

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES E COMUNICAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Thaís Regina Ueno Yamada

**Estruturas *flat foldable* em Bambu Laminado Colado
baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do *kirigami***

Bauru

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES E COMUNICAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Thaís Regina Ueno Yamada

**Estruturas *flat foldable* em Bambu Laminado Colado
baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do *kirigami***

Tese de Doutorado apresentada para a obtenção do título de Doutor em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, na linha de pesquisa em Planejamento de Produto, sob a orientação do Prof. Dr. Roberto Alcarria do Nascimento e co-orientação do Prof. Dr. Marco Antonio dos Reis Pereira.

Bauru

2016

Yamada, Thaís Regina Ueno.

Estruturas *flat foldable* em Bambu Laminado Colado baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do *kirigami* / Thaís Regina Ueno Yamada, 2016

222 f. : il.

Orientador: Roberto Alcarria do Nascimento

Co-orientador: Marco Antonio dos Reis Pereira

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, 2016

1. Design. 2. Bambu Laminado Colado. 3. Técnicas de dobra. 4. Técnicas de corte. 5. *Flat foldability*. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. II. Título.

Thaís Regina Ueno Yamada

Estruturas *flat foldable* em Bambu Laminado Colado baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do *kirigami*

Tese de Doutorado apresentada para a obtenção do título de Doutor em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, na linha de pesquisa em Planejamento de Produto

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Alcarria do Nascimento (Orientador)
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Prof. Dr. Luis Carlos Paschoarelli
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Prof. Dr. José Carlos Plácido da Silva
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Bauru, 2 de setembro de 2016

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE THAIS REGINA UENO YAMADA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES E COMUNICAÇÃO.

Aos 02 dias do mês de setembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) Auditório dos Programas de Pós-grduação da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Professor Doutor ROBERTO ALCARRIA DO NASCIMENTO - Orientador(a) do(a) Departamento de Artes e Representação Gráfica / Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação - UNESP, Prof. Dr. LUIS CARLOS PASCHOARELLI do(a) Departamento de Design / Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicacao de Bauru, Prof. Dr. MARCOS TADEU T GONCALVES do(a) Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva, PROFESSOR DOUTOR ANTONIO LUDOVICO BERALDO do(a) Departamento de Construções Rurais / UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Prof. Dr. JOSE CARLOS PLACIDO DA SILVA do(a) Departamento de Desenho Industrial / Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicacao de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de THAIS REGINA UENO YAMADA, intitulada **Estruturas flat foldable em Bambu Laminado Colado baseadas em técnicas de dobra e corte do origami e do kirigami**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Professor Doutor ROBERTO ALCARRIA DO NASCIMENTO


Prof. Dr. LUIS CARLOS PASCHOARELLI


Prof. Dr. MARCOS TADEU T GONCALVES


PROFESSOR DOUTOR ANTONIO LUDOVICO BERALDO


Prof. Dr. JOSE CARLOS PLACIDO DA SILVA

Dedicatória

Aos meus pais Takashi e Júlia, à minha irmã Patrícia e ao meu esposo Ricardo,
pelo amor à toda prova.

Ao meu bom Deus, por tudo.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho:

Ao José Maria, que literalmente deu sangue e suor na colheita dos bambus.

Aos bolsistas do Projeto Taquara, pela grande ajuda no Laboratório de Experimentação com Bambu, por meio do processamento de dezenas de ripas e do registro das etapas do processo.

Ao Cláudio, da Oficina de Marcenaria, pelo seu amplo conhecimento de marcenaria e pelo seu grande auxílio na montagem dos modelos físicos.

Ao Prof. Dr. Osmar Vicente Rodrigues e bolsistas do CADEP - Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos, pela disponibilidade e execução da usinagem dos modelos.

Ao meu esposo, Ricardo Yamada, por ter dado, além de todo apoio nos bastidores, seu "toque" na produção de algumas fotografias que ilustram este relatório.

A todos os funcionários da secretaria da Seção de Pós - Graduação.

A todos os professores do Programa de Pós - Graduação em Design.

Aos professores da banca de defesa, por aceitarem o convite para participar desta etapa tão importante em minha vida.

A todos que, como eu, lutaram com toda a força e todo o espírito para caminhar em direção ao futuro que acreditam.

E um agradecimento muito especial aos meus guias:

Meu co-orientador, Prof. Dr. Marco Antonio dos Reis Pereira, por ter acreditado no meu trabalho e me incentivado desde o início, mostrando-se sempre empolgado e animado com o desafio que se apresentava;

E meu orientador, Prof. Dr. Roberto Alcarria do Nascimento, que, além da orientação e do apoio constante, traz as palavras certas na hora certa, sendo meu grande mestre norteador e amigo.

Deus abençoe a todos!

Resumo

Além da busca constante por inovação, uma das principais funções do designer é projetar visando à sustentabilidade de seus produtos. Com a necessidade atual de produtos sustentáveis, o bambu se apresenta como uma alternativa de material ecologicamente eficiente. Entre as opções mais promissoras dos painéis de bambu para o design de novo produtos está o Bambu Laminado Colado (BLaC), um material de alta qualidade estética visual e características físico-mecânicas semelhantes às madeiras de média densidade. Como ele é pouco conhecido pelo mercado nacional e pouco explorado comercialmente, busca-se através dessa pesquisa uma nova estratégia para conferir diferentes funcionalidades a esse material, ampliando suas possibilidades de uso. A partir do final do século passado, cientistas se voltaram para as antigas técnicas tradicionais de dobrar e cortar papeis chamadas de origami e *kirigami*, e, na busca por inter-relações com a geometria e a matemática, e descobriram suas potencialidades no desenvolvimento de produtos inovadores nos campos da engenharia e da arquitetura, revolucionando a resolução de problemas concretos e atuais. Isso porque essas técnicas tradicionais podem ser adequadas na criação de estruturas em diversos materiais que se transformam de bidimensionais para tridimensionais através de "dobras", suprimindo a necessidade de economia de espaço e flexibilidade de uso. Assim, esta pesquisa busca combinar o uso do BLaC com as técnicas de corte e de dobra do origami e do *kirigami*, no desenvolvimento de estruturas articuladas denominadas *flat foldable*, ou seja, que são capazes de se achatarem por completo durante o movimento de abertura ou fechamento, organizando um processo de construção para validar estratégias de aplicação e determinando suas possibilidades e seus limites. Assim, primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o bambu e o Bambu Laminado Colado, especialmente em relação às suas características gerais, técnicas de produção e usos no design de produto. Posteriormente, conheceu-se a trajetória que o origami e o *kirigami* percorreram, desde suas primeiras manifestações até sua contribuição na matemática e na engenharia. Em seguida, estabeleceu-se os elementos essenciais e os princípios básicos de todo modelo de origami e *kirigami*, a fim de organizar uma sintaxe de sua linguagem e conhecer as características específicas que atribuem a qualidade *flat foldable* aos seus modelos. Técnicas de dobra e de corte básicas do origami e do *kirigami* foram selecionadas para a análise de seu emprego em projetos de produtos a fim de conhecer as mais utilizadas e as que ainda não foram pesquisadas. Dessas últimas, cinco foram selecionadas para a montagem de estruturas *flat foldable* com BLaC. Para iniciar, foram empregados modelos físicos em papel e virtuais com o auxílio do programa SolidWorks, que possibilitaram essa transposição. Durante o processo de usinagem das placas de BLaC e montagem dos modelos físicos, foi avaliada a aplicabilidade dessa estratégia na construção de estruturas articuladas, buscando-se, ao final de todos os experimentos, validar suas possibilidades e seus limites.

Palavras-chave: design, Bambu Laminado Colado, técnicas de dobra, técnicas de corte, *flat foldability*

Abstract

Beyond the constant research for innovation by designers, one of the main functions is to design focused in sustainability of their products. With the reduction of wood supply and the current need for sustainable products, bamboo appears as an alternative eco-efficient material. Among the most promising options for bamboo panels for new product design is the Glued Laminated Bamboo (GLB), a high-quality material with excellent visual aesthetics, physical and mechanical characteristics similar to medium density wood. As it is not well known by industry and not yet fully explored in national market, this works presents a research that seeks a new strategy to give different functionality to the material, increasing its possibilities of use. From the end of last century, scientists have turned their attention to the old traditional techniques of folding and cutting called as origami and *kirigami*, and discovered their interrelations with geometry and mathematics and their potential in development of innovative products in engineering and architecture fields, revolutionizing the resolution of real and current problems. This is because these traditional technique may be appropriate in the creation of structures of different materials which become two-dimensional to three-dimensional through "folds", supplying the need for space economy and flexibility of use. Thus, this research seeks to combine the use of Glued Laminated Bamboo with folding and cutting techniques of origami and *kirigami* in development of articulated flat foldable structures, which are able to flatten completely during the opening or closing movement, organizing a design process to validate application strategies and determining its possibilities and its limits. So, first it will be presented a brief literature review on bamboo and GLB, especially with regard to its general characteristics, production techniques and uses in product design. Later, a brief literature review about origami and *kirigami* history from the very first examples to their recent contributions in mathematics and engineering, as well as its most basic folding techniques. Then it will be presented the principles and basics of all origami and *kirigami* model in order to organize a syntax of their language and to know the specific characteristics of flat foldable models. Folding and cutting techniques were selected for analysis of their use in product designs in order to meet the most used and those that have not yet been surveyed. From these, five techniques were selected for flat foldable design structures with GLB. To initiate, physical paper models were created in order to help modeling virtual examples using SolidWorks program, which enabled this transposition. During rapid prototyping process and woodworking of physical models in GLB, it was evaluated the applicability of this strategy in the construction of articulated structures, searching for validate its possibilities and its limits at the end of all experiments.

Palavras-chave: design, Glued Laminated Bamboo, folding techniques, cutting techniques, *flat foldability*

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Quadros

Lista de Abreviaturas e Siglas

1. Introdução	21
1.1. Objetivos	24
1.2. Estrutura do trabalho	25
2. Estado da Arte	27
2.1. O Bambu	27
2.1.1. <i>Características gerais do bambu</i>	31
2.1.2. <i>Características biológicas e morfológicas do bambu</i>	34
2.1.3. <i>Propagação, colheita e tratamento do bambu</i>	36
2.1.4. <i>Bambu Laminado Colado (BLaC) e seu processo de produção em laboratório</i>	39
2.1.5. <i>Características físicas e mecânicas do BLaC</i>	44
2.1.6. <i>O BLaC no design de produtos</i>	47
2.2. Origami e Kirigami	51
2.2.1. <i>Origem e Trajetória</i>	52
2.2.2. <i>Potencial Lúdico e Educacional</i>	58
2.2.3. <i>Potencial Criativo</i>	60
2.2.4. <i>Potencial Matemático e Aplicado</i>	64
2.3. Design do Origami e do Kirigami	74
2.3.1. <i>Elementos e princípios do design orikiri</i>	74
2.3.2. <i>Flat foldability</i>	78
2.3.3. <i>Técnicas básicas de dobra</i>	82
2.3.4. <i>Técnicas básicas de corte e dobra</i>	91
2.3.5. <i>Uma classificação para o design orikiri</i>	96
2.4. Origamics e design	104
2.4.1. <i>Madeira e bambu</i>	114
3. Materiais e Métodos	125
3.1. Métodos	125

3.2. Materiais	125
3.2.1. <i>Bambu Laminado Colado</i>	125
3.2.2. <i>Papel</i>	126
3.2.3. <i>Programas gráficos de modelagem tridimensional</i>	126
3.2.4. <i>Articulações</i>	127
3.2.5. <i>Tecnologias de prototipagem</i>	127
3.2.6. <i>Registro</i>	128
3.3. Procedimentos da Pesquisa	128
3.3.1. <i>Definição dos tipos de dobra e de corte</i>	128
3.3.2. <i>Definição da espessura da placa de BLaC</i>	131
3.3.3. <i>Definição do tipo de dobradiça</i>	132
3.3.4. <i>Etapas dos procedimentos experimentais</i>	133
3.3.5. <i>Colheita e Produção das Placas de BLaC</i>	135
4. Resultados e análises	142
4.1. <i>Kirigami 3D da modalidade 90° - Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio</i>	142
4.2. <i>Padrão Yoshimura</i>	154
4.3. <i>Kirigami 3D da modalidade 360° - Técnica da Caixa Diagonal</i>	164
4.4. <i>Miura-ori</i>	169
4.5. <i>Kirigami 3D da modalidade 180° - Técnica da Caixa Paralela</i>	189
4.6. <i>A espessura e a relação com as colisões</i>	198
5. Conclusões	207
6. Desdobramentos da pesquisa	212
7. Referências	214

Lista de figuras

Figura 1 - Touceira de <i>Dendrocalamus asper</i> da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Bauru	33
Figura 2 - Seção de um colmo com suas denominações.....	34
Figura 3 - Representação gráfica da estrutura dos bambus dos tipos paquimorfo e leptomorfo	36
Figura 4 - Colmos jovens (letra O) e colmo mais maduro (letra K), apresentando manchas de fungos e líquens	38
Figura 5 - Heterogeneidade da distribuição dos elementos anatômicos do bambu ao longo da espessura da parede	40
Figura 6 - Da esquerda para a direita: corte, imersão, secagem e beneficiamento inicial.....	41
Figura 7 - Etapas do processamento das ripas de bambu	41
Figura 8 - Colagem e prensagem das ripas.....	41
Figura 9 - Da esquerda para a direita: (a) painéis de ripas coladas na horizontal; (b) na vertical e (c) em direções alternadas	42
Figura 10 - De cima para baixo: cor natural, descolorida e tratada termicamente.....	42
Figura 11 - Ripas de bambu termorretificado (BTR), organizados de acordo com a temperatura de tratamento térmico (de cima para baixo): 300°C, 260°C, 220°C, 180°C, 140°C e controle (seco ao ar)	43
Figura 12 - Inchamento do BTR de acordo com a direção anatômica	46
Figura 13 - Móveis em BLaC de Rick Lee	47
Figura 14 - Algumas das peças produzidas no Laboratório de Experimentação com Bambu .	48
Figura 15 - Cadeira em lâminas de bambu de Remy & Veenhuizen	48
Figura 16 - Linha <i>Obi Dining</i> e linha SEE da TAKE de Miko Paakkanen	49
Figura 17 - Mesa de centro e de canto da linha Origami da TAKE de Miko Paakkanen	50
Figura 18 - <i>Sembazuru Origata</i>	52
Figura 19 - <i>Kirigami senshi, sanshi e kokushi</i> , respectivamente	53
Figura 20 - Modelos " <i>Congratulation</i> " e " <i>Escher House 1</i> "	54
Figura 21 - Perfil do movimento de fechamento e abertura de um modelo em origami arquetetônico 90°	55
Figura 22 - Modelo 180° simétrico (esquerda) e em fatias (direita).....	55
Figura 23 - Visualização do fechamento de um modelo simétrico 180°	55
Figura 24 - Processo de abertura de um modelo 360°	56
Figura 25 - " <i>Reefy Shore</i> ". Modelo 0°, visualizado fechado e aberto, com suas múltiplas camadas de papel.....	56
Figura 26 - Exemplos de aplicações comuns do <i>kirigami</i>	57
Figura 27 - Experiências de Josef Albers na Bauhaus.....	59
Figura 28 - Formas 3D obtidas a partir de corte e dobra em experiências de Hiromitsu Kawai e Munari	59

Figura 29 - Obras de Eric Joisel: " <i>Crane Viking</i> " e o detalhe das dobras da cabeça do " <i>Balrog</i> "	61
Figura 30 - Obras de Robert Lang: " <i>Bull Moose</i> " e " <i>Oval Tessellation</i> "	61
Figura 31 - Obras de Maria Victoria Garrido: " <i>Pergola</i> " e " <i>Kiss</i> "	62
Figura 32 - Obras de Ingrid Siliakus, dos Países Baixos	62
Figura 33 - Alguns cartões que compõem o Poemóviles	63
Figura 34 - Obras de Lygia Clark, 1960: "Bicho" (esquerda) e "Relógio de Sol" (direita)	63
Figura 35 - Obras sem título de Amílcar de Castro, entre as décadas de 1970 e 1980	64
Figura 36 - Axiomas de Huzita-Hatori	66
Figura 37 - Origami de um gafanhoto voador: diagrama de dobra, formato básico, e formato final	67
Figura 38 - Tela do programa Tess: padrão inicial (à esquerda) e o diagrama gerado (à direita)	67
Figura 39 - Tessellation " <i>Spread hexagon</i> ": diagrama (esq.), e o modelo finalizado visto de frente e verso	68
Figura 40 – Um modelo de tessellation com movimento: " <i>Waterbomb</i> "	68
Figura 41 - <i>Pop-up Card Designer</i>	69
Figura 42 - " <i>Hexagonal column with cusps</i> " de Huffman: modelo dobrado e diagrama correspondente, que emprega arcos de circunferência (ci) e linhas retas	69
Figura 43 - Miura-Ori original e sua aplicação em mapas	70
Figura 44 - Dobra de Miura aplicada no projeto <i>Space Flyer Unit</i>	71
Figura 45 - Latas dobráveis	71
Figura 46 - Origami <i>stent graft</i>	72
Figura 47 - Dobra vale (tracejado) e dobra montanha (pontilhado)	75
Figura 48 - Dobra simétrica <i>flat foldable</i> (foto e padrão de dobra à esquerda) e uma variação sem achatamento total (à direita)	79
Figura 49 - Esquema de quebra da simetria sem perder a habilidade de achatamento: $a+a=b+b=c+c=d+d=180^\circ$	79
Figura 50 - Correspondências do ponto A a 90° e na abertura a 180°	80
Figura 51 - Localização do ponto A e as diferentes relações entre cota (c) e afastamento (f)	80
Figura 52 – Determinação das linhas de dobra e corte em estruturas simétricas (a) e assimétricas (b)	81
Figura 53 - Modelos <i>flat foldable</i>	82
Figura 54 - Técnicas de divisão do papel: a) linear; b) rotacional; c) diagonal, d) <i>grid</i>	83
Figura 55 - Repetições simétricas: a) translação; b) reflexão; c) rotação; d) reflexão com translação	84
Figura 56 - Exemplos: a) desenho de origem; b) alongamento; c) inclinação	84
Figura 57 - Perfil das quatro dobras básicas	85
Figura 58 - Variações das dobras básicas (sentido horário): linear, rotacional, cônica e cilíndrica	85
Figura 59 - Variação de caixas espiraladas e dobras torcidas	86

