetic architecture. 2015. 106 p. Thesis (Doctorate of Architecture) - Graduate Division of the University of Hawai’I At Mānoa.*

MENGES, A. et al. *Fabricate: rethinking design and construction. UCL. 2017. 155 p.*

MENGES, A.; REICHERT, S. *Performative wood. 2012*

MITCHELL, W. J.; MCCULLOUGH, M. *Digital Design Media. 1999. Disponível em: (<http://www.gsd.harvard.edu/~malcolm/DDM/DDMcover.gif>). Acesso em: 8 fev. 2020.*

MODIN, H. *Adaptive building envelopes. 2014, 81 f. Dissertação (Master of Science in Architecture and Engineering) – Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Building Technology, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden 2014. Disponível em: (<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/214574/214574.pdf>). Acesso em: 7 set. 2018*

MOHAMED, A. S. Y. *Smart Material Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative Design Paradigm. Energy Procedia 00 (2017) 000–000.*

MOHAMED, H. A. *New applications as smart, green , and unique identity factors. International Journal on: The Academic Research Community Publication. 2017. DOI: 10.21625/archive.v1i1.118.*

MOULTON, N. et al. *An affective kinetic building façade system: Mood Swing. In: Conference on Advanced Building Skins, 13<sup>th</sup>. Bern, Switzerland. p. 417-428. 2018.*

NAGY, Z. et al. *The adaptive solar façade: from concept to prototypes. Frontiers of Architectural Research (2016) 5, 143 -156.*

NEGROPONTE, N. *Being digital. Hodder & Stoughton: Great Britain. 1995. 252 p.*

PAOLA, P. de. *Form follows structure: biomimetic emergent models of architectural production*. In: ACSA Fall Conference. 2012

PARK, J. J. *Adaptive Biomimetic Façades: Compound Bio-inspired Design Strategy for Multi-functional Stadiums*. 2016. 406 f. Tese (Docotr of Philosophy) - Faculty of Architecture, Building and Planning, The University of Melbourne. Australia.

PEREZ, S. R. *Polyform. Biomimetic Surfaces*. In: ACADIA 2006. Louisville, Kentucky, USA. **Proceedings...** Louisville: University of Kentucky, 2006. Disponível em: ([https://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/acadia06\\_471.content.pdf](https://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/acadia06_471.content.pdf)). Acesso em: 23 abril 2017.

POPPINGA, S. et al. *Hygroscopic motions of fossil conifer cones*. **Scientific Reports** / 7:40302 |. 2017. DOI: 10.1038/srep40302

RAEL, R.; FRATELLO, V. S. *Developing concrete polymer building components for 3D printing*. In: ACADIA, 2011. p. 152-157.

REICHERT, S.; MENGES, A.; CORREA, D. *Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness*. **Computer-Aided Design** 60 (2015) 50–69.

RENNA, R. B. Di.; PAIVA, L. de M. **Tópicos Especiais em Eletrônica II**. Introdução ao microcontrolador Arduino. Grupo PET-Tele, Programa de Educação Tutorial – PET, Curso de Engenharia de Telecomunicações – TGT, Escola de Engenharia – TCE, Universidade Federal Fluminense – UFF. Niterói, Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

RIETHER, G.; JOLLY, K. *Flexible Systems. Flexible Design, Material and Fabrication: The AIA pavilion as a case study*. In: RCAADE, 2011. p. 628=634.

ROSSI, L.; GALINO, F. J. R. *Estructura de neumáticos bio-inspirada en la madera de cactus. Tire structure bio-inspired to the cactus wood*. **Proceedings...** In: Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, SIGRaDi 2017, XXI. 22 – 24 Noviembre, 2017 – Concepción, Chile.

ROUDAVSKI, S. *Towards morphogenesis in architecture. international journal of architectural computing. issue 03, volume 07*. 2009. 345-374 pp. Disponível em: ([https://www.researchgate.net/publication/37853382\\_Towards\\_Morphogenesis\\_in\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/37853382_Towards_Morphogenesis_in_Architecture)). Acesso em: 19 set. 2018.

SAPIENZA, V.; RODONÒ, G. *Kinetic architecture and foldable surface*. **Athens Journal of Architecture**. 2016.

SCHEEREN, R.; HERRERA, P. C.; SPERLING, D. *Evolving stages of digital fabrication in Latin America Outlines of a research and extension project*. In: ECAADE / SIGRaDi, 2019. p. 797-806.