Figura 60 - Dobra-V e sua capacidade de achatamento	86
Figura 61 - Variações da Dobra-V.....	87
Figura 62 - Múltiplos Vs.....	87
Figura 63 - Variações da Dobra-V.....	88
Figura 64 - Arco Dobrável a partir da Forma-X. Padrão Yoshimura.....	89
Figura 65 - Arco Dobrável a partir da Dobra-V.....	89
Figura 66 - Parabolóide hiperbólico dobrado	90
Figura 67 - Modelos sem vinco e com apenas um vinco	90
Figura 68 - Corte único e variações no ângulo da dobra, no ângulo do corte e no formato do corte	92
Figura 69 - Variações de corte assimétrico e desvios no formato do desenho	92
Figura 70 - Gerações de cortes duplos paralelos	93
Figura 71 - " <i>Mayan Pyramid</i> ". Exemplo da Técnica da Geração de Cortes.....	93
Figura 72 - " <i>Wedding Palace</i> ". Exemplo da Técnica dos Múltiplos Cortes	93
Figura 73 - Modelo básico da Técnica do Degrau (esquerda) e uma variação (direita)	94
Figura 74 - Técnica das Asas: modelo básico	94
Figura 75 - Técnica V-Horizontal	95
Figura 76 - Técnica Caixa Diagonal e variações com outros polígonos.....	95
Figura 77 - Técnica da Caixa Paralela	96
Figura 78 - Exemplo da Técnica da Treliça	96
Figura 79 - <i>Design Styles Overview</i>	98
Figura 80 - Classificação de Padrões de <i>Tesselation</i> segundo Ruysser	99
Figura 81 - Padrão plano e suas três variações.....	99
Figura 82 - Exemplos de Origami modular plano e tridimensional	100
Figura 83- Palmas: uma série de vasos de concreto baseados no modelo <i>Diamond</i> de Garibi, 2012.....	108
Figura 84 - Tavolini: série de mesas de canto feitas de metal e madeira dobradas à mão, 2013	108
Figura 85 - <i>Metal Origami Sculptures</i> . Chapa de aço inoxidável com 1 mm de espessura, cortado à laser e dobrado à mão	108
Figura 86 - Design de Jóias com origami	109
Figura 87 - Projeto Abrigo-Origami-Contêiner.....	110
Figura 88 - Coleção <i>IN-EI</i> , que em japonês significa "sombra", "nuance"	111
Figura 89 - Capa e bracelete da série " <i>Wearable Metal Origami</i> " de Ruysser.....	111
Figura 90 - Montagem da casa de 6 m ² da Global Village Shelters	112
Figura 91 - <i>Canary Wharf Kiosk</i> : aberto, fechado e detalhe das dobradiças metálicas	113
Figura 92 - <i>Kiefer Technic Showroom</i> e algumas configurações da sua fachada.....	114
Figura 93 - Módulos da composição do protótipo.....	115
Figura 94 - Protótipo finalizado e submetido aos testes mecânicos	115
Figura 95 - Segundo protótipo	116
Figura 96 - Capela provisória de Saint Loup.....	117

Figura 97 - Carabanchel e sua fachada de placas de bambu articuladas.....	117
Figura 98 - <i>Folded Bamboo House</i> e suas possibilidades de configurações	118
Figura 99 - A articulação das mesas e a composição do espaço.....	118
Figura 100 - Estrutura em origami e o protótipo do painel de ressonância	119
Figura 101 - Banco em BLaC com influência do origami em sua estrutura	120
Figura 102 - Mesa retrátil de parede (esquerda).....	120
Figura 103 - <i>Rising Table</i> e <i>Rising Chair</i> do designer alemão Robert Van Embricqs.....	121
Figura 104 - Representação gráfica da composição de placas com tecido no meio	122
Figura 105 - Representação gráfica do uso de pinos para articulação de duas placas.....	122
Figura 106 - Dimensões de algumas das menores dobradiças disponíveis no mercado.....	133
Figura 107 - Moita de <i>D. asper</i> ; corte com a moto-serra;	135
Figura 108 - Colmos no tanque para tratamento preventivo e secagem	136
Figura 109 - Detalhe da posição das lâminas de corte da refiladeira dupla na seção do colmo	136
Figura 110 - Seção de colmo e aproveitamento em ripas	137
Figura 111 - Tratamento das ripas e secagem	137
Figura 112 - Corte das protuberâncias das ripas.....	137
Figura 113 - O processamento da ripa na plaina duas faces	138
Figura 114 - Colagem e prensagem das ripas laminadas	138
Figura 115 - Entrada da placa de desgrossadeira (esquerda) e sua aplainagem (direita). 139	
Figura 116 - As placas antes e depois de passarem na plaina desgrossadeira	139
Figura 117 - Corte na serra circular de bancada para ajustes.....	140
Figura 118 - Colagem das camadas	140
Figura 119 - Prensagem das ripas coladas	140
Figura 120 - Estudo do movimento entre as partes durante o fechamento	142
Figura 121 - Modelo aberto em 180° (esq.) e outro ponto de vista do modelo.....	143
Figura 122 - Em vermelho, as dobradiças devem ser colocadas visando uma "dobra vale"; em verde, uma "dobra montanha"	143
Figura 123 - Desenhos técnicos das peças do modelo (dimensões em mm e sem escala)... 144	
Figura 124 - Posicionamento coincidente entre as arestas de duas peças e seus pontos médios.....	145
Figura 125 - Atribuição de aparência de material.....	146
Figura 126 - Edição de propriedades do material	146
Figura 127 - Movimento dos componentes até o momento da colisão (faces realçadas em azul)	147
Figura 128 - Fechamento da estrutura modelada	148
Figura 129- Observação da vista superior da estrutura montada, do seu movimento de abertura e fechamento	148
Figura 130 - Distribuição das peças do modelo nas placas (dimensões em mm).....	149
Figura 131 - Fixação da fita VHB nas placas e na mesa.....	149
Figura 132 - Acabamento da usinagem com fresa usada	150

Figura 133 - Problemas ocorridos durante a usinagem	151
Figura 134 - Placa 1 ao final da usinagem. Detalhe da exatidão do processo	151
Figura 135 - Montagem prévia do modelo antes de iniciar a fixação das dobradiças	152
Figura 136 - Fixação das dobradiças por blocos.....	152
Figura 137 - Modelo físico em BLaC.....	153
Figura 138 - Estudos de posicionamento do modelo físico	153
Figura 139 - O mesmo modelo com 38 mm de espessura.....	154
Figura 140 - Padrão Yoshimura totalmente aberto e dobrado em arco	155
Figura 141 - Padrão Yoshimura em completo fechamento: tira fina retangular ou um hexágono multifacetado	155
Figura 142 - Aviso de que o modelo se encontra em posição de colisão	156
Figura 143 - Modelo em papelão: locais de dobra vale (esq.) e montanha (dir.).....	156
Figura 144 - Ponto crítico (em destaque) na dobra do Padrão Yoshimura durante o movimento de fechamento.....	157
Figura 145 - Modificação na geometria e fechamento total bem sucedido.....	158
Figura 146 - Desenho técnico das peças do modelo Yoshimura	158
Figura 147 - Imagens em sequência do movimento do modelo no <i>SolidWorks</i>	159
Figura 148 - Distribuição das peças do modelo em duas placas (dimensões em mm)	159
Figura 149 - Usinagem com a fresa nova: melhor acabamento	160
Figura 150 - Destaque da usinagem incorreta na última linha de peças.....	160
Figura 151 - Desenho da placa prevista para outro modelo (dimensões em mm)	161
Figura 152 - Desenho da placa readequada para a reposição das peças perdidas (dimensões em mm)	161
Figura 153 - Esqueleto da placa usinada.....	162
Figura 154 - Distribuição das dobradiças no modelo: vermelho para dobra vale e verde para dobra montanha.....	163
Figura 155 - A flexibilidade do modelo físico em BLaC	163
Figura 156 - Modelo virtual com 38 mm de espessura.....	164
Figura 157 - Movimento de abertura em 360° do modelo escolhido	164
Figura 158 - Desenho técnico da peça componente do modelo (dimensões em mm).....	165
Figura 159 - Movimento do modelo no <i>SolidWorks</i>	166
Figura 160 - Usinagem dos detalhes internos do modelo	166
Figura 161 - Placa com a primeira etapa concluída: usinagem dos detalhes internos das peças	167
Figura 162 - Usinagem da parte externa das peças	167
Figura 163 - Esqueleto da placa usinada.....	168
Figura 164 - Primeira etapa da montagem	168
Figura 165 - Modelo físico previsto.....	169
Figura 166 - Diferentes configurações do modelo.....	169
Figura 167 - Estudo do movimento entre as partes durante a abertura e o fechamento	170
Figura 168 - Modelo em papelão: locais de dobra vale (esq.) e dobra montanha (dir.)	170

Figura 169 - Estudo do movimento no modelo em papelão	171
Figura 170 - Ponto crítico (em destaque) no fechamento do modelo	171
Figura 171 - Desenho técnico inicial das peças do modelo (dimensões em mm, fora de escala).....	172
Figura 172 - Colisão 1 detectada	172
Figura 173 - Colisão 2 detectada	173
Figura 174 - Colisão 3 detectada	173
Figura 175 - Correção da colisão 3	174
Figura 176 - Colisão 4 (esq.) e correção (dir.)	174
Figura 177 - Colisão 5 (vista frontal) e correção (dir.).....	175
Figura 178 - Colisão 6 (vista posterior) e correção (vista frontal) à direita	175
Figura 179 - Vista superior do fechamento máximo do modelo	175
Figura 180 - Imagens em sequência do movimento do modelo no SolidWorks	176
Figura 181 - Distribuição do primeiro grupo de peças do modelo em uma placa.....	176
Figura 182 - Usinagem da placa	177
Figura 183 - Peças usinadas e esqueleto da placa	177
Figura 184 - Usinagem da peça com chanfro: desbaste de uma superfície	178
Figura 185 - Usinagem da superfície posterior e correção de defeitos da placa.....	178
Figura 186 - Face 1 da peça ao final do desbaste (esq.) e detalhe do chanfro (dir.)	179
Figura 187 - Face 2 da peça ao final do desbaste (esq.) e detalhe do chanfro (dir.)	179
Figura 188 - Acabamento do chanfro.....	179
Figura 189 - Detalhe dos dois chanfros com acabamento finalizado: o da direita se quebrou durante o processo de usinagem	180
Figura 190 - Quebras ocorridas nas pontas das duas primeiras peças e corte adotado final (última figura à direita)	181
Figura 191 - Desenho técnico final das peças só com chanfro nos vértices (fora de escala) - medidas em mm.....	181
Figura 192 - Desenho técnico final da peça 2A com chanfro na superfície (fora de escala) - medidas em mm.....	182
Figura 193 - Desenho técnico final da peça 2B com chanfro na superfície (fora de escala) - medidas em mm.....	182
Figura 194 - Distribuição das dobradiças no modelo Miura-Ori: vermelho (dobra vale) e verde (dobra montanha)	183
Figura 195 - Diferentes configurações do modelo criado	184
Figura 196 - Modelo virtual com 38 mm de espessura apenas nas peças sem chanfros nas superfícies	184
Figura 197 - Colisão 1 detectada	185
Figura 198 - Etapas de correção da colisão 1	185
Figura 199 - Observação da correção da colisão 1.....	185
Figura 200 - Colisão 2 detectada	186
Figura 201 - Colisão 2 corrigida	186

Figura 202 - Vista frontal, posterior e superior da colisão 3.....	187
Figura 203 - Corte das "quinas" das peças que estavam se colidindo.....	187
Figura 204 - Colisão 4 detectada (esq.) e correção (detalhe)	188
Figura 205 - Colisão 5: máxima abertura da estrutura	188
Figura 206 - Vista lateral e superior da estrutura com a máxima abertura.....	189
Figura 207 - Vista superior e em perspectiva da estrutura dobrada	189
Figura 208 - Modelo base de Técnica da Caixa Paralela adotado.....	190
Figura 209 - Primeiro modelo com duas placas formando a base.....	190
Figura 210 - Desenho técnico das peças do prisma (fora de escala) - medidas em mm.....	191
Figura 211 - Desenho técnico das peças da base (fora de escala) - medidas em mm.....	191
Figura 212 - Estudo do movimento da estrutura montada	192
Figura 213 - Detalhe da vista lateral	192
Figura 214 - Distribuição das peças 1, 2 e 4 na placa de 825 mm x 210 mm	193
Figura 215 - Distribuição das duas peças 3 na placa de 820 mm x 295 mm.....	193
Figura 216 - Posicionamento das dobradiças na montagem do prisma.....	194
Figura 217 - Posicionamento das dobradiças na montagem da base.....	194
Figura 218 - Posicionamento do prisma sobre a base na linha de simetria (linha traço-ponto) e localização das dobradiças (em vermelho)	195
Figura 219 - Modelo final montado	196
Figura 220 - Primeira etapa com espessura de 38 mm na estrutura independente. À esquerda, a peça 4 é muito pequena para ocorrer o fechamento total da estrutura. À direita, a peça 4 com a correção da medida	196
Figura 221 - Vista em perspectiva do modelo aberto completo com espessura de 38 mm .	197
Figura 222 - Vista em perspectiva do modelo fechado.....	197
Figura 223 - Dobras paralelas umas às outras da primeira estrutura pesquisada	198
Figura 224 - a) Modelo com dobras paralelas (sem possibilidade de colisão); b) Modelo com dobras oblíquas (pode ocorrer colisão)	199
Figura 225 - Pavimentação completa do plano no modelo à esquerda em torno do nó. No modelo à direita, o nó não está completamente preenchido	199
Figura 226 - Inserção do nó nos vértices dos triângulos da malha para possibilitar o movimento de dobra.....	200
Figura 227 - Comparação da malha original de triângulos e a estrutura que possibilitou o movimento de dobra do Padrão Yoshimura. No detalhe A, observam-se os seis vértices gerados com o chanfro.....	200
Figura 228 - Malhas regulares.....	201
Figura 229 - Modelo com a Técnica da Caixa Paralela em formato de pirâmide	201
Figura 230 - Movimento da pirâmide	202
Figura 231 - Planificação da pirâmide, podendo-se verificar que em torno do nó não há uma completa pavimentação.....	202
Figura 232 - Vista superior dos vários vértices da pirâmide e detalhe à direita.....	203
Figura 233 - Vista superior do movimento de fechamento da pirâmide.....	203

Figura 234 - Máxima abertura da pirâmide (à esq.) e fechamento total (à dir.)	203
Figura 235 - Comparativo do posicionamento de cada par de planos: Miura-Ori (acima) e Padrão Yoshimura (abaixo)	204
Figura 236 - Simetrias de tipos de dobra presentes no Padrão Yoshimura.....	205
Figura 237 - Assimetria entre tipos de dobra em torno dos nós A e B do modelo Miura-Ori	205
Figura 238 - Simetria de translação invertida por conjuntos lineares	206

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação de tipos de dobra para o design <i>orikiri</i>	101
Tabela 2 - Classificação dos tipos de corte e dobra <i>flat foldable</i> para o design <i>orikiri</i>	103
Tabela 3 - Ocorrências dos tipos de dobras básicas em produtos.....	129
Tabela 4 - Ocorrências dos tipos de corte e dobra básicos em produtos.....	130

Lista de Quadros

Quadro 1 - Espécies prioritárias para a produção de BLaC	31
Quadro 2 - Diferenças entre os grupos entouceirantes e alastrantes	35
Quadro 3 - Origami e <i>kirigami</i> : trajetória e principais características em cada período	73

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BLaC	Bambu Laminado Colado
BTR	Bambu Termorretificado
CAD	<i>Computed-aided design</i> / Desenho assistido por computador
CADEP	Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos
CCB	Borato de Cobre Cromatado
CNC	Comando Numérico Computadorizado/Controle Numérico Computadorizado
GLB	<i>Glued Laminated Bamboo</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INBAR	<i>International Network for Bamboo and Rattan</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
OSME	<i>International Conference on Origami Science, Mathematics and Education</i>
PNMCB	Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu
PVA	Poliacetato de Vinila
RBB	Rede Brasileira do Bambu
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
VHB	<i>Very High Bond</i>

1. Introdução

Quando se desenvolvem novos produtos para o mercado consumidor, existem interesses de diversos setores que acabam por impulsionar uma lógica de produção e de consumo. Assim, os consumidores demandam novidades a preços razoáveis enquanto os vendedores buscam vantagens competitivas. Por sua vez, os empresários visam um rápido retorno financeiro de seus investimentos e os engenheiros de produção procuram melhorar e facilitar a fabricação e o transporte de produtos (BAXTER, 2003).

Cabe aos designers atender a todos esses interesses e levar em consideração mais alguns fatores, como a sustentabilidade. Esse aspecto deve estar presente durante todo planejamento de um novo produto, e não apenas em projetos específicos rotulados de ecodesign, design ecológico ou sustentável. Isso porque é de responsabilidade do designer a elaboração de todos os artefatos produzidos, transportados, utilizados e descartados diariamente pela população. Atentando-se para a sustentabilidade, busca-se uma mudança de atitude do designer e do mercado, assim como do modo de vida em geral, a fim de que os recursos naturais disponibilizados ao ser humano possam ser bem utilizados, visando sempre o equilíbrio necessário para que eles perdurem por muitas gerações.

Assim, a utilização de materiais sustentáveis e ecológicos é uma necessidade real, urgente e atual. Para isso, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2001) propõe, através de ações políticas, o desenvolvimento de processos alternativos, mais eficientes e ambientalmente saudáveis, mais limpos na produção e na utilização de produtos. Nesse sentido, o bambu se destaca como uma alternativa de material ecologicamente eficiente, pois apresenta adequada resistência mecânica e dureza por massa específica e possui um alto nível de produtividade, pois, em apenas dois anos e meio após ele ter brotado do solo, ele já apresenta resistência mecânica estrutural que não se encontra em muitas espécies do mundo vegetal. Além disso, ele é um eficiente sequestrador de carbono, contribuindo para o controle climático do planeta, desde que seu uso como produto seja prolongado.

O bambu é muito encontrado em regiões tropicais e subtropicais do mundo, mas particularmente na China, onde a produção de produtos artesanais e industriais com esse material é ampla e desenvolvida, explorando tanto o bambu *in natura* como processado na forma de painéis. Entretanto, apesar de apresentar muitas vantagens, como versatilidade de

usos, leveza aliada à resistência e facilidade em ser trabalhado (FARRELY, 1984), a exploração do bambu no Brasil ainda é muito restrita, sendo seu emprego limitado à produção de papel, de alguns artigos tradicionais e artesanais (como varas-de-pescar e móveis rústicos) e de brotos comestíveis (PEREIRA; BERALDO, 2008). Como é grande a ocorrência de bambu no país e ele é pouco explorado industrialmente, há um grande potencial a ser pesquisado na sua utilização como material sustentável.

Entre as opções mais promissoras dos painéis de bambu, o Bambu Laminado Colado (BLaC) é um material de alta qualidade estética visual e que apresenta características físico-mecânicas semelhantes às madeiras de média densidade, sendo adequado especialmente ao uso em produtos como móveis, pisos e outros objetos não estruturais Beraldo e Abbade (2003 apud PEREIRA; BERALDO, 2008). Ele ainda não é produzido industrialmente no Brasil, mas é possível encontrá-lo através de importadoras de produtos chineses, especialistas nessa área. Como o BLaC é pouco conhecido pelo mercado nacional e pouco explorado comercialmente, pesquisas nesse campo são escassas e portanto urgentes, especialmente na análise de suas características e na exploração através de pesquisas em design de suas potencialidades. Surge então a questão de pesquisa: **“Como conferir novas funcionalidades ao BLaC para ampliar as suas possibilidades de uso?”**

O design pode contribuir para o aumento do valor simbólico do uso do bambu, cuja imagem está fortemente relacionada no Brasil a móveis rústicos ultrapassados. Dessa maneira, o designer pode exercer sua capacidade de atuação como um grande catalisador para mudanças sociais efetivas, especialmente no caso de aceitação de um novo material, mais ecológico e sustentável. E para solucionar esse problema, ele deve combinar senso crítico, criatividade e praticidade (MANZINI, 2014), exercitando a inovação, base conceitual para a criação de algo verdadeiramente novo, através do exercício de associação, combinação e visão por diferentes ângulos de algo que já existe (BAXTER, 2003). Munari (1968) também reforçou o aspecto da inovação sugerindo ao designer explorar toda e qualquer técnica e material, sem preconceitos artísticos, visando obter o máximo resultado com o mínimo custo.

Nesse sentido, há uma tendência recente de inovação de produtos por meio da exploração das técnicas do origami e do *kirigami*, duas artes tradicionais que empregam dobras e cortes para a criação de estruturas. Dos modelos tradicionais simples às grandiosas

e complexas obras artísticas e ao seu uso como ferramenta educacional, elas vêm sendo especialmente empregadas, desde o final do século passado, na resolução de problemas muito comuns da sociedade moderna, como diminuição de custos de produção, transporte e armazenamento, além do aumento de possibilidades formais que trazem a versatilidade e a flexibilidade de uso como vantagens adicionais.

Segundo Stewart (2007), o origami e o *kirigami* são excelentes ferramentas para suprir a necessidade de economia de espaço, tanto em termos comerciais, de engenharia e de estrutura, e para a construção de formas elaboradas a partir de materiais planos simples, como folhas de papel, placas de madeira e chapas de metal. O autor afirmou que essa é uma nova disciplina, chamada “*origamics*”, uma combinação de Engenharia, Matemática e Biologia para a criação de novos produtos que atendam necessidades produtivas atuais.

Porém, nem todos os tipos de origami e *kirigami* são iguais, possuindo características muito específicas de técnicas de dobra e de corte. Os que apresentam o maior potencial para o design de produtos que se transformam durante o uso, flexíveis e versáteis, são aqueles com a característica denominada *flat foldability*, ou seja, os que são capazes de se transformar de 2D para 3D e de se achatarem por completo novamente.

Embora a maioria dos objetos projetados por designers seja elaborada a partir do corte e da dobra (ou outra ação similar, como vincar, torcer, curvar etc.) de materiais disponíveis em folhas ou placas, pouco se sabe como aproveitar todo o potencial dessa técnica, e sobra as possibilidades e os limites de sua transposição para um material que não seja o tradicional papel. Além disso, existem também as limitações técnicas e tecnológicas, que podem dificultar ou impossibilitar que determinado avanço seja efetuado nesse sentido.

Para o designer que deseja se aventurar no projeto de um produto a partir das técnicas de dobras e dos cortes utilizadas no origami e no *kirigami*, raras são as publicações e as pesquisas que tratam desse assunto, e nenhuma é do Brasil, não havendo uma metodologia de projeto nesse sentido. Na Europa, existem trabalhos envolvendo o estudo com metais e madeira, alguns *flat foldables*, mas como lá não há a ocorrência natural do bambu, nenhuma pesquisa na área do design tratou do estudo da aplicação dessas técnicas com placas desse material, especialmente do Bambu Laminado Colado (BLaC).

Assim, se combinados o uso de um material sustentável, pouco explorado e com grande potencial, como o BLaC, com as técnicas de corte e de dobra do origami e do *kirigami*

no desenvolvimento de estruturas *flat foldables* articuladas, novos caminhos podem ser descobertos, assim como podem ser vislumbradas novas possibilidades e limites determinados nessa área recente e inovadora.

Assim, retomando a questão de pesquisa anteriormente apresentada, a hipótese é a de que a aplicação das técnicas de corte e de dobra do origami e do *kirigami* ao BLaC, especialmente da qualidade *flat foldability*, pode promover transformações técnicas e estéticas, permitindo a obtenção de novas funcionalidades e aplicações que viabilizam e ampliam as possibilidades de novas estruturas com esse tipo de material.

Como há uma lacuna de referências relacionadas a uma metodologia de projeto utilizando as estratégias de dobra e corte para o design de novos produtos, explicitando por onde e como começar, quais seriam as técnicas de dobra e de corte existentes e como escolher a ideal para cada objetivo, como executar as experimentações e quais tecnologias podem ser utilizadas, essa pesquisa mostra-se relevante por apresentar um caminho que pode ser seguido por estudantes e profissionais de design.

1.1. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é investigar um processo de construção de estruturas *flat foldable* articuladas em BLaC baseados nos princípios do origami e do *kirigami*, validando estratégias para a sua aplicação e determinando suas possibilidades e seus limites.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Investigar as características específicas que atribuem a qualidade *flat foldable* aos modelos em papel dobrados e cortados;
- Investigar as técnicas de dobra e de corte básicas do origami e do *kirigami* e selecionar as mais adequadas para o desenvolvimento de estruturas *flat foldable*;
- Aplicar as técnicas selecionadas em modelos com BLaC como material, empregando e analisando as tecnologias que possibilitam essa transposição.

1.2. Estrutura do trabalho

Essa pesquisa apresenta-se dividida em sete capítulos. O primeiro consiste de uma introdução inicial, abordando a relevância e a justificativa desse estudo, e elencando a questão da pesquisa, a hipótese e os objetivos.

No segundo capítulo, consta uma revisão bibliográfica sobre bambu, origami e kirigami. No primeiro sub-capítulo trata das características gerais do bambu, analisando-o biológica e morfológicamente, assim como apresentando as diferentes técnicas de propagação, colheita e tratamento adequados. Posteriormente, trata especificamente do Bambu Laminado Colado (BLaC), seu processo de produção, suas características físicas e mecânicas, sua disponibilidade no mercado atual e suas aplicações no design de produtos.

O segundo sub-capítulo faz uma revisão da trajetória percorrida pelo origami e pelo *kirigami*, desde suas primeiras manifestações, apresentando todo o caminho trilhado que possibilitou o emprego de suas potencialidades nos ramos da matemática e da engenharia.

O terceiro sub-capítulo analisa especificamente os elementos essenciais e os princípios básicos presentes em todos os modelos de origami e *kirigami*, a fim de dissecá-los e entendê-los em sua essência. Também são apresentadas as técnicas básicas de dobra e de corte e as exigências para a preservação do *flat foldability*, pois o que se busca é a compreensão de sua lógica construtiva para uma posterior modificação, adequação e aplicação no design. Para efeitos de seleção e após uma análise dos tipos existentes de origami e *kirigami*, está organizada no final desse sub-capítulo uma classificação das técnicas de corte e de dobra ideais para o desenvolvimento de estruturas *flat foldable*.

A partir dessa classificação, no quarto sub-capítulo serão apresentados e analisados os projetos de produtos, industriais e arquitetônicos, que empregam técnicas de dobra e de corte em materiais diversos, como metal, plástico e tecido, dando uma especial atenção aos que são em madeira e bambu, a fim de descobrir as mais utilizadas e aquelas que ainda não foram pesquisadas.

Finalmente, o terceiro capítulo apresenta os métodos, os materiais selecionados, a produção das placas de BLaC para a pesquisa e os procedimentos da pesquisa.

Assim, o quarto capítulo descreve todos os resultados dos procedimentos experimentais adotados, os modelos selecionados, a elaboração da modelagem virtual dos

mesmos, a usinagem por meio da prototipagem rápida e na montagem dos modelos físicos. Também são apresentadas as análises de cada etapa percorrida e, ao final dos experimentos, a apresentação dos resultados que fornecem elementos definidores de quais técnicas de dobra e de corte baseadas no origami e no *kirigami* podem ser exploradas por meio dessa estratégia e dados sobre as possibilidades e os limites da aplicação dessas técnicas com o BLaC.

O último capítulo trata da conclusão da pesquisa, apresentando os principais resultados obtidos por meio de cada experimento, e os possíveis desdobramentos originados desta linha de investigação.

2. Estado da Arte

2.1. O Bambu

Nas últimas décadas, as florestas tropicais estão se esgotando e, além de ocorrer a possibilidade da falta de madeira e de outros produtos madeireiros, há também a possibilidade de ocorrer uma crise energética e aumento do efeito estufa, com mudanças climáticas catastróficas que podem alterar completamente as estações do ano, as temperaturas globais e, conseqüentemente, afetar a sobrevivência de todas as espécies.

Na busca por materiais renováveis e por soluções alternativas, o bambu se apresenta como um excelente material. Os produtos à base de bambu laminado colado (BLaC), assim como novas aplicações e pesquisas em torno do bambu utilizado *in natura*, podem evitar o corte de milhares de árvores, preservando as florestas. Isso porque o bambu se renova em um intervalo de tempo muito menor do que o das árvores, não havendo outra espécie que se iguale ao bambu em velocidade de crescimento e aproveitamento por área. Uma mesma touceira produz em média dez novos colmos por ano, permitindo uma colheita constante, gerando uma relevante produtividade de cerca de 10 t/ha/ano a 30 t/ha/ano, semelhante à do eucalipto e quase o dobro da do pinus. Segundo Murakami (2007 apud BARELLI; PEREIRA; LANDIM, 2008), o bambu pode suprimir pelo menos 20% das necessidades do uso da madeira, o que acarretaria na diminuição da necessidade de derrubar 11 mil hectares de florestas, além da potencial geração de 1,2 mil novos empregos.

O bambu atinge sua altura final ainda no primeiro ano, e ele pode ser utilizado para diversos fins dependendo de cada etapa de seu amadurecimento, como alimentação (brotos de bambu) e artesanato. A partir dos três anos de idade, o colmo está pronto para uso estrutural na arquitetura e engenharia assim como para a fabricação de laminados colados, para móveis e pisos. Para completar, o bambu é um eficiente sequestrador de carbono, contribuindo para o controle e diminuição do efeito estufa, podendo ser utilizado em reflorestamento e como regenerador/protetor ambiental.

Segundo Pope (1989 apud HIDALGO-LÓPEZ, 2003), existem evidências que o *Homo erectus* do Sudeste da Ásia já utilizava o bambu para fins de construção há um milhão de anos. E na China, onde o uso do bambu faz parte da tradição cultural, os primeiros indícios da existência de artigos de artesanato datam do período Neolítico, há 5 mil anos. A partir

dessa época, as aplicações do bambu na confecção de diversos produtos artesanais só cresceram e se consolidaram, principalmente por ser uma matéria-prima facilmente encontrada e trabalhada.

Segundo Yongyu (2001), a partir de 1970, a China intensificou a exploração do bambu em muitos artigos de artesanato, em tecnologia e projeto de produtos, fato que contribuiu para o aumento do valor desse material. Essa nova variedade de produtos busca atender todo tipo de mercado consumidor, da baixa renda à mais alta. Aplicações em Engenharia, Arquitetura, Paisagismo e Design possibilitaram novas perspectivas ao mercado mundial, principalmente em substituição à madeira, como alguns exemplos apresentados por Hidalgo-López (2003).

Estima-se que o valor atual do mercado mundial de bambu esteja na faixa de US\$ 11 a 12 bilhões, sendo que a China domina uma parte significativa das exportações mundiais de produtos de bambu. Em relação às importações, a Europa e os Estados Unidos são os maiores consumidores (mais de 80% do total das importações de bambu). Segundo Wooldridge (2012), o valor do mercado de bambu em 2012 no mundo foi estimado em US\$ 10 bilhões, e a *World Bamboo Organization* prevê que esse número possa dobrar em apenas cinco anos.

O bambu *in natura* possui excelentes propriedades estruturais para ser aplicado na Arquitetura e Construção. Devido à sua importância, é preciso elaborar novas metodologias construtivas para que as casas sejam eficientes, assim como o design de conexões seja mais adequado para o bambu e que sejam aprimorados os processos de tratamento e preservação do bambu utilizado em construções. Pode-se ver alguns exemplos de conexões em Hidalgo-López (2003) e Padovan (2010), assim como técnicas, possibilidades e modelos para a arquitetura tradicional e moderna (DEBOER, 1997; SALEME; COMOGLIO, 1998; PEREIRA; BERALDO, 2008; IBUKU, 2015).

Percebe-se através desses exemplos a efetiva aplicabilidade do bambu na construção de habitações de interesse social, que necessitam de baixo custo, e apresentam rapidez de construção e facilidade de manutenção. Baixo custo porque o material bambu é aproveitado da própria região, a custo praticamente nulo. Rapidez de construção pois o bambu é usado em sua forma natural, o suficiente para dar sustentabilidade, rigidez e estabilidade à construção. E facilidade de manutenção, pois há a possibilidade de troca de bambus por

outros novos de maneira fácil. Em países que tem abundância de bambu, esse tipo de construção contribui fortemente para diminuir o déficit habitacional assim como após catástrofes, para a construção de habitações temporárias.