SCHITTICH, C. (Ed.) **In detail building skin**. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2006.

SCHLEICHER, S. *Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design: Transferring Bending and Folding Principles of Plant Leaves to Flexible Kinetic*

Structures. 2016. 203 f. Tese (Doktor-Ingeniers) - Fakultät Architektur und Stadtplanung, Universität Stuttgart. Stuttgart, Baden-Württemberg, Deutschland. 2016.

SINGH, D.; SINGH, D.; HAN, S. S. 3D Printing of scaffold for cells delivery: advances in skin tissue engineering. *Polymers* 2016, 8, 19; doi:10.3390/polym8010019.

SOTODEH, S.; MAHDAVINEJAD, M.; BAHARLOO, P. New trends in high-performance architecture: shifting to bio-inspired innovative green technologies in future architecture. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-6S2, April 2019.

SUDHAKARAN, P. Bio-inspired built environments for climate change: developing strategies for adaptation and mitigation. *International Journal on Emerging Technologies* 8(1): 217-224 (2017).

SUNG, D. A New Look at Building Facades as Infrastructure. *Engineering 2* (2016) 63–68.

SZABO, A. et al. Revisiting folded forms with digital fabrication. In: *ECAADE / SIGraDi, 2019*. p. 191-200.

TRUBIANO, F. Performance Based Envelopes: A Theory of Spatialized Skins and the Emergence of the Integrated Design Professional. *Buildings* 2013, 3, 689-712; doi:10.3390/buildings3040689

VAHEDI, A. *Nature as a source of inspiration of architectural conceptual design*. 2009. 108 f. Dissertação (Master of Science Architecture) - Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus. 2009.

VAZQUEZ, E.; RANDALL, C.; DUARTE, J. P. Shape-changing architectural skins. A review on materials, design and fabrication strategies and performance analysis. *Journal of Facade Design & Engineering*, volume 7 / number 2 / 2019.

WANG, C.; et al. Biomimetic structure design — a possible approach to change the brittleness of ceramics in nature. *Materials Science and Engineering C* 11 2000 9–12

WEN, L.; WEAVER, J. C.; LAUDER, G. V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *The Journal of Experimental Biology* (2014) 217, 1656-1666 doi:10.1242/jeb.097097.

WILLIAMS, K. (Ed.) *Digital fabrication. Nexus Network Journal*. volume 14, number 3, 2012. ISSN 1590-5896.

WILLMANN, J. et al. Aerial robotic construction towards a new field of architectural research. *International Journal of Architectural Computing*. issue 03, volume 10. p. 439-459.

XING, Y. et al. Exploring design principles of biological and living building envelopes: what can we learn from plant cell walls?. *Intelligent Buildings International*. 2017

YANNAS, S. Towards environmentally-responsive architecture. In: *PLEA, 2003*. p. 1-7.

YU, M. L. *Skins, Envelopes, and Enclosures. Concepts for designing building exteriors.* Taylor & Francis. New York, United States of America. 2014.

ZARI, M. P. *Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability.* In: SB07. 2007, Auckland, New Zealand. **Proceedings...** Auckland, 2007. Disponível em: (<http://www.cmnzl.co.nz/assets/sm/2256/61/033-PEDERSENZARI.pdf>). Acesso em: 15 out 2018.

ZEJNILOVIĆ, E; HUSUKIĆ, E. *Biomimicry in architecture.* **International Journal of Engineering Research and Development.** e-ISSN: 2278-067X, p-ISSN: 2278-800X, [www.ijerd.com](http://www.ijerd.com), Volume 11, Issue 07 (July 2015), PP.75-84.