Em relação ao bambu laminado colado - BLaC, estudos desenvolvidos por Beraldo e Abbade¹ (2003 apud PEREIRA;BERALDO, 2008) evidenciaram que suas características físicas e mecânicas são plenamente favoráveis à utilização na indústria moveleira e na confecção de utensílios domésticos. O BLaC apresenta qualidades visuais e estéticas muito eficientes para a aplicação em projetos de produto, como textura atrativa, alta resistência a riscos e umidade, e eficácia no isolamento acústico, sendo uma excelente alternativa para compor pisos e revestimentos.

Levando em consideração os fatores apontados nas questões anteriores, o bambu se apresenta como uma solução viável para o desenvolvimento sustentável, pois trata-se de um recurso renovável, de crescimento rápido, fácil de manejar, tratar e versátil de trabalhar. O bambu é extremamente relevante para o desenvolvimento sustentável das florestas, das áreas urbanas, das matas ciliares, da preservação e conservação das áreas próximas e ao longo de rodovias, assim como a prevenção de erosão e deslizamentos.

No entanto, para que todo o potencial do bambu seja aproveitado, existe também a necessidade de serem efetuadas muitas melhorias, principalmente em relação à cadeia produtiva do bambu, abrangendo desde a produção do produto até o consumidor final. É preciso ainda: normatizar a avaliação de suas propriedades físico-químicas; pesquisar formas de reprodução e de propagação de espécies de bambu; adequar maquinário para seu processamento adequado; capacitar mão-de-obra para plantar, cuidar, colher, transportar, processar; especializar designers, elaborando metodologias e uso de tecnologias adequadas para o desenvolvimento de produtos com bambu.

Em relação às políticas públicas para incentivar a cultura do bambu no Brasil, um importante passo foi dado a partir da publicação da Lei do Bambu (BRASIL, 2011). Essa lei institui a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB), buscando incentivar o manejo sustentável e o cultivo somente das espécies nativas e entre os agricultores familiares nas áreas de terras produtivas. De acordo com a Lei

¹ BERALDO, A. L.; ABBADE, L. R. Bambu Laminado Colado (BLC). *Floresta e Ambiente*. V. 10, n. 2. P. 36-46, 2003.

do Bambu, o governo incentivará: a produção de colmos, a extração de brotos, a obtenção de serviços ambientais, a valorização do bambu como promoção do desenvolvimento, como produto agro-silvo-cultural e beneficiamento, buscando incentivar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico em relação ao bambu.

Anteriormente a essa lei, a Rede Brasileira do Bambu - RBB (2013), criada em 2006, já buscava estabelecer um padrão que sistematizasse o desenvolvimento de pesquisas em nível nacional, unindo especialistas, empreendedores e instituições de pesquisa. Através das demandas apresentadas no Seminário Nacional de Bambu, realizado em Rio Branco/AC, em 2010, definiram-se algumas questões consideradas prioritárias que deveriam ser atendidas pela RBB, como:

- a dificuldade da produção de mudas em escala comercial para o plantio;
- a normatização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a construção civil com o uso do bambu;
- a introdução de disciplinas conexas à temática do bambu nos currículos acadêmicos;
- a necessidade urgente da capacitação de pessoal especializado, além do treinamento técnico de pessoas carentes visando sua profissionalização e valorização social.

A criação da Lei do Bambu torna possível o fortalecimento de ações de incentivo ao estabelecimento de parcerias entre centros laboratoriais nacionais, para a realização de pesquisas científicas e tecnológicas envolvendo o bambu, contribuindo para a geração e a difusão de informações e conhecimento sobre o bambu através de fóruns de discussões com especialistas. Atualmente, há um crescente interesse no Brasil pelo bambu e um reflexo desse cenário são as sociedades e grupos formados em diversos estados do país com o objetivo de estudar, divulgar e compartilhar informações. Todas essas ações visam ao estabelecimento da cultura do bambu no país, buscando o aproveitamento de todo o potencial desse material para o desenvolvimento econômico, social e ambiental. Espera-se que sejam unidos esforços governamentais, científicos, tecnológicos, sociais e culturais na direção do estabelecimento do bambu como cultura próspera para o país, objetivando atender tanto o mercado nacional como o internacional.

2.1.1. Características gerais do bambu

O bambu pertence à família *Graminae* e à subfamília *Bambusoideae*, algumas vezes tratado separadamente como pertencente à família *Bambusaceae*. Todavia, esta proposta não foi aceita por especialistas em estudos botânicos porque todos os bambus possuem perfeitamente todas as características da família *Graminae*, embora apresentem outras que os distinguem dos demais (FILGUEIRAS; SANTOS-GONÇALVES, 2011).

Existem aproximadamente 50 gêneros e 1.300 espécies de bambu, que ocorrem mais nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul. Praticamente, a maioria das espécies de bambu conhecida é originária de países orientais, com exceção de algumas, como a *Guadua angustifolia*, originária da América do Sul e muito utilizada na Colômbia e no Equador. No Brasil, o registro mais recente de ocorrência e catalogação de bambu apresenta uma lista com 34 gêneros e 232 espécies nativas (FILGUEIRAS; SANTOS-GONÇALVES, 2004).

O *International Network for Bamboo and Rattan* (INBAR) selecionou 19 espécies de bambu consideradas prioritárias por serem úteis na região em que ocorrem para utilização e exploração de seu potencial de maneira intensa. O valor dessas espécies foi medido de acordo com critérios como utilização, cultivo, processamento, produtos obtidos, recursos genéticos e características ligadas ao clima e à ecologia (PEREIRA; BERALDO, 2008). Para o uso como BLaC, é necessário que o colmo seja alto e reto, de diâmetro grande e parede espessa. Assim, as espécies prioritárias para esse fim e suas principais características estão relacionadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Espécies prioritárias para a produção de BLaC

(continua)

Espécie	Itens	Descrição
<i>Dendrocalamus asper</i>	Descrição	Bambu gigante entouceirante de grande porte
	Altura dos colmos	20-30 m
	Diâmetro dos colmos	8-20 cm
	Espessura da parede	11-20 mm
	Internós (espaço entre um nó e outro)	20-45 cm
	Clima	Região úmida a semi-árida; solos ricos

Quadro 1 - Espécies prioritárias para a produção de BLaC

(conclusão)

Espécie	Itens	Descrição
<i>Dendrocalamus asper</i>	Temperatura mínima	-5 °C
	Usos mais comuns	Construção pesada em meio rural; broto comestível; móveis; instrumentos musicais; artesanato; utensílios domésticos
	Uso potencial	Sistemas agroflorestais; laminado colado
<i>Gigantochloa apus</i>	Descrição	Espécie entouceirante, de médio porte
	Altura dos colmos	10-15 m
	Diâmetro dos colmos	6-10 cm
	Espessura da parede	Média
	Internós	36-45 cm
	Clima	Tropical úmido, solo rico
	Temperatura mínima	-2 °C
	Usos mais comuns	Material de construção; móveis; artesanato; cestaria
	Uso potencial	Sistemas agroflorestais; adaptação a áreas secas
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Descrição	Entouceirante de grande porte
	Altura dos colmos	24-40 m
	Diâmetro dos colmos	10-20 cm
	Espessura da parede	Parede espessa 1-3 cm
	Clima	Tropical úmido; solo rico
	Temperatura mínima	- 2 °C
	Usos mais comuns	Construções; laminado colado, fabricação de papel; alimento
<i>Guadua angustifolia</i>	Descrição	Bambu gigante entouceirante, elevado porte, elevadas propriedades mecânicas e grande durabilidade dos colmos
	Altura dos colmos	Até 30 m
	Diâmetro dos colmos	Até 20 cm
	Espessura da parede	1,5 – 2 cm
	Clima	Tropical, solo médio a rico
	Temperatura mínima	- 2 °C
	Usos mais comuns	Material de construção de baixo custo; múltiplos usos em meio rural
<i>Phyllostachys pubescens</i>	Descrição	Bambu alastrante (Moso), colmos fortes, vigorosos e retos
	Altura dos colmos	10-20 m
	Diâmetro dos colmos	7 a 15 cm
	Espessura da parede	Média
	Clima	Temperado, baixas temperaturas, solo rico
	Temperatura mínima	- 15 °C
	Usos mais comuns	Material de construção; alimento; implementos agrícolas; utensílios domésticos; ornamentação

Na Área Experimental Agrícola do campus da Universidade Estadual Paulista - UNESP - em Bauru, são cultivadas várias dessas espécies de bambu desde o verão de 1994-1995, como parte do Projeto Bambu, cujo objetivo é a produção de espécies para a realização de pesquisas nas áreas da Engenharia, Arquitetura e Design, além da aplicação de novas técnicas de manejo, cultivo, propagação e processamento de laminados, ripas e produtos (Figura 1). Além disso, a equipe multidisciplinar do Projeto de Extensão Taquara, com o envolvimento de alunos de design, engenharia, artes e relações públicas da universidade, encontra-se em atividade desde 2009 desenvolvendo, além dos estudos da cadeia produtiva do bambu, projetos sociais com a Associação de Agricultores Viverde do Assentamento Rural do Horto de Aimorés, buscando incentivar a cultura do bambu e contribuir para o desenvolvimento social e econômico dos assentados.

Figura 1 - Touceira de *Dendrocalamus asper*² da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Bauru

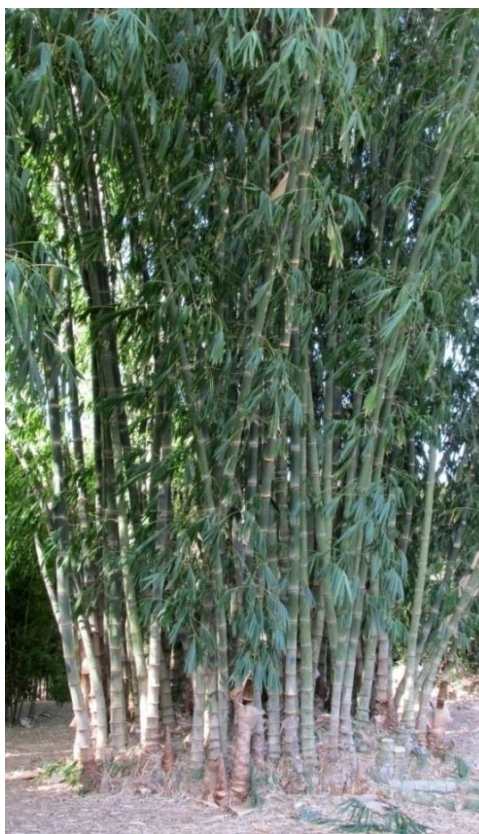


Foto: Thaís R. Ueno Yamada

² *Dendrocalamus asper* (Schultes F.) Backer ex Heyne. Fonte: INBAR Technical Report n. 1. *Priority species of bamboo and rattan*. 1994.

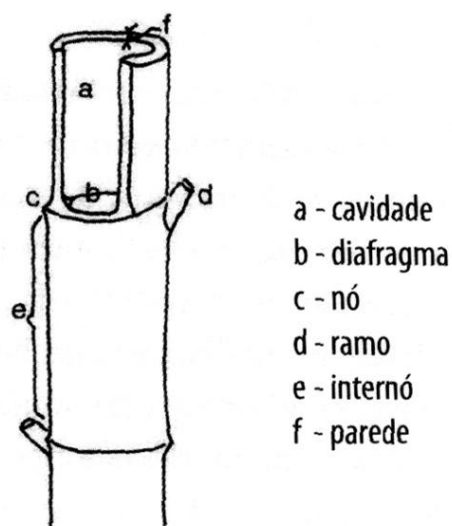
2.1.2. Características biológicas e morfológicas do bambu

O bambu é uma planta do tipo lenhosa e monocotiledônea, pertencente às Angiospermas (plantas que possuem sementes protegidas). Possui parte subterrânea e aérea, assim como as árvores, sendo que na parte subterrânea, encontram-se o rizoma e as raízes, e na parte aérea, estão o colmo, os ramos e as folhas. O colmo se apresenta normalmente sob um formato de tronco de cone longilíneo e oco.

Análises químicas do bambu e das espécies de árvores mais utilizadas para madeira, como o Pinus e o Eucalipto, mostram que a composição química é muito similar, pois todos possuem carboidratos, além de resinas, taninos, ceras e sais inorgânicos. No entanto, a solubilidade do bambu é mais elevada do que a da madeira (PEREIRA; BERALDO, 2008).

Existem alguns bambus maciços (gênero *Chusquea*, por exemplo), mas eles são exceção. O mais comum é o colmo do bambu ser oco, tendo uma sequência de entrenós ou internós ocos intercalados por diafragmas (septos), que externamente se apresentam como nós. Nesses nós saem ramos e folhas do bambu, e os diafragmas são os responsáveis por proporcionar maior rigidez e resistência ao colmo, permitindo que ele suporte tanto ventos fortes como seu próprio peso, sem quebrar. Em suma, o colmo apresenta as seguintes partes: cavidade, diafragma, nó, ramo, internó e parede (figura 2).

Figura 2 - Seção de um colmo com suas denominações



Fonte: Janssen³ (1998 apud PEREIRA; BERALDO, 2008)

³ JANSSEN, J. J. *Designing and building with bamboo*. INTERNATIONAL NETWORK OF BAMBOO AND RATAN - INBAR. Beijing, China. Technical report n. 20, 207, p. 2000.

Quando o colmo nasce, ele é protegido por folhas de formato triangular chamadas de brácteas (ou bainhas), que caem quando ele completa seu crescimento máximo (que pode variar entre 30 a 180 dias, dependendo da espécie). A partir daí, inicia-se o processo de amadurecimento do colmo, que dura cerca de três a quatro anos, quando ele apresenta uma estabilização de sua resistência mecânica.

Os colmos podem apresentar diferentes características de altura, diâmetro, espessura da parede e forma de crescimento, de acordo com a espécie. O interessante a observar é que o diâmetro do colmo é praticamente o mesmo desde quando ele nasce, apresentando uma diminuição em direção a ponta (um tronco de cone). Ao contrário da árvore, o bambu nunca aumenta seu diâmetro.

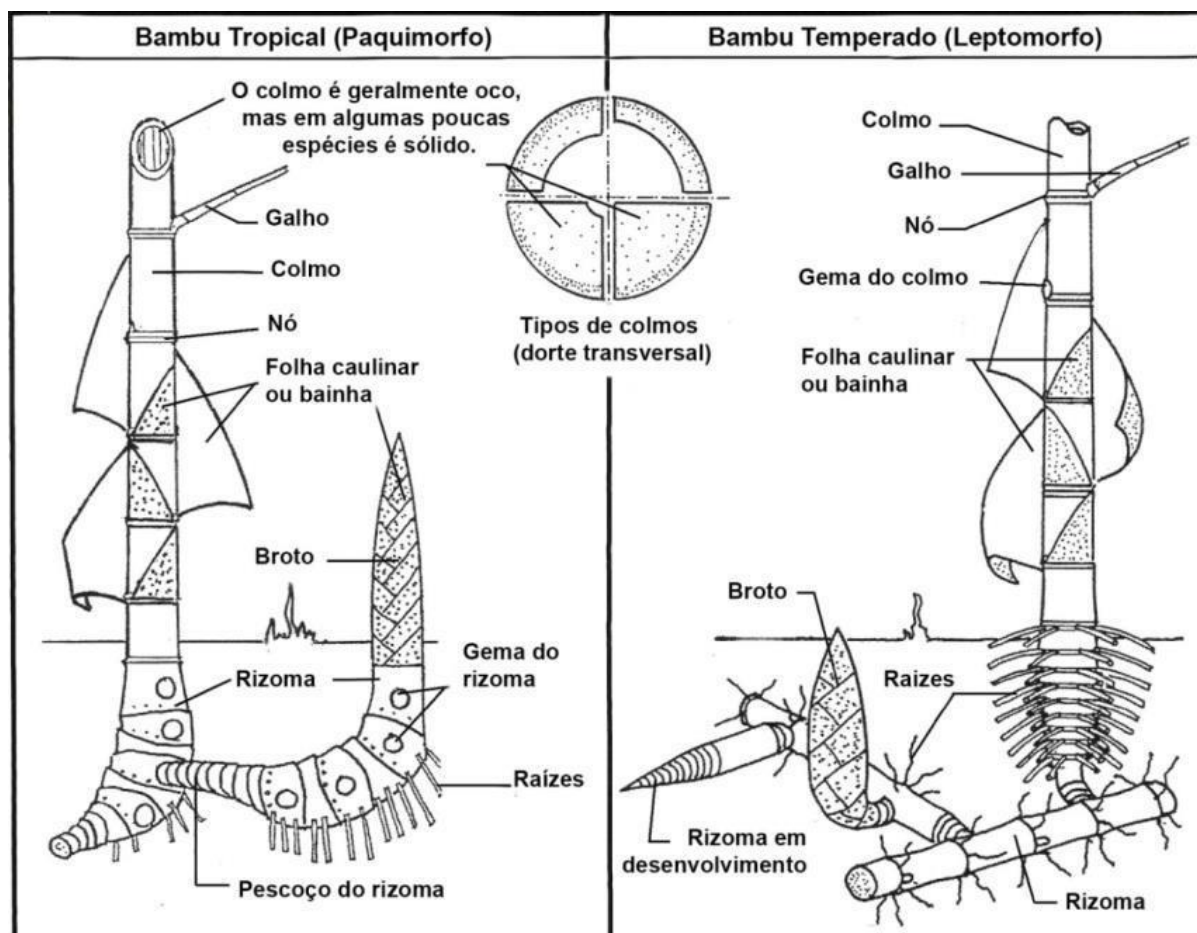
O rizoma armazena todos os nutrientes necessários do bambu e se ramifica para que novos colmos nasçam. Dependendo da maneira como eles se ramificam, os bambus podem ser classificados em dois grupos distintos: alastrante ou entouceirante (PEREIRA; BERALDO, 2008). No Quadro 2 e na figura 3 estão relacionadas as principais características e diferenças entre esses dois grupos.

Quadro 2 - Diferenças entre os grupos entouceirantes e alastrantes

<i>Grupo Entouceirante, paquimorfo ou simpodial</i>	<i>Grupo Alastrante, leptomorfo ou monopodial</i>
Colmos nascem e se desenvolvem agrupados uns aos outros	Colmos nascem e se desenvolvem separados uns dos outros
Rizomas curtos grossos e sólidos, com raízes na parte inferior	Rizomas longos, delgados e de formato cilíndrico
Rizomas de espessura ou diâmetro maior do que o colmo que o originou	Rizoma de espessura ou diâmetro menor do que os colmos que serão originados
O rizoma cresce horizontalmente a curtas distâncias e logo volta-se para cima formando um novo colmo	O rizoma cresce lateralmente, de 50 a 100 mil metros lineares por hectare.
Os colmos de agrupam, em forma de touceira, podendo conter cerca de 30 a 100 colmos	Como o rizoma cresce de 1 a 6 metros por ano, ele forma uma teia, que espalha os colmos, criando uma verdadeira floresta
Período de brotação no Brasil: a partir de janeiro	Período de brotação no Brasil: a partir de setembro
Gêneros / espécies <i>Bambusa bambos</i> <i>Bambusa textilis</i> <i>Dendrocalamus asper</i> <i>Gigantochloa apus</i> <i>Guadua angustifolia</i>	Gêneros / espécies <i>Cephalostachyum pergracile</i> <i>Arundinaria gigantea</i> <i>Arundinaria amabilis</i> <i>Phyllostachys pubescens</i>

Fonte: elaborada pela autora

Figura 3 - Representação gráfica da estrutura dos bambus dos tipos paquimorfo e leptomorfo



Fonte: Adaptado por Ramos (2014) de Hidalgo-López (2003)

2.1.3. Propagação, colheita e tratamento do bambu

O melhor método para a produção de mudas de bambu é por propagação vegetativa, utilizando-se das partes aéreas (colmos e ramos laterais) e subterrâneas (rizomas) do bambu, visto que a floração, e consequente produção de sementes para a reprodução do bambu, é um fenômeno ainda incompreensível, raro e de difícil previsão.

As espécies alastrantes só se reproduzem por meio de seus rizomas enquanto as espécies entouceirantes podem ser reproduzidas tanto por seus rizomas quanto por seus colmos e ramos laterais. Quando se produz uma muda por método vegetativo, obtém-se um bambu de igual característica genética, ou seja, produz-se um clone. Portanto, existe a vantagem da propagação de gêneros e espécies que mais se adequaram para determinado objetivo/solo/clima. A muda do bambu deve apresentar três estruturas básicas: parte aérea, raízes e rizomas. O enraizamento da muda é percebido pelo desenvolvimento da parte aérea,

e a presença dos rizomas é caracterizada pelo surgimento de brotações vigorosas que saem do solo. E para se fazer uma muda de bambu, existem vários métodos de propagação diferentes.

A colheita deve ser feita na estação seca, porque os colmos apresentam menor teor de umidade, tornando-se mais leves e facilitando o transporte. Além disso, nessa época, os colmos tem menor quantidade de seiva circulando, e menor teor de amido, sendo menos visados por fungos e insetos. No entanto, na estação seca, os colmos podem secar mais rapidamente, estando mais sujeitos a ocorrência de defeitos. Quanto ao corte dos colmos, ele pode ser feito com moto-serra, machado, serrote ou facão. O corte deve ser feito rente ao solo nas espécies alastrantes, e a uns 20 cm do solo ou logo acima de um nó, nas entouceirantes. Isso tudo para evitar que a água da chuva penetre na parte restante do colmos e apodreça os colmos restantes.

A retirada dos colmos maduros, defeituosos ou que estão secando, deve ser feita anual e criteriosamente, para que a touceira não fique congestionada, tornando o manejo difícil e para melhorar o seu desenvolvimento. Assim, o manejo correto de uma moita de bambu garante que elas estejam sempre limpas, arejadas, sadias e com boa produtividade. Normalmente, o primeiro manejo começa no quarto ano, retirando-se e limpando-se os colmos que nasceram no primeiro ano. No segundo ano, retira-se ou colhe-se os que nasceram no segundo ano, e assim sucessivamente. Quando a plantação de bambu está estabilizada, em cerca de cinco a sete anos, cada moita pode produzir em torno de dez novos colmos por ano.

O idade do colmo é um fator importante pois influencia as formas de sua utilização. Com algumas semanas de vida, o bambu pode ser utilizado como broto comestível ou para fazer alguma deformação artificial de sua forma. Com 6 meses a um ano, ele pode ser utilizado para o artesanato (cestaria). Com dois anos, pode-se fazer ripas ou esterilhas. A partir de três anos, o colmo está pronto para uso estrutural e para a elaboração de laminados.

Uma moita é considerada madura quando tem idade superior a três anos, pois seus primeiros colmos (do seu primeiro ano) não possuem mais brácteas, e apresentam manchas de fungos, líquens e musgos nos internós, indicando que o colmo está maduro e pronto para uso. Os bambus jovens (com um ou dois anos) apresentam características mecânicas diferentes dos maduros (três anos ou mais) e devem permanecer na moita até atingirem a maturidade. Uma maneira de ter o controle das idades dos colmos é marcá-los com uma letra sequencial por ano (figura 4), ou identificando o ano de seu nascimento.

Figura 4 - Colmos jovens (letra O) e colmo mais maduro (letra K), apresentando manchas de fungos e líquens



Foto: Thaís R. Ueno Yamada

Para a utilização dos colmos de bambu, é necessário fazer-se um tratamento preventivo, pois ele é um material biológico com grandes quantidades de amido nutritivo dentro de suas células parenquimáticas, sendo altamente suscetível a ataques de insetos e fungos. Sem tratamentos preservativos, ele pode ter uma vida útil de um a três anos, mas se tratado adequadamente, sua vida útil pode alcançar de dez a quinze anos, ou mais (PEREIRA; BERALDO, 2008).

Para tratar os colmos, existem os métodos tradicionais e químicos⁴. Embora os métodos tradicionais tenham um custo relativamente baixo, não são suficientemente eficientes. Já os métodos químicos, quando bem conduzidos, protegem os colmos contra os ataques dos insetos xilófagos e aumentam sua durabilidade, mas deve-se tomar o devido cuidado para que o excesso dos produtos usados sejam recuperados para que não degradem o meio ambiente.

Dentre os métodos químicos, a imersão dos colmos recém-cortados ou daqueles que tenham sido secos ao ar, é um dos mais comuns. A duração do tratamento pode variar, entre outros fatores, em relação à espécie do bambu, das suas dimensões ou da concentração da solução. Para esse tipo de tratamento, as soluções mais comumente utilizadas são o Borato de Cobre Cromatado (CCB) ou aquela que combina o ácido bórico com o bórax (sal à base de boro). A solução de ácido bórico e bórax tem a aparência de um

⁴ Os tradicionais subdividem-se em: cura ou maturação na mata; cura por imersão em água; cura pela ação do fogo; e cura pela ação da fumaça. Os métodos químicos subdividem-se em: oleosos; oleossolúveis; hidrossolúveis; imersão em solução de sais hidrossolúveis e substituição de seiva por sais hidrossolúveis (AZZINI; BERALDO, 2001 apud PEREIRA; BERALDO, 2008).

pó branco, sem odor, de baixa toxicidade, não sendo inflamável ou explosiva. É atóxica ao meio-ambiente e tem ação penetrante no bambu (ou madeira) mais rápida e eficiente que somente o ácido bórico (ENVIRONMENTAL BAMBOO FOUNDATION, 2005). Pode-se aplicar esse método em colmos secos ou verdes, com imersão na solução, no primeiro caso, ou por substituição da seiva, no segundo. Após o tratamento, as peças devem ser armazenadas em local protegido para secarem a ocorrer a difusão do produto pelas células do bambu.

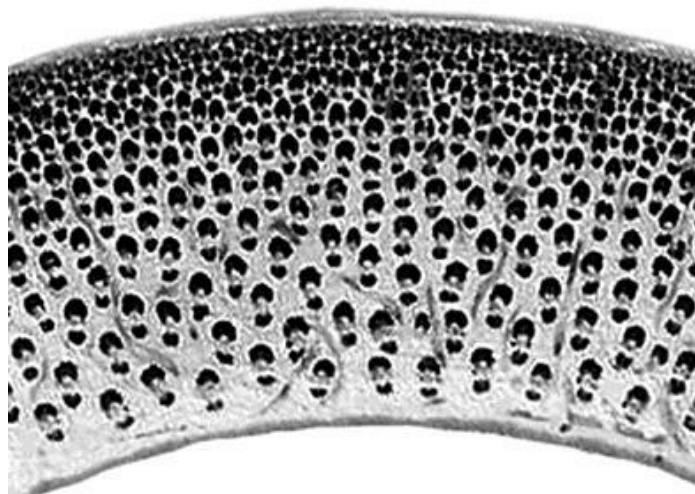
2.1.4. Bambu Laminado Colado (BLaC) e seu processo de produção em laboratório

No geral, os painéis de bambu são obtidos por meio da composição de lascas finas ou de ripas, aglomerados de partículas de bambu ou mesmo painéis compostos com outros materiais, como pó de coco, utilizando adesivos. Quando se obtém um painel especificamente por ripas ou tiras de bambu, tem-se o Bambu Laminado Colado, um material cuja aplicação se mostra mais promissora, por ser um substituto da madeira e pela possibilidade de aumentar o valor do produto, melhorando a aceitação do mercado consumidor.

Pereira e Beraldo (2008) recomendaram que, antes de iniciar o processo de produção do BLaC, sejam considerados: a idade do colmo; a altura útil do colmo; a posição da ripa em relação à parede do colmo; e as dimensões das ripas laminadas. Em relação à idade, pode-se usar o colmo entre dois e quatro anos de idade, quando ele é considerado maduro e apresenta maior resistência mecânica do que os colmos jovens. A altura do colmo deve ser definida em relação à espessura mínima da parede que se pretende usar para o processamento das ripas, em torno de 8 a 10 mm. Também deve-se levar em consideração que o formato do colmo é similar a um tronco de cone delgado, ou seja, de diâmetro maior na base e menor no topo, fazendo com que a espessura da parede sofra alterações ao longo da sua altura.

Sabe-se também que o tecido do colmo possui células parenquimáticas (50%), feixes vasculares (10%) e feixes de fibras (40%), sendo que os feixes vasculares são menores e mais numerosos na periferia do colmo e maiores e em menor quantidade na sua parte interna (figura 5). Essa característica confere maior resistência mecânica da região mais próxima da casca em comparação com a parte interna, devendo-se utilizar essa região mais externa da parede do colmo na produção do BLaC.

Figura 5 - Heterogeneidade da distribuição dos elementos anatômicos do bambu ao longo da espessura da parede



Fonte: Ramos (2014)

Após o corte e a colheita dos colmos selecionados em campo, é efetuado o corte dos mesmos para o transporte até o local do processamento e o desdobro dos colmos em serra circular cortando-os transversalmente, adequando o comprimento necessário das ripas em relação ao tamanho do tanque de tratamento por imersão.

Efetua-se então o desdobro em serra circular dupla, perfazendo um corte longitudinal no colmo, para o corte das ripas na largura definida através da distância entre as lâminas, que permite deixá-las com duas faces paralelas. Para a determinação das dimensões da ripas, a espessura entre 5 a 6 mm maximiza o aproveitamento da altura do colmo e a largura de 20 mm minimiza as perdas pela curvatura natural do material (PEREIRA; BERALDO, 2008). Em seguida, as ripas são imersas em tanque com uma solução química para tratamento preventivo contra insetos xilófagos. Após o tratamento de proteção, é necessário armazená-las e secá-las ao ar até alcançar a umidade de equilíbrio com o ambiente. Quando as ripas estiverem secas, faz-se o beneficiamento inicial em plaina para remover as protuberâncias restantes provocadas pelos nós, tomando-se o devido cuidado de retirar o mínimo possível da parte externa, mais fibrosa. Na figura 6, estão representadas essas etapas em sequência.

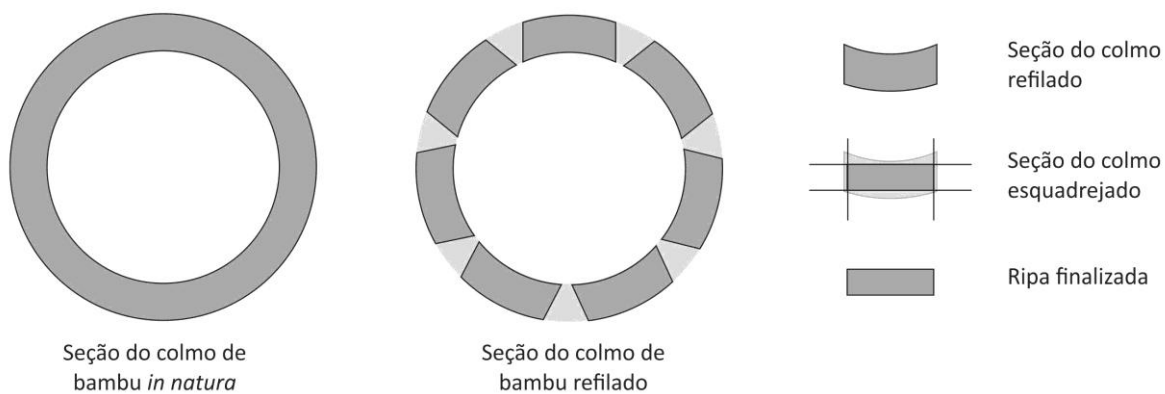
Figura 6 - Da esquerda para a direita: corte, imersão, secagem e beneficiamento inicial



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara, 2014

A seguir, realiza-se o beneficiamento final das ripas em plaina quatro faces para que elas alcancem a espessura e a largura desejadas. Nesta etapa, as ripas, inicialmente curvas, sofrem desgaste na casca, no miolo e nas laterais, chegando ao formato de prismas retangulares, necessário para a formação dos painéis de BLaC (figura 7). É nessa fase que se determinam as dimensões finais das lâminas. Quando todas as ripas estiverem prontas, faz-se a colagem das peças com adesivos adequados e efetua-se a prensagem (figura 8).

Figura 7 - Etapas do processamento das ripas de bambu



Fonte: Elaborada pela autora

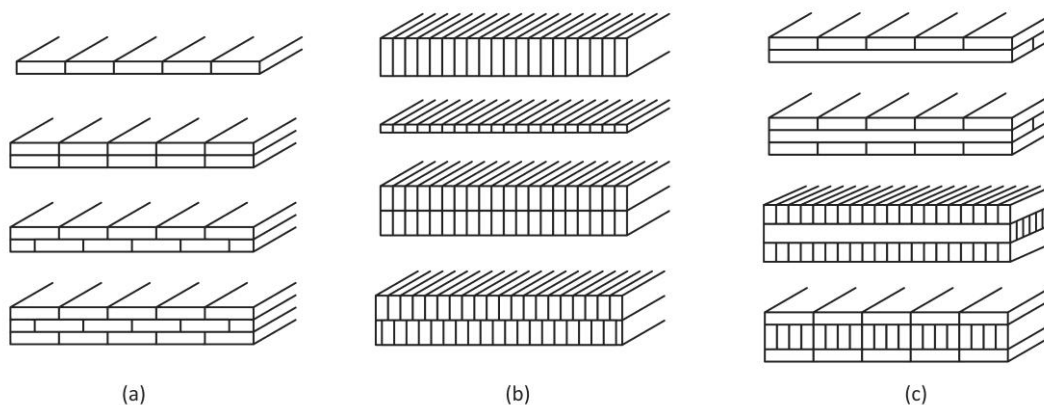
Figura 8 - Colagem e prensagem das ripas



Fotos: Thaís R. Ueno Yamada, 2014

Dependendo da maneira como as ripas são coladas umas às outras, os painéis de BLaC terão uma característica estrutural específica, que determinará o tipo de produto final. Pode-se colar lateralmente as ripas, tanto na vertical quanto na horizontal, alinhando-as ou não entre si, ou ainda compondo-as em direções alternadas (figura 9).