## APÊNDICE I – Tabela de Insumos do Experimento 1

Tabela 22: Insumos do Experimento 1: Projeção e Fabricação com Tecnologias Digitais de Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sala 31 na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília - DF;</li> <li>▪ Sala 8 no Centro de Aulas Caraíbas da Universidade Federal de Goiás – Campus Samambaia, Goiânia.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas de 0,80 m x 1,50 m;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Câmera Fotográfica de marca DSLR Nikon modelo D600;</li> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora 3D Delta;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Uberblock</i>;</li> <li>▪ Cortadora a Laser de marca <i>Thunder Laser</i>, modelo Nova 51, mesa de corte de 1400mm x1030mm;</li> <li>▪ Cortadora a Laser de marca <i>Laser Engraving &amp; Cutting Machine</i>, mesa de corte de 1400mm x1030mm.</li> </ul>
4	Softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Autodesk ReCap Pro</i></li> <li>▪ <i>Rhinoceros</i> versão 5.0;</li> <li>▪ <i>Grasshopper</i>;</li> <li>▪ <i>Coreldraw 7.0</i>;</li> <li>▪ <i>Cura 15.04.6</i>;</li> <li>▪ <i>Thunder Laser</i>;</li> <li>▪ <i>Lasercut 5.3</i>.</li> </ul>
5	Material de escritório	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papel Chamex Branco, formato A4, 75 gr.;</li> <li>▪ Réguas de metal;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cola Branca;</li> <li>▪ Fita adesiva de Papel;</li> <li>▪ Fita adesiva de Tecido;</li> <li>▪ Tesoura;</li> <li>▪ Estilete.</li> </ul>
6	Material de cartonagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papelão de onda simples, formato de 1,40 m x 1,00 m;</li> <li>▪ Espátula de plástico;</li> <li>▪ Parafusos, porcas borboleta, arruelas.</li> </ul>
7	Material de construção	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Óculos de segurança;</li> <li>▪ Respirador para vapores orgânicos semi facial vapores com 2 filtros worker;</li> <li>▪ Resina multiuso aqua a base de água hydronorth;</li> <li>▪ Pinceis para parede;</li> <li>▪ Cola de contato;</li> <li>▪ Lençol de borracha S/I manta 4,5mm de espessura.</li> </ul>
8	Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automóvel particular;</li> <li>▪ Caminhão de Mudança.</li> </ul>
9	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autor da tese;</li> <li>▪ Alunos de Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília - DF;</li> <li>▪ Alunos de Graduação do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás, Goiânia.</li> </ul>

## APÊNDICE II – Tabela de Insumos do Experimento 2

Tabela 23: Insumos do Experimento 2: Projeção Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Laboratório de Fabricação Digital e Customização em Massa - LFDC - da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília - DF;</li> <li>▪ Residência.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora ZCorp Printer 310;</li> <li>▪ Impressora RepRap Uberblock;</li> <li>▪ Impressora RepRap Anet A8.</li> </ul>
4	Softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>ZPrinter;</i></li> <li>▪ <i>Cura 15.04.6</i></li> </ul>
5	Material de escritório	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tesoura;</li> <li>▪ Estilete.</li> </ul>
6	Material de impressão	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pó ZCast 500;</li> <li>▪ Pó de gesso-maltodextrina- açúcar;</li> <li>▪ Filamento de acrilonitrila butadieno estireno - ABS;</li> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - PLA.</li> </ul>

7	Material de construção	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Fita adesiva dupla face.</li></ul>
8	Ferramental elétrico	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Alicate de bico.</li></ul>
9	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Autor da tese;</li><li>▪ Aluno de mestrado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília - DF.</li></ul>

### APÊNDICE III – Tabela de Insumos do Experimento 3

Tabela 24: Insumos do Experimento 3: Projeto Digital e Fabricação Digital por Adição do Protótipo da Célula Estrutural com Impressão 3D inspirado na Casca dos Frutos das espécies frutíferas da Atemoia, Buriti, Coco Babaçu, Graviola e Pinha ou Fruta do Conde

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residência;</li> <li>▪ Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade Federal de Goiás - Campus Samambaia.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Metalizador <i>Belzier SCD 050</i>;</li> <li>▪ Microscópio <i>MEV Jeol JSM-7000F</i>;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8</i>;</li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S</i>.</li> </ul>
4	Softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0</i>;</li> <li>▪ <i>Grasshopper</i>;</li> <li>▪ <i>Cura 15.04.6</i>;</li> <li>▪ <i>Sprinray Rayware 1.4.6</i>.</li> </ul>
5	Material de escritório	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Caneta;</li> <li>▪ Papel Chamex Branco, formato A4, 75 gr.</li> </ul>
6	Material para artesanato	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Massa plástica flexível colorida;</li> <li>▪ Espátulas.</li> </ul>
7	Material de impressão 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i>;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resina Moonray Gray.</li> </ul>
8	Material para proteção individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Máscara;</li> <li>▪ luvas.</li> </ul>
9	Material para limpeza	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Álcool isopropílico;</li> <li>▪ Pano para secagem.</li> </ul>
10	Ferramental elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alicates de bico.</li> </ul>
11	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autor da tese;</li> <li>▪ Técnicos do Laboratório de Microscopia e Microanálise - LMM - do Instituto de Ciências Biológicas - IB - da Universidade de Brasília.</li> <li>▪ Técnica do Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade de Goiás - Campus Samambaia.</li> </ul>