Figura 9 - Da esquerda para a direita: (a) painéis de ripas coladas na horizontal; (b) na vertical e (c) em direções alternadas



Fonte: Elaborada pela autora

Finalmente, quando as placas estiverem coladas, pode-se dar o acabamento com lixadeira, impermeabilizá-las com bases seladoras, e ainda finalizá-las com vernizes ou ceras. A qualidade e o tamanho das placas de BLaC dependerão de fatores como maquinário adequado, pessoal técnico especializado e tipo de acabamento empregado. Para aumentar as possibilidades de uso, os painéis de BLaC apresentam cores e tonalidades variadas, que dependem das espécies utilizadas e do processamento final de fabricação. Assim, encontram-se painéis em cores naturais, descoloridas ou tratadas termicamente (figura 10).

Figura 10 - De cima para baixo: cor natural, descolorida e tratada termicamente



Foto: Ricardo Kenji Yamada, 2015

As cores naturais das placas de bambu podem ser as obtidas pelo próprio processamento do material, havendo ainda as nomeadas como "naturais", que imitam a original, mas se apresentam em tons "louros", claros, ou em tons acaramelados.

Para a obtenção de peças descoloridas, as ripas de bambu são imersas em soluções químicas a altas temperaturas, que irão remover a lignina, causando uma perda da cor natural em porcentagens que dependem do tempo e da concentração dessas soluções. Entretanto, deve-se tomar o devido cuidado nesse processo para não causar perdas demasiadas de coloração, de resinas e de substâncias oleosas que possam estragar ou danificar sua aparência. Normalmente, as soluções químicas utilizadas são o Dióxido de Cloro, Hipoclorito de Sódio e Peróxido de Hidrogênio, porém, os dois primeiros formam compostos organoclorados que se constituem em um dos mais sérios problemas ambientais do setor da celulose e do papel. Já o Peróxido de Hidrogênio, conhecido como água oxigenada, é uma excelente opção de solução química de ação branqueadora equivalente às anteriores, e que contribui para o controle ambiental, pois não forma organoclorados (MOIZÉS, 2007).

Na carbonização de BLaC, as peças são aquecidas em forno ou caldeira, que provoca o escurecimento do amido presente nas células parenquimáticas do bambu, surgindo tons de âmbar, marrom ou preto. Com esse processo, os painéis tornam-se mais impermeáveis, tendo, conseqüentemente, maior durabilidade. Colla (2010) observou mudanças em ripas de *Dendrocalamus giganteus* tratadas termicamente com temperaturas entre 140°C e 260°C, surgindo diferentes tonalidades semelhantes à Imbuia e à Sucupira (figura 11).

Figura 11 - Ripas de bambu termorretificado (BTR), organizados de acordo com a temperatura de tratamento térmico (de cima para baixo): 300°C, 260°C, 220°C, 180°C, 140°C e controle (seco ao ar)



Fonte: Colla (2010)

Na China, Murakami (2007 apud BARELLI; PEREIRA; LANDIM, 2008) relatou a existência de uma centena de fábricas que produzem e exportam cerca de 10 milhões de m² por ano de pisos de BLaC para os EUA, Europa, Japão, entre outros. No Brasil, também é possível encontrar importadoras de painéis da China que oferecem aos designers e arquitetos várias opções de tamanhos, espessuras, texturas e cores de BLaC com excelente acabamento. A Ecori (2015) oferece cerca de 15 opções de texturas e cores em painéis de bambu, incluindo tons naturais, carbonizados e clareados. As espessuras também variam entre 3,175 mm a 38 mm, obtidas com prensagens na vertical, na horizontal ou combinadas. Os tamanhos das placas são variados, mas os mais comuns são 1830 mm x 1220 mm e 2440 mm x 1220 mm. A Neobambu (2016) oferece opções de placas coloridas, chapas para portas, divisórias ou para o desenvolvimento de mobiliário, e até folhas laminadas de bambu para revestimento, com 0,5 mm de espessura. Outras empresas brasileiras que também fornecem lâminas de bambu são a Madeireira Rume e a Ecofolhas.

2.1.5. Características físicas e mecânicas do BLaC

Embora não seja o escopo desta pesquisa, é importante apresentar os dados até então obtidos em relação às características físicas e mecânicas do BLaC. Uma das maiores dificuldades neste estudo é a falta de normatização própria. Em relação ao bambu em sua forma natural, existem algumas normas recomendadas para utilização, mas, para o BLaC, tem-se adaptado normas existentes para madeira ou de chapas de madeira.

Conforme Pereira e Beraldo (2008), no entanto, a maior dificuldade está mais na padronização das ripas que formarão os corpos de prova do que a sua confecção. Isso porque vários fatores podem afetar os resultados da resistência mecânica a ser obtida, como idade do colmo, posição da ripa ao longo e através da parede do colmo, quantidade de nós, espessura das ripas, e conseqüente número de ripas utilizadas, tipo de adesivo e gramatura de sua aplicação (g/m²), entre outros. Assim, os resultados obtidos por diferentes pesquisadores podem divergir.

Pereira (2006) realizou um estudo detalhado com o BLaC produzido com a espécie *Dendrocalamus giganteus* de 3,5 anos e o material apresentou massa específica de 0,79 g/cm³, resistência à compressão paralela de 65,5 MPa, módulo de elasticidade de 13,6 GPa e módulo de ruptura de 99 MPa. Os resultados foram muito similares à madeira laminada

colada (MIOTTO e DIAS, 2009), cujos valores médios de resistência à tração ficam em 144 MPa e o módulo de elasticidade da ordem de 21 GPa.

Por sua vez, Nordim et al. (2005 apud PEREIRA; BERALDO, 2008) obtiveram valores mais elevados de resistência à compressão com colmos de 2 e 4 anos (200 MPa e 180 MPa, respectivamente) mas um valor inferior de módulo de ruptura (valor médio 78 MPa). Já Beraldo e Abbade (2003 apud PEREIRA; BERALDO, 2008) encontram valores inferiores de resistência à compressão paralela (30 a 40 MPa), módulo de elasticidade da ordem de 11 GPa, e o módulo de ruptura do BLaC situou-se entre 50 a 65 MPa.

Nogueira (2008) realizou testes de ensaio de resistência física e mecânica em BLaC e obteve valores no ensaio de compressão que indicam que a resistência do BLaC se mostrou superior a de algumas madeiras de reflorestamento, tais como Eucalipto e Pinus, e da madeira nativa Peroba Rosa. Em relação ao módulo de ruptura e de elasticidade, os valores obtidos com o BLaC mostraram-se superiores ao Pinus e inferiores ao Eucalipto e a madeiras nativas, mas semelhante ao da Peroba (em elasticidade).

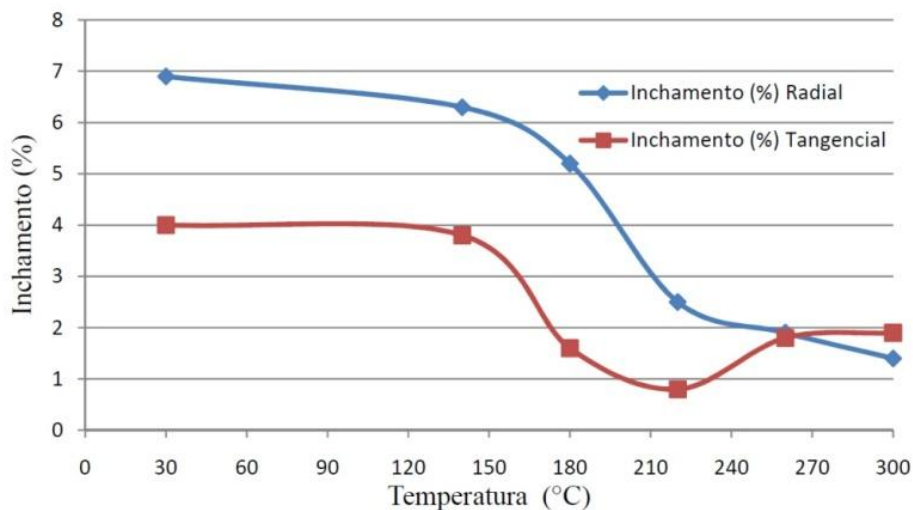
De modo geral, embora os valores apresentem divergências, o BLaC apresenta propriedades semelhantes à madeira leve, que não pode ser utilizada estruturalmente, e aos laminados de madeira. Dessa forma, sua aplicação se estenderia aos mesmos produtos propostos para estes materiais.

No entanto, devido à natureza higroscópica do BLaC, ele é extremamente sensível à ação da umidade, que influencia em sua estabilidade dimensional. Em um estudo de Beraldo e Abbade (2003 apud PEREIRA; BERALDO, 2008) de variações dimensionais de acordo com a direção anatômica considerada, a variação na direção axial foi praticamente desprezível (como ocorre também com a madeira e o bambu *in natura*), mas na direção radial, a variação foi superior àquela obtida na direção tangencial.

Nogueira (2008) também observou que o inchamento é o ponto mais crítico em BLaC, pois ele é composto pelo aumento dimensional das lâminas e dos afastamentos entre camadas do painel, que são dependentes da qualidade do adesivo e do seu comportamento em presença da água. Para minimizar estas variações, Colla (2010) obteve importantes dados sobre os efeitos de termorretificação (tratamento térmico) no inchamento do bambu, ou seja, na influência da umidade do ambiente em sua estabilidade dimensional. Na busca pela

identificação da temperatura ideal para o tratamento da espécie *Dendrocalamus giganteus* visando à aplicação em móveis, observou, a 220 °C, uma tendência na estabilização do inchamento na direção radial e tangencial, indicando que o Bambu Termorretrificado (BTR) apresentou maior estabilidade dimensional do que o bambu-referência (Figura 12).

Figura 12 - Inchamento do BTR de acordo com a direção anatômica



Fonte: Colla (2010)

Ocorreram algumas perdas na densidade (12%), no módulo de elasticidade (5%) e no módulo de ruptura (28%), mas obteve-se desempenho mecânico superior ao das madeiras tradicionais. Assim, o tratamento térmico do bambu se apresenta como uma excelente alternativa aos métodos convencionais por apresentar melhorias no desempenho do material, menor impacto ambiental e maior segurança para o homem e o meio ambiente, com durabilidade semelhante do produto final.

Em termos de qualidade de fixação de parafusos em placas de BLaC, um estudo de Kravchenko, Ferreira e Pasqualetto (2015), que analisaram a eficiência de diferentes adesivos em painéis de bambu, chegou ao valor de 619 kgf no teste de arrancamento de parafuso em viga de BLaC com adesivo Masterquil, enquanto outros adesivos situaram-se entre 68 e 192 kgf. Em estudos com MDF de eucalipto foram obtidos valores de arracamento de parafuso de 123 kgf (na face) e de 136 kgf (no topo).

2.1.6. O BLaC no design de produtos

Van der Lugt et al.⁵ (2008 apud FERREIRA, L. M. C., 2014) aponta que o BLaC possui qualidades ideais para aplicação em móveis, pois permite produzir peças de várias dimensões, apresentando "qualidade homogênea, boas propriedades táteis, facilidade para criar peças curvas, e a possibilidade de novas aplicações aproveitando as camadas do material".

Conforme apresentado anteriormente, as características físicas e mecânicas do BLaC favorecem o seu uso na fabricação de mobiliário e de utensílios domésticos. Por suas características estruturais e visuais, os painéis em BLaC se apresentam como versáteis, resistentes e aplicáveis no design de produtos (figura 13) e em projetos de interiores, podendo ser utilizado na confecção de uma gama muito ampla de objetos, como pisos, móveis, assoalhos, painéis, componentes para a construção civil e moveleira, substituindo com sucesso a madeira.

Figura 13 - Móveis em BLaC de Rick Lee



Fonte: Ecori (2015)

No Brasil, pesquisas relacionadas à produção de BLaC e de produtos com esse tipo de material estão sendo conduzidas por empresas, universidades e associações voltadas ao estudo do bambu. Nas instalações do Laboratório de Experimentação com Bambu da UNESP - Bauru, foram desenvolvidos produtos em BLaC como protótipos de produtos ortopédicos, bancos, cadeiras, mesas, entre outros, como podem ser vistos na figura 14 (PEREIRA; BERARDO, 2008).

⁵ VAN DER LUGT, P.; VOGTLÄNDER, J.; BREZET, H. **Bamboo, a Sustainable Solution for Western Europe**: Design Cases LCAs and Land-use. [S.I.]: Centre for Indian Bamboo Resource and Technology, 2008.

Figura 14 - Algumas das peças produzidas no Laboratório de Experimentação com Bambu



Fonte: TAQUARA, 2013. Disponível em : <<http://taquaraunesp.br.blogspot.com.br>>. Acesso em: 20 jan 2015

Dependendo da espessura, o BLaC pode ser usado na fabricação de produtos tanto com superfícies planas quanto curvas, através da utilização de moldes de material apropriado. Um exemplo é a *Bamboo Chair*, de Remy e Veenhuizen (2007), onde finas tiras de bambu curvam-se pela ação do vapor dando forma a uma cadeira (figura 15).

Figura 15 - Cadeira em lâminas de bambu de Remy & Veenhuizen

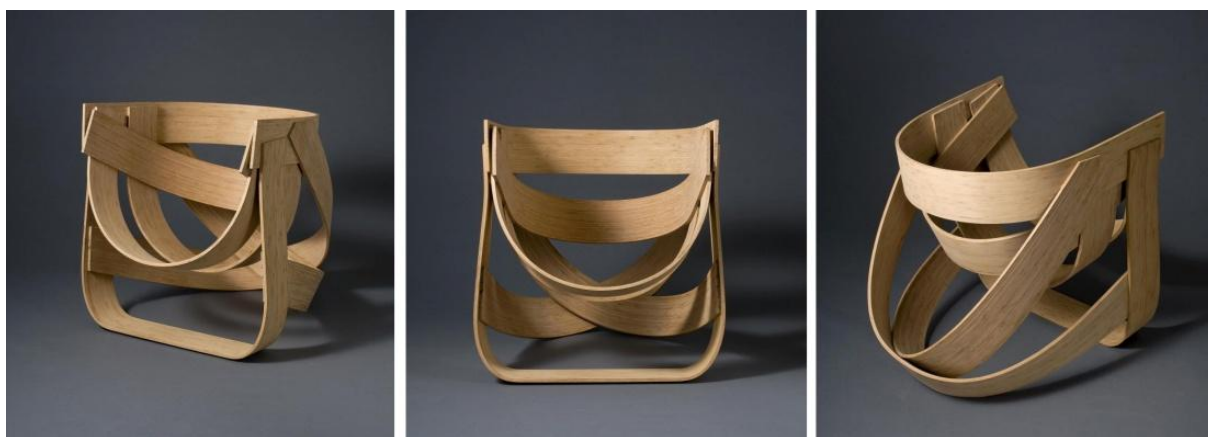


Foto: Thomas Fasting. Fonte: Remy e Veenhuizen (2007)

A empresa TAKE *Create Hagi Corporation* (2010), situada na cidade de Hagi, Japão, resolveu aproveitar a terceira maior área de floresta de bambu do país situada na região (Distrito de Yamaguchi) e seu potencial como matéria-prima de qualidade em laminado colado para desenvolver economicamente a região através da produção e comercialização de móveis feitos em bambu laminado curvado. Para isso, estabeleceu-se, em 2002, uma associação entre Câmara Municipal de Hagi, a Universidade de Yamaguchi e o Instituto de Tecnologia Industrial do Distrito de Yamaguchi para iniciar o projeto. Contando com a colaboração de designers finlandeses, a TAKE apresentou seus móveis em BLaC no Fórum de

Design da Finlândia, na capital Helsinki, em 2005, e no Salão de Milão, em 2006, iniciando a produção em massa dois anos depois.

O conjunto de mesa e cadeira denominado *Obi Dining*, do designer Mikko Paakkanen, foi inspirado em um adorno que faz parte da vestimenta tradicional japonesa, o *obi*⁶. Assim, o bambu laminado se curva nas costas da cadeira e abaixo do tampo da mesa, criando espaços que podem servir como compartimentos para objetos variados. A linha SEE, do mesmo designer, apresenta ao mesmo tempo um visual incomum e racional. A unidade modular, chamada SEE Shelf, possibilita diferentes composições através de sua geometria. A base de mesa da mesma linha aproveita-se das curvas e da transparência do vidro para chamar a atenção. A geometria das peças que compõem essa linha também foi especialmente desenhada para facilitar o transporte, otimizando espaços (figura 16).

Figura 16 - Linha *Obi Dining* e linha SEE da TAKE de Miko Paakkanen



Fonte: Take Create Hagi Corporation (2010)

O designer Mikko Paakkanen desenvolveu a linha ORIGAMI em homenagem à essa tradicional técnica japonesa de dobrar papel. As curvas atribuídas ao laminado de bambu atribuem leveza e resistência a essas mesas, além da qualidade estética do seu visual equilibrado (figura 17).

⁶ *Obi* é uma faixa amarrada à cintura que mantém o *kimono* fechado. Ele faz parte tanto da vestimenta masculina quanto feminina, variando de largura, comprimento, cores e texturas. O *obi* dos homens tem uma trama mais larga e firme, em cores mais discretas, e sua amarração nas costas é feita com apenas um nó e amarrados abaixo da linha da barriga. Já o das mulheres é colocado ao redor do tronco e amarrado nas costas com grandes laços. As cores e os desenhos variam de acordo com a ocasião.

Figura 17 - Mesa de centro e de canto da linha Origami da TAKE de Miko Paakkanen



Fonte: Take Create Hagi Corporation (2010)

Percebe-se, através desses exemplos, que estudos em design de produtos à base de bambu laminado colado - BLaC, juntamente com ações de marketing, podem colaborar para que seu uso possa ser intensificado, especialmente se for feita uma ação em conjunto com autoridades locais, associações, universidades e centros de pesquisa, para colaborar com o desenvolvimento econômico e social local, por meio do cultivo e utilização do bambu na fabricação de produtos de alta qualidade. Dessa forma, o design pode atribuir ao bambu um alto valor funcional, prático, estético e simbólico, tornando-o realmente a "madeira do século XXI".

2.2. Origami e Kirigami

Origami é a tradicional técnica oriental de obter figuras através de dobras sequenciais em papel, e é também conhecido como dobradura, no Brasil, e em outros países como *paperfolding* (em inglês) e *papiroflexia* (em espanhol). A palavra origami é de origem japonesa e foi definida em 1880 advindo da fusão do verbo “*oru*” (que significa “dobrar”) e “*kami*” (que significa “papel”). Anteriormente, ele era chamado de *origata* (forma dobrada), *orisue*, *tatami-gami*, entre outras denominações e possuía cortes além das dobras características dessa técnica (KODANSHA, 1983).

O *kirigami* também é uma técnica oriental que usa o papel como matéria-prima, mas nesse caso, corta-se o material a fim de dar-lhe uma forma, resultando em uma folha plana com partes vazadas. Vem da fusão da palavra “*kiru*” (cortar) e “*kami*” (papel). Pode-se encontrar outras nomenclaturas para essa arte, tais como *cutting paper*, nos países de língua inglesa, e *schneiden*, em alemão.

Essas duas técnicas se desenvolveram e tiveram várias fases ao longo do tempo, que evidenciam sua versatilidade em atravessar continentes, séculos, religiões e culturas, até se transformar em objeto de estudo científico. Suas características geométricas chamaram a atenção de pesquisadores, que organizaram uma série de teoremas e axiomas definidores da matemática do origami e do *kirigami*. Posteriormente, barreiras e preconceitos foram quebrados ao descobrir o potencial de aplicações dos princípios construtivos dessas duas técnicas em produtos industriais.

Os estudos desenvolvidos por Nojima Taketoshi, em áreas que abrangem da robótica à educação, inspiraram outros pesquisadores e essa variedade de aplicações foi nomeada por Ian Stewart (2007) de “*origamics*”, termo criado para demonstrar a natureza interdisciplinar do uso dos princípios e conceitos do origami e do *kirigami* em estudos de áreas diversas, como design, arquitetura, engenharia e biologia.

Assim, essas técnicas tradicionais surgem como fatores de inovação tecnológica, permitindo a transformação de materiais planos (papel, placas de madeira, plástico, metal) em produtos tridimensionais versáteis e transformáveis.

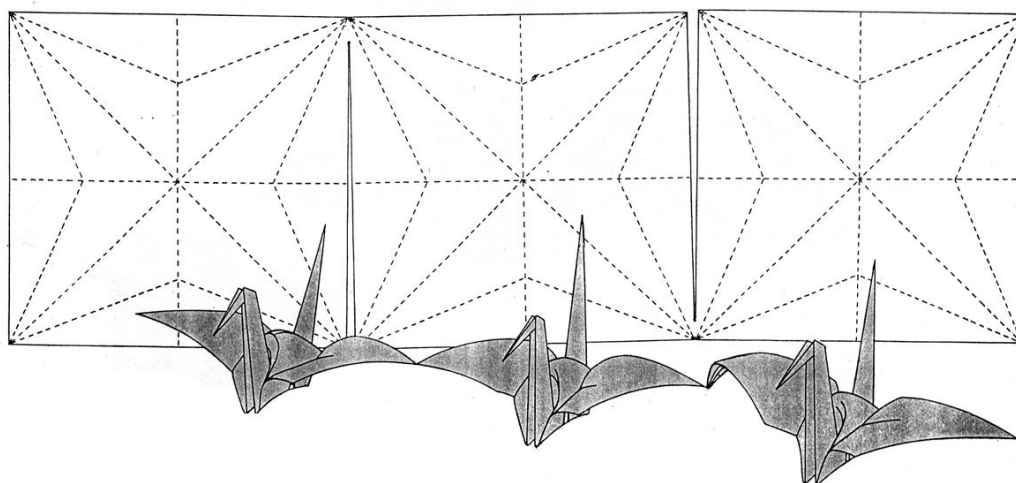
2.2.1. Origem e trajetória

O origami é tradicionalmente conhecido como uma arte japonesa, mas acredita-se que ele tenha surgido na China, juntamente com a invenção do papel, em 105 d.C. (UENO, 2003). O conhecimento de sua manufatura foi levado para o Japão no começo do século VI, por monges budistas, onde o origami se difundiu e se incorporou em sua cultura. No início, como o papel era considerado um artigo de alto valor e difícil de ser adquirido, o origami era empregado cuidadosamente apenas em ocasiões cerimoniais e religiosas, e as técnicas eram ensinadas apenas por especialistas (HONDA, 1969).

Em tempos remotos japoneses, na época dos samurais, os certificados de autenticidade que acompanhavam objetos de valor como as espadas, eram feitos em papel branco de excelente qualidade dobrado ao meio no sentido horizontal e eram chamados de *origami-tsuki*, e significavam algo como “atestado de garantia” ou “certificado” (KODA, 1986).

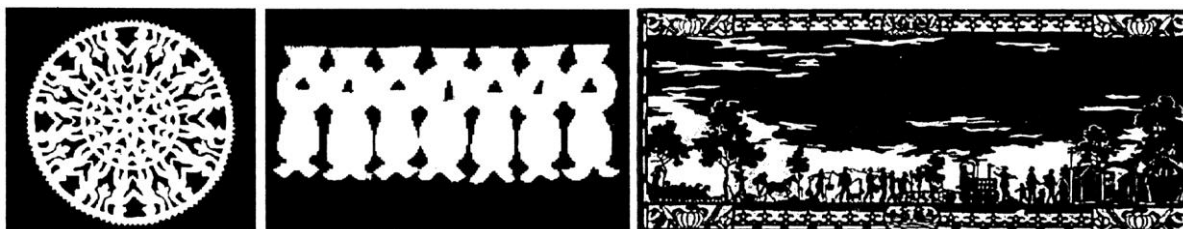
Há alguns registros, em forma de obras e poemas antigos, com datas a partir do século XII, que fazem referências a modelos de origami tradicionais, mas não apresentam diagramas instruindo sobre a sequência das etapas para sua confecção. Dentre as publicações mais antigas e clássicas com instruções de origami encontram-se *Sembazuru Origata*, de Rokoan Gido, publicado em 1797 (figura 18), e *Kan-no-Mado*, de Katsuyuki Adachi, publicado em meados do século XIX.

Figura 18 - *Sembazuru Origata*



Em relação ao *kirigami*, sua origem também é atribuída à China, provavelmente conectada com a invenção do papel, assim como o origami, e tem três denominações que correspondem a estilos diferentes: *senshi*, *sanshi* e *kokushi* (SHINZATO, 1998). O *kirigami senshi* é o tipo mais popular, e se utiliza apenas da tesoura para o corte, sendo que a forma final deriva do corte de uma alegoria ou figura dobrada sequencialmente. No *kirigami sanshi*, o papel é recortado manualmente e é executado especialmente por crianças como passatempo ou como uma prévia do *kirigami senshi*. Já no *kirigami kokushi*, as formas das figuras são mais complexas e mais definidas, pois são utilizadas lâminas afiadas de estiletos, formando imagens positivas e negativas (figura 19).

Figura 19 - *Kirigami senshi*, *sanshi* e *kokushi*, respectivamente



Fonte: Shinzato (1998)

Na China, o *kirigami* era muito utilizado para confeccionar talismãs de boa fortuna, sorte e bons fluidos, assim como na confecção de silhuetas de bonecos para teatros de sombra. Segundo Rich (2000 apud UENO, 2003), o recurso de cortar o papel em formas vazadas, semelhante ao *kirigami*, foi utilizado na Europa como molde para chapas e na representação de símbolos judeus (Estrela de Davi). Esse também foi um emprego do *kirigami* no Japão, principalmente como recurso de impressão de emblemas e brasões de castelos e samurais⁷, assim como molde para estampas que identificavam as famílias de cada província (SHINZATO, 1998). Assim, criava-se uma identidade visual de acordo com feudos e, dentro deles, havia a possibilidade de distinguir as posições sociais de cada família, desenvolvendo um planejamento gráfico da sociedade da época.

Essas aplicações do *kirigami* já o relacionavam com o design, pois sua linguagem gráfica apresentava-se de maneira sintética, tanto figurativa quanto abstrata, procurando estabelecer uma rápida compreensão do seu significado, tornando-se um colaborador para a

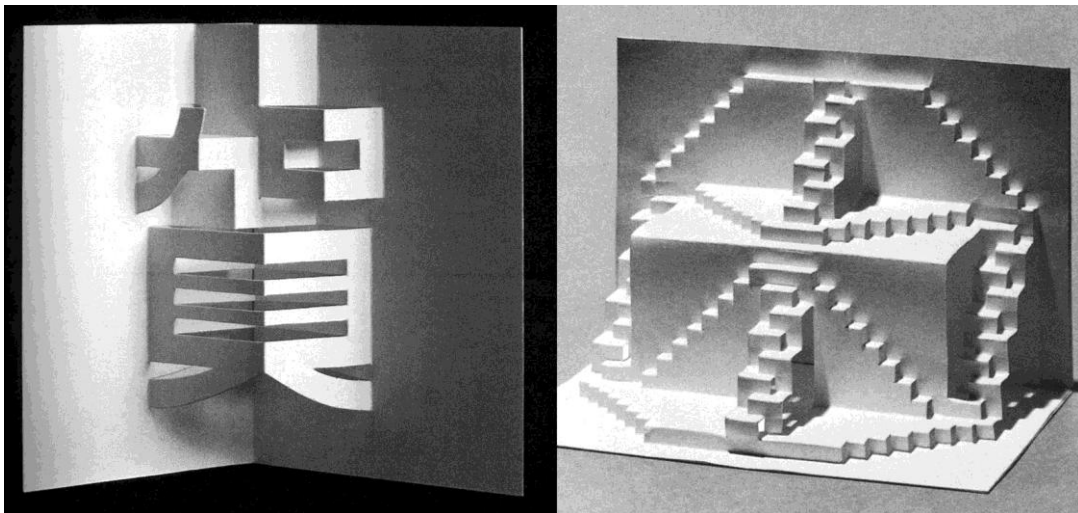
⁷ Guerreiro japonês, membro da casta militar, a serviço de um mestre - *daimio* - como um príncipe, senhor feudal ou o próprio imperador.

linguagem atual dos pictogramas utilizados na sinalização e nas identidades visuais de empresas, marcas e pessoas.

No Brasil, o *kirigami* não é muito conhecido, mas ele é tão tradicional quanto o origami, especialmente na China e no Japão. A diferença principal entre essas duas técnicas, é que enquanto o origami tradicional só emprega dobras no papel, o *kirigami* faz também o uso do corte para criar figuras bidimensionais, como as anteriormente apresentadas, quanto tridimensionais, como as seguintes. Essa modalidade de *kirigami* 3D é também conhecida no mundo como *Origamic Architecture*, denominação dada por Masahiro Chatani na década de 1980, ou também como *pop-up* ou origami arquitetônico.

Chatani (1983) elencou quatro modalidades de origami arquitetônico, definidas pelo ângulo de abertura do modelo: 90° , 180° , 360° e 0° . A modalidade de 90° é a mais praticada e mais comum de se encontrar, devido à sua beleza plástica e à possibilidade de exploração de detalhes, além de proporcionar uma sensação maior de tridimensionalidade e de "edificação" da forma através do processo de abertura e fechamento (figura 20).

Figura 20 - Modelos "*Congratulation*" e "*Escher House 1*"

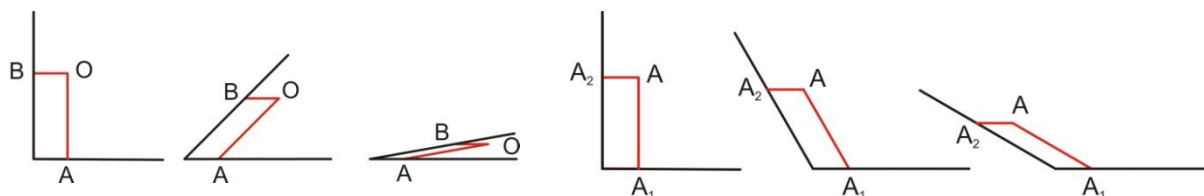


Fonte: Chatani (1983)

As estruturas são obtidas por meio de cortes e dobras geometricamente determinados e elaborados em uma única folha de papel. Se bem planejado e executado com precisão, há uma perfeita harmonia entre as diversas camadas do mesmo papel, que interagem entre si na profundidade, atribuindo volume quando aberto a 90° . Se o modelo é

totalmente aberto (a 180°), a figura retorna ao formato do papel que a originou, havendo um grande aproveitamento do material (figura 21).

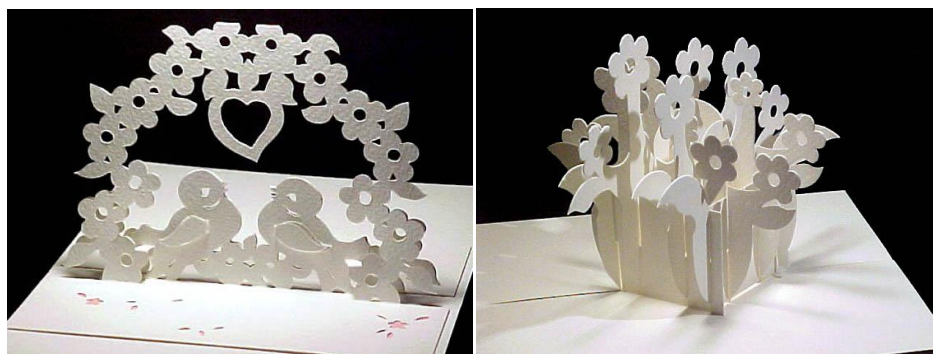
Figura 21 - Perfil do movimento de fechamento e abertura de um modelo em origami arquitetônico 90°



Fonte: Elaborada pela autora

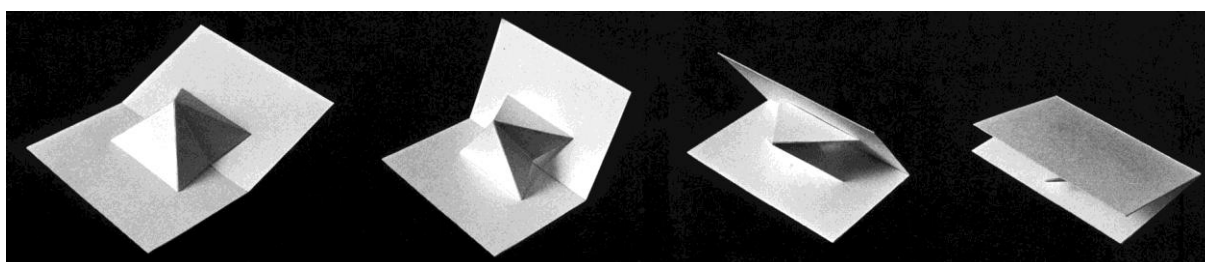
A modalidade de 180° possibilita explorar a junção de imagens simétricas espelhadas ou o encaixe detalhado das diversas fatias que compõem a estrutura (figura 22). Durante o processo de fechamento, a figura e suas partes vão se ajustando até que estejam completamente achatadas e possam caber dentro do molde (figura 23). Quando se abre, ocorre o efeito inverso, dando a impressão de que a figura "desabrocha".