## APÊNDICE IV – Tabela de Insumos do Experimento 4

Tabela 25: Insumos do Experimento 4: Reformulação Digital de Pavilhão de Forma Complexa

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residência;</li> <li>▪ Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade Federal de Goiás - Campus Samambaia.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S</i>.</li> </ul>
4	<i>Softwares</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Ecotect 5.5</i></li> <li>▪ <i>Ladybug;</i></li> <li>▪ <i>Autodesk Flow Design;</i></li> <li>▪ <i>Archicad 23;</i></li> <li>▪ <i>Sprinray Rayware 1.4.6.</i></li> </ul>
5	Material de impressão 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resina Moonray Gray.</li> </ul>
6	Material para proteção individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Máscara;</li> <li>▪ luvas.</li> </ul>
7	Material para limpeza	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Álcool isopropílico;</li> <li>▪ Pano para secagem.</li> </ul>

8	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Autor da tese;</li><li>▪ Técnica do Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade de Goiás - Campus Samambaia.</li></ul>
---	------------------	--

## APÊNDICE V – Tabela de Insumos do Experimento 5

Tabela 26: Insumos do Experimento 5: Prototipagem de Painéis de Células Responsivas Autônomas

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residência;</li> <li>▪ Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação - LAMAF - da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8</i>;</li> <li>▪ Impressora <i>Moonray S</i>.</li> </ul>
4	Softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0</i>;</li> <li>▪ <i>Grasshopper</i>;</li> <li>▪ <i>Autodesk T-spline para rhinoceros</i>;</li> <li>▪ <i>Cura 15.04.6</i>;</li> <li>▪ <i>Sprinray Rayware 1.4.6</i>;</li> <li>▪ <i>Arduino software IDE</i>.</li> </ul>
5	Material de escritório	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Caneta;</li> <li>▪ Papel Chamex Branco, formato A4, 75gr;</li> <li>▪ Folhas de Acetato transparente de 30 micras em formato A4;</li> <li>▪ Réguas de metal;</li> <li>▪ Cola Branca;</li> <li>▪ Tesoura;</li> <li>▪ Estilete.</li> </ul>

6	Material de costura	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Linha</li> </ul>
7	Material de cartonagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Papelão de onda simples, formato de 1,40 m x 1,00 m;</li> <li>▪ Espátula de plástico;</li> <li>▪ Palitos de madeira.</li> </ul>
8	Material hospitalar	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seringas descartáveis;</li> <li>▪ Mangueirinhas de silicone.</li> </ul>
9	Material de construção	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tinta fotocromica;</li> <li>▪ Pincel para parede;</li> <li>▪ Madeira de Pinho;</li> <li>▪ Madeira de Eucalipto.</li> <li>▪ Placas de Cobre de 0.5mm;</li> <li>▪ Placa de Alumínio de 0.5mm;</li> <li>▪ Parafusos;</li> <li>▪ Porcas borboletas;</li> <li>▪ Arruelas de metal;</li> <li>▪ Arruelas de borracha.</li> </ul>
10	Material de robótica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Placa Arduino Uno;</li> <li>▪ Cabo USB;</li> <li>▪ Protoboard;</li> <li>▪ Jumpers;</li> <li>▪ Micro Servo 9g SG90 TowerPro;</li> <li>▪ Servo Motor MG996R;</li> <li>▪ Potenciômetro 100k;</li> <li>▪ Sensores de Luminosidade LDR 5mm;</li> <li>▪ Sensores de Temperatura LM35DZ;</li> <li>▪ Sensores Ultrassônicos HC-SR04;</li> <li>▪ Suporte Pan/Tilt com Servo Motor 9G;</li> <li>▪ Controlador AtMega328P - configuração Standalone</li> <li>▪ Painel solar 12V 3W</li> <li>▪ Placa fenolite 40 cm<sup>2</sup></li> <li>▪ Bateria recarregável 9V 240mAh <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resistores de 1 <math>\Omega</math></li> <li>▪ Resistores de 2,2 K<math>\Omega</math></li> <li>▪ Resistor de 10 K<math>\Omega</math></li> </ul> </li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resistor de 150Ω</li> <li>▪ Cristal oscilador 16 MHz</li> <li>▪ Transistores 2n2222A</li> <li>▪ Botão tipo reset/push button</li> <li>▪ Regulador de tensão 7805</li> <li>▪ Capacitor eletrolítico de 220 uF</li> <li>▪ Capacitores de 100 nF</li> <li>▪ Capacitores de 22nF</li> <li>▪ Diodo 1N4007</li> <li>▪ LEDs</li> <li>▪ Clipe de bateria 9V</li> </ul>
11	Material de impressão 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i>;</li> <li>▪ Resina Moonray Gray.</li> </ul>
12	Material para proteção individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Óculos de proteção;</li> <li>▪ Respirador para vapores orgânicos semi facial vapores com 2 filtros worker;</li> <li>▪ Luvas de látex.</li> </ul>
13	Material para limpeza	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Álcool isopropílico;</li> <li>▪ Pano para secagem.</li> </ul>
14	Ferramental elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Placa Solar;</li> <li>▪ Fita adesiva de alumínio;</li> <li>▪ Alicates de bico.</li> </ul>
15	Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automóvel particular.</li> </ul>
16	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autor da tese;</li> <li>▪ Marceneiro;</li> <li>▪ Técnica do Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade de Goiás - Campus Samambaia.</li> </ul>

## APÊNDICE VI – Tabela de Insumos do Experimento 6

Tabela 27: Insumos do Experimento 6: Fabricação digital por adição e por fundição em caixa de areia com modelo perdido de Peça Biônica

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residência;</li> <li>▪ Laboratório de Ideias, Prototipagem e Empreendedorismo - IPELab - do Parque Tecnológico da Universidade Federal de Goiás - Campus Samambaia.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesas;</li> <li>▪ Cadeiras.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora <i>RepRap Anet A8</i>;</li> <li>▪ Forno Elétrico <i>JUNG</i> Modelo 3810;</li> <li>▪ Forno de Fundição <i>FORTELAB</i> Modelo POB 1300-7.</li> </ul>
4	<i>Softwares</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0</i>;</li> <li>▪ <i>Grasshopper</i>;</li> <li>▪ <i>Autodesk T-spline para rhinoceros</i>;</li> <li>▪ <i>Cura 15.04.6</i>.</li> </ul>
5	Material de escritório	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Caneta;</li> <li>▪ Papel Chamex Branco, formato A4, 75gr;</li> <li>▪ Réguas de metal;</li> <li>▪ Tesoura;</li> <li>▪ Estilete.</li> </ul>
6	Material de construção	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isopor;</li> <li>▪ Areia;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Madeira.</li> </ul>
7	Material de fundição	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alumínio.</li> </ul>
8	Material de impressão 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA</i>.</li> </ul>
9	Material para proteção individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Óculos de proteção;</li> <li>▪ Respirador para vapores orgânicos semi facial vapores com 2 filtros worker;</li> <li>▪ Luvas de látex.</li> </ul>
10	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autor da tese;</li> <li>▪ Técnico do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação - LAMAF - da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.</li> </ul>

## APÊNDICE VII – Tabela de Insumos do Experimento 7

Tabela 28: Insumos do Experimento 7: Fabricação Robótica de Peça com Corte a Fio Quente

Nº	Insumo	Descrição
1	Espaço físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação - LAMAF - da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás.</li> </ul>
2	Mobiliário	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bancas;</li> <li>▪ Mesa de coordenadas CNC WhiteMartins- Modelo AutoCut.</li> </ul>
3	Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notebook de marca SONY modelo VAIO, Processador Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.5 GHz, RAM 12 GB, Sistema Operacional de 64 bits, Windows 8.1;</li> <li>▪ Impressora 3D Anet A8;</li> <li>▪ Célula robotizada de soldagem - Robô HP-20 Yaskawa Motoman com capacidade de carga de 20 kg e manipulador multiprocesso;</li> <li>▪ Cortador com fio quente;</li> <li>▪ Transformador industrial com dimmer de 220 volts/110 volts para 12volts.</li> </ul>
4	Softwares	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Rhinoceros versão 5.0;</i></li> <li>▪ <i>Grasshopper;</i></li> <li>▪ <i>Kuka prc;</i></li> <li>▪ <i>RoboDK.</i></li> </ul>
5	Material de impressão 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Filamento de ácido poliláctico - <i>PLA.</i></li> </ul>
6	Material de construção	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Isopor de densidade F1;</li> <li>▪ Vara de alumínio;</li> <li>▪ Parafusos;</li> <li>▪ Porcas borboleta.</li> </ul>

7	Material elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fio de níquel;</li> <li>▪ Cabos elétricos;</li> <li>▪ Alicates de bico;</li> <li>▪ Fita isolante de autofusão.</li> </ul>
8	Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automóvel próprio.</li> </ul>
9	Material para proteção individual	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Óculos de proteção;</li> <li>▪ Respirador para vapores orgânicos semi facial vapores com 2 filtros worker;</li> <li>▪ Luvas de látex.</li> </ul>
10	Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Autor da tese;</li> <li>▪ Professor do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal de Goiás.</li> </ul>

## APÊNDICE VIII – Produtos gerados nos experimentos

Tabela 29: Produtos gerados nos experimentos

### 1. Protótipo de Pavilhão Biônico de Forma Complexa em Papelão em escala 1:1



Exposição Hall Biblioteca UFG – Campus Samambaia (esquerda) e Exposição Faculdade de Letras UFG – Campus Samambaia (direita). Fonte: Própria

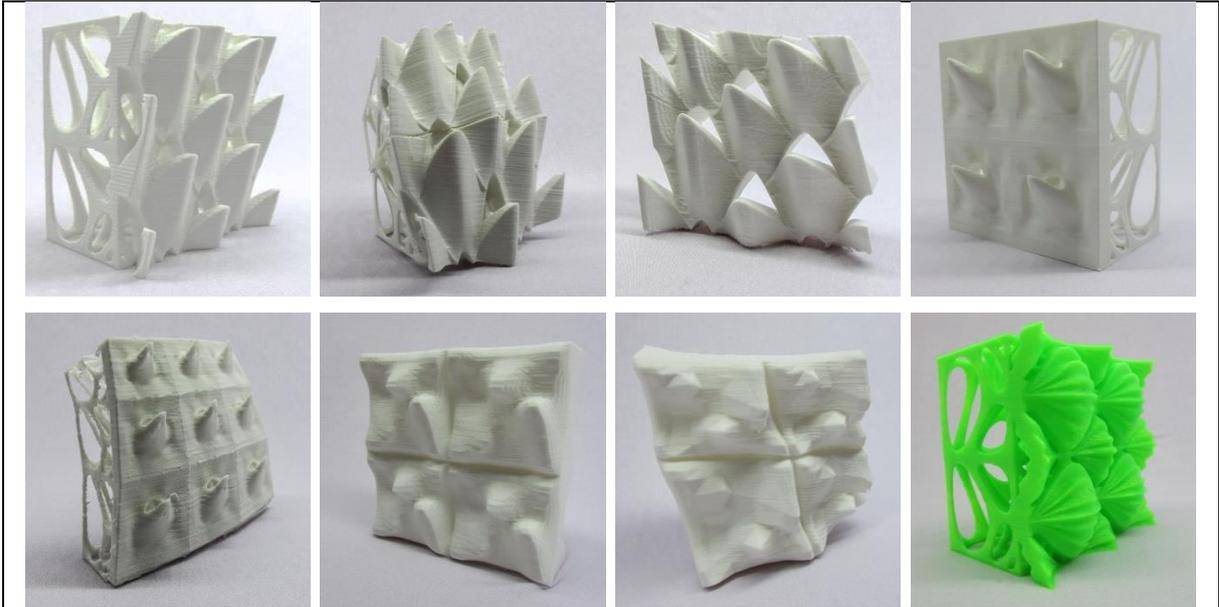
### 2. Protótipo de Pavilhão Biônico em Tamanho Reduzido



Exposição Hall Biblioteca Seccional Campus Colemar Natal e Silva UFG – Setor Universitário. Fonte: Própria

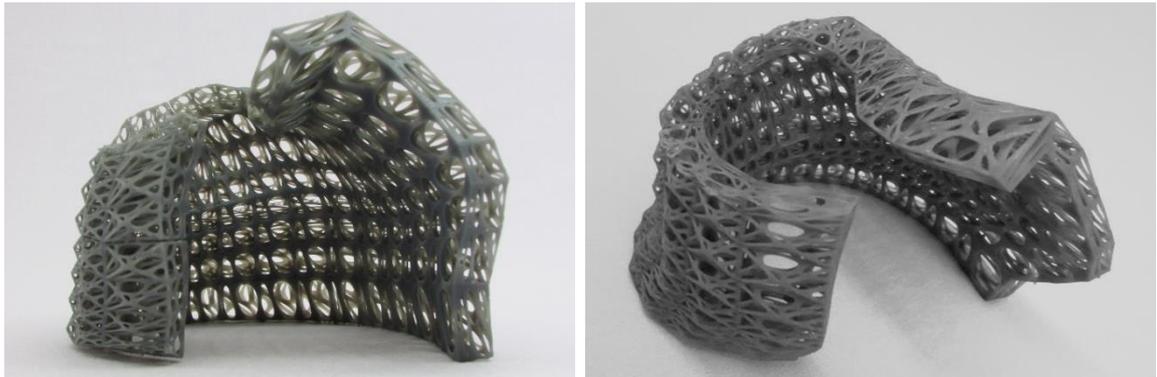
### 3. Protótipos de Células Estruturais





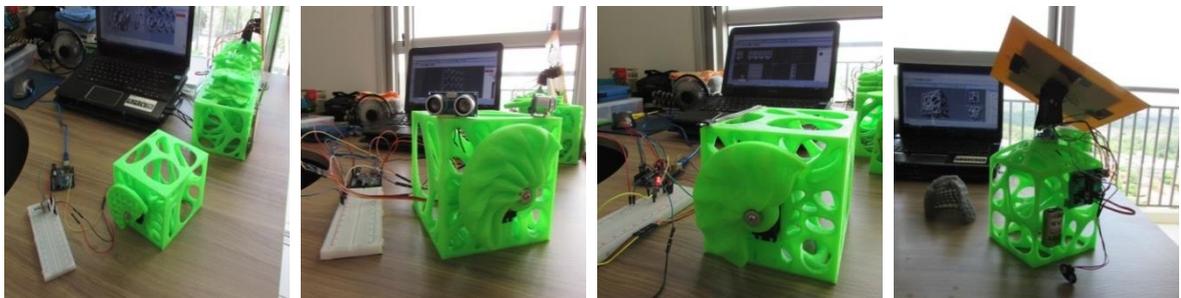
Fonte: Própria

#### 4. Protótipo de Reformulação do Pavilhão de Forma Complexa em tamanho reduzido



Fonte: Própria

#### 5. Protótipos de Células e Painéis Responsivos





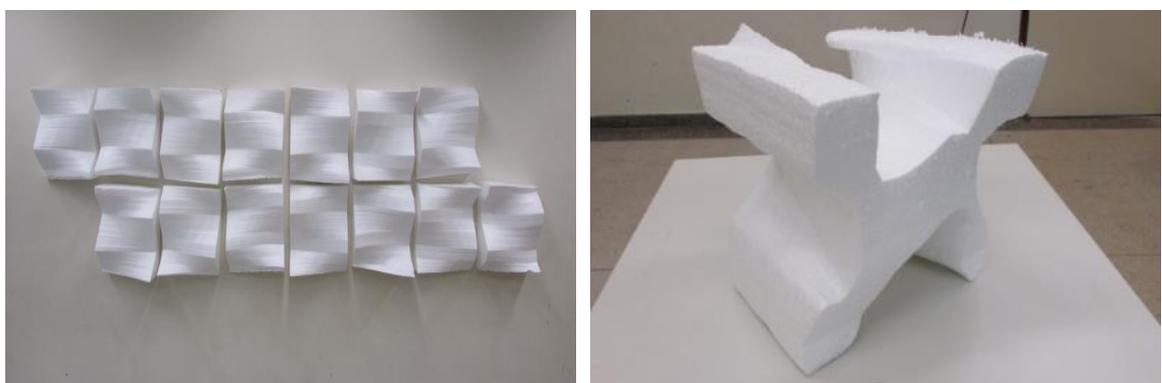
Fonte: Própria

**6. Protótipo de Peça Biônica Fabricada por Fundição de Alumínio com Modelo perdido de PLA**



Fonte: Própria

**7. Protótipos de Peças fabricadas com Fio Quente em Braço Robótico Antropomórfico**



Painel com peças de forma simples (esquerda) e Peça de forma semicomplexa (direita). Fonte: Própria