Figura 22 - Modelo 180° simétrico (esquerda) e em fatias (direita)



Fonte: Garrido (2012)

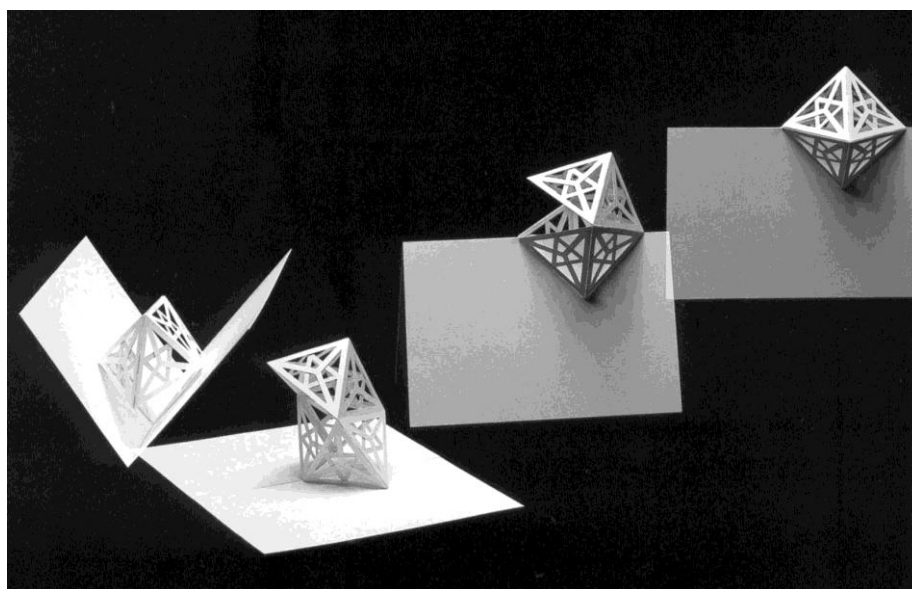
Figura 23 - Visualização do fechamento de um modelo simétrico 180°



Fonte: Chatani (1983)

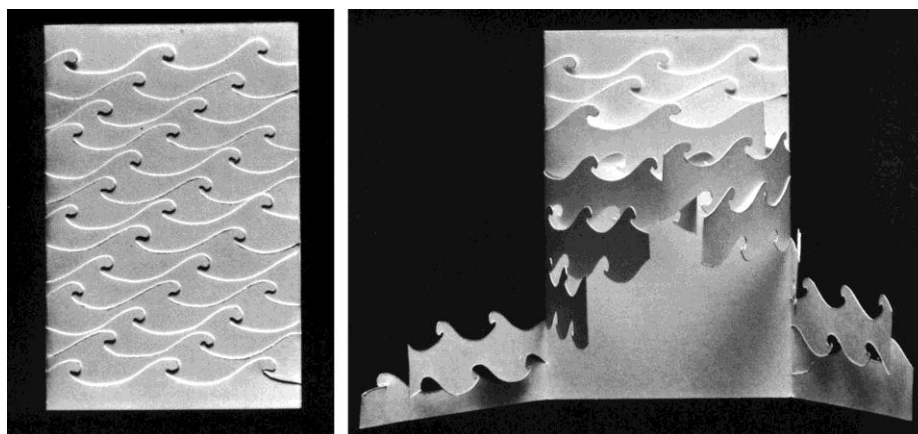
O método de construção do modelo de 360° da designer japonesa Keiko Nakazawa, uma das maiores colaboradoras de Chatani no desenvolvimento desse estilo, baseia-se, na maior parte de suas produções, em figuras geométricas com forte tendência simétrica, como pode ser visto na figura 24 (SHINZATO, 1998). Já os modelos de 0° parecem, à primeira vista, ser feitos por mais de uma camada de papel (figura 25). Entretanto, eles são construídos de maneira a utilizar uma única folha, cujas figuras cortadas e dobradas umas sobre as outras apresentam uma aparência de profundidade.

Figura 24 - Processo de abertura de um modelo 360°



Fonte: Chatani e Nakazawa (1994)

Figura 25 - "Reefy Shore". Modelo 0°, visualizado fechado e aberto, com suas múltiplas camadas de papel

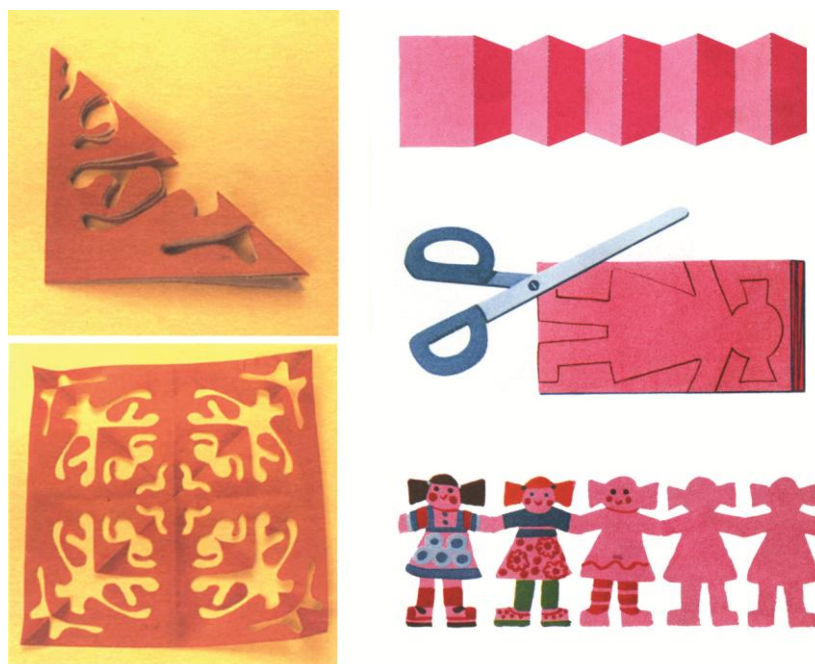


Fonte: Chatani (1983)

Acredita-se que o origami e o *kirigami* possam ter se difundido pela Ásia e Europa no século VII d.C., através da "rota da seda", que intensificou o comércio entre o Ocidente e o Oriente, havendo, portanto, troca entre eles de mercadorias, conhecimento e arte. No Brasil, acredita-se que a prática do origami tenha vindo junto com os colonizadores portugueses e outros preceptores europeus que vieram orientar as crianças das famílias mais abastadas (ASCHENBACH; FAZENDA; ELIAS, 1992). Porém, a divulgação maior dessa técnica ocorreu através dos imigrantes japoneses, que, a partir de 1908, vieram tentar a sorte em solo brasileiro, trazendo sua herança cultural. O uso do origami nas escolas foi intensificado a partir de 1966, quando a Aliança Cultural Brasil-Japão iniciou um curso voltado para professores do jardim da infância e do primário a fim de divulgar a aplicação no ensino fundamental (KODA, 1986).

No entanto, não ocorreu a mesma divulgação do *kirigami* no Brasil, embora sejam encontrados modelos que lembram os estilos *senshi* e *sanshi*. Exemplos disso são os recortes em papel de bonecas e de formas vazadas, muito utilizados em brincadeiras infantis tradicionais (figura 26).

Figura 26 - Exemplos de aplicações comuns do *kirigami*



Fonte: Aschenbach, Fazenda e Elias (1992)

Em relação ao *kirigami* 3D, ou Origami Arquitetônico, a divulgação maior ocorreu com a exposição de trabalhos de Chatani, a partir de 1982, no Japão, nos Estados Unidos e na Europa, assim como as publicações, palestras e cursos que ele empreendeu para contribuir com a difusão dessa técnica em todo o mundo.

2.2.2. Potencial lúdico e educacional

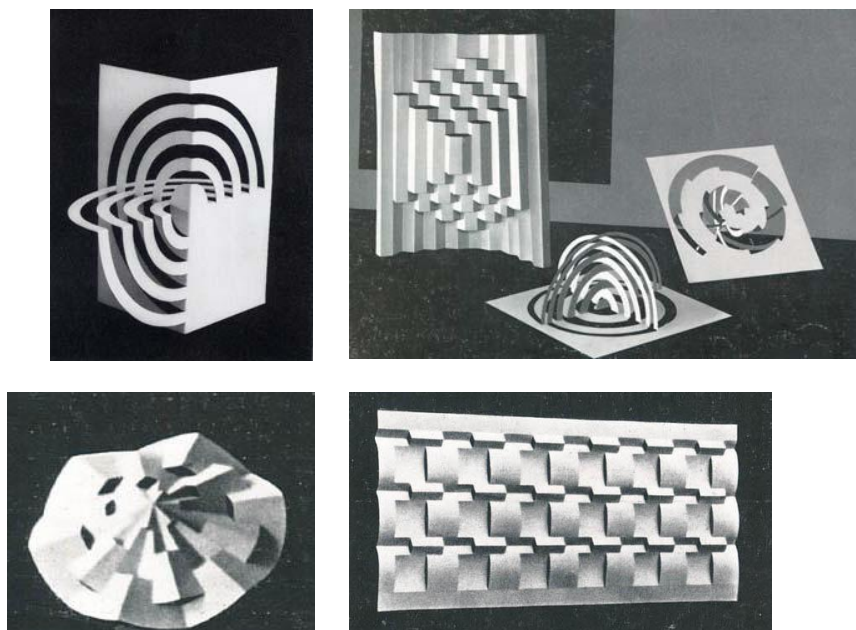
Como o papel não era um material facilmente encontrado, o origami só era realizado em ocasiões especiais, como em cerimônias religiosas, e seu conhecimento era transmitido oralmente através de gerações. Quando a produção do papel começou a aumentar no Japão a partir do século VIII, iniciou-se o uso do origami como recurso lúdico. Ou seja, a popularização do papel através da evolução tecnológica do seu processo produtivo contribuiu para que o origami fosse praticado não somente por especialistas, mas também pela população em geral.

Nesse mesmo período, os mouros tiveram conhecimento dessa técnica através dos chineses e começaram a empregá-la para o estudo da geometria. Acredita-se que os mouros não utilizaram o origami da mesma forma que os japoneses e chineses, em razão da religião muçulmana proibir a representação de figuras, sejam elas de humanos ou animais, partindo então para uma concepção mais abstrata e geométrica.

No começo do século XIX, o educador alemão Friedrich Wilhelm August Fröbel (1782-1852) percebeu o potencial educacional do origami como material auxiliar para a compreensão de conceitos abstratos, e passou a empregar dobras em papel para o desenvolvimento de formas geométricas. As vantagens de se aplicar o origami no processo de ensino-aprendizagem são várias: proporciona o desenvolvimento da intuição, do capricho e da memória; aumenta a concentração e a organização (KODA, 1986); promove melhorias na coordenação visomotora, desenvolve a inteligência não-verbal, a acuidade visual e a visualização tridimensional (SHUMAKOV; SHUMAKOV, 2001).

Durante o funcionamento da Bauhaus (entre 1920 e 1930), Josef Albers (ADLER, 2004; YIGIT, 2004) percebeu o potencial das dobras e dos cortes como técnica exploratória e encorajou seus alunos a manipularem o papel para o estudo de transformação e desenvolvimento de estruturas (figura 27).

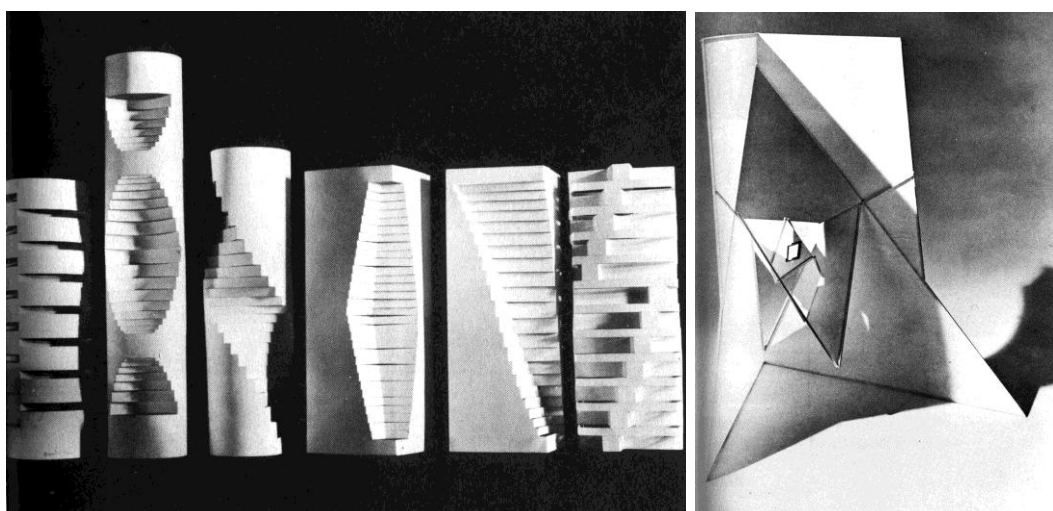
Figura 27 - Experiências de Josef Albers na Bauhaus



Fonte: Wingerl⁸ (1975 apud YIGIT, 2004)

Adicionalmente, as pesquisas de Hiromitsu Kawai e de Munari (figura 28), que se assemelham muito à estrutura do origami arquitetônico, buscaram na manipulação do papel a exploração de contrastes, texturas e interatividade, através de cortes e dobras (MUNARI, 1968).

Figura 28 - Formas 3D obtidas a partir de corte e dobra em experiências de Hiromitsu Kawai e Munari



Fonte: Munari (1968)

⁸ Wingerl, H. M. **Das Bauhaus**, Bramsche, Germany: Verlag Gebr. Rash&Co., 1975

A utilização de materiais concretos como recurso didático no ensino de conceitos abstratos contribui para uma interação maior do aluno com seu meio, através da manipulação de objetos e experimentação manual e rápida dos seus efeitos. Com esse recurso, desenvolve-se a percepção através da ação física e intelectual, provocando questionamentos e despertando interesses. O uso do papel, em especial, contribui ainda mais pela facilidade de se encontrar o material, por ser realizável a qualquer hora e em qualquer lugar (KODA, 1986).

2.2.3. *Potencial Criativo*

Com a utilização do origami nas escolas para estimular o desenvolvimento do pensamento criativo, iniciou-se uma nova fase em busca de novos fundamentos e novos modelos, que possibilitassem infinitas criações artísticas. Assim, nos anos 1930, Akira Yoshizawa revolucionou a história do origami através da criação de 50 mil novos trabalhos baseados em modelos tradicionais, e desenvolveu um sistema representativo e simbólico para ilustrar seus diagramas (KODANSHA, 1983). Mas seu trabalho só ficou conhecido a partir de uma pequena exposição no Museu Municipal de Amsterdã, em 1955, e outra, em 1959, em Nova York (KODANSHA, 1983). A partir desse momento, outras exposições que percorreram os Estados Unidos e a Europa chamaram a atenção pelas possibilidades que Yoshizawa apresentava. Dessa forma, origami não era mais uma atividade de criança ou de repetição de movimentos e dobras pré-concebidas, mas também se mostrava como uma técnica fascinante de criação de novas formas, sejam elas simples ou complexas, representativas ou abstratas, ganhando o status de arte criativa. A partir de então, publicações e parcerias com outros artistas de diversos países interessados no origami criativo facilitaram a sua internacionalização, assim como o estabelecimento de associações e organizações voltadas ao seu estudo, desenvolvimento e divulgação.

Uma das principais características dessa fase é a propriedade intelectual dos modelos criados e das sequências de dobras. Os origamis tradicionais são modelos de autoria anônima, passada de geração em geração, sem a preocupação de atribuir créditos para seu criador. No entanto, na fase criativa do origami e do *kirigami*, os modelos são considerados obras artísticas, e, portanto, devem ser creditados devidamente em qualquer reprodução. Além disso, as associações mundiais dessas técnicas buscam difundir a ideia de que é livre o ensino e a utilização dos modelos para presentear as pessoas, mas é vedada a sua

comercialização. Entretanto, o artista é livre para elaborar modelos específicos de origami e *kirigami* para clientes, atendendo encomendas de peças artísticas e estabelecendo valores comerciais de acordo com a mídia de divulgação, o alcance e o nível de exclusividade desse projeto.

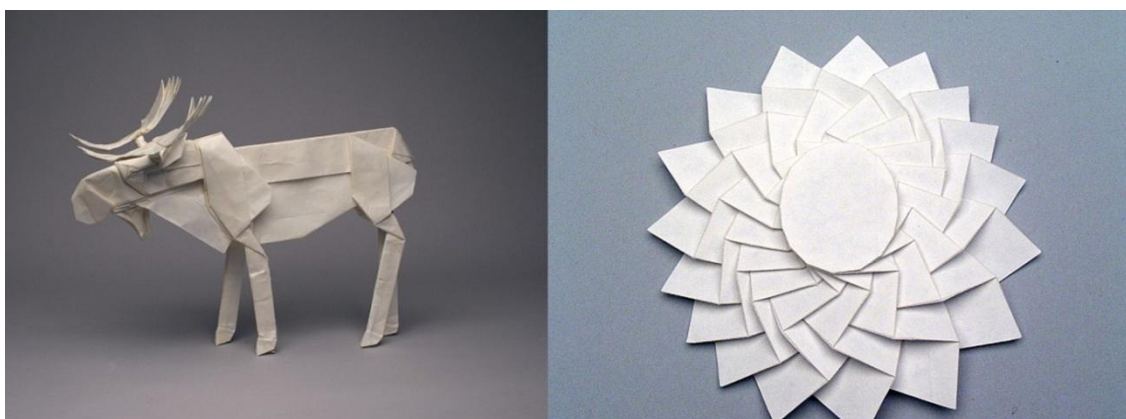
Os origamistas (artistas do origami) que se destacam são: Akira Yoshizawa, pela sua importante contribuição na história do origami; Tomoko Fuse, pelos seus modelos de caixas e estruturas poliédricas; Eric Joisel, pelas suas obras em origami com método *wet-folding* (figura 29); e Robert Lang, com a criação de mais de 480 novos modelos (figura 30).

Figura 29 - Obras de Eric Joisel: "Crane Viking" e o detalhe das dobras da cabeça do "Balrog"



Fonte: Joisel (2012)

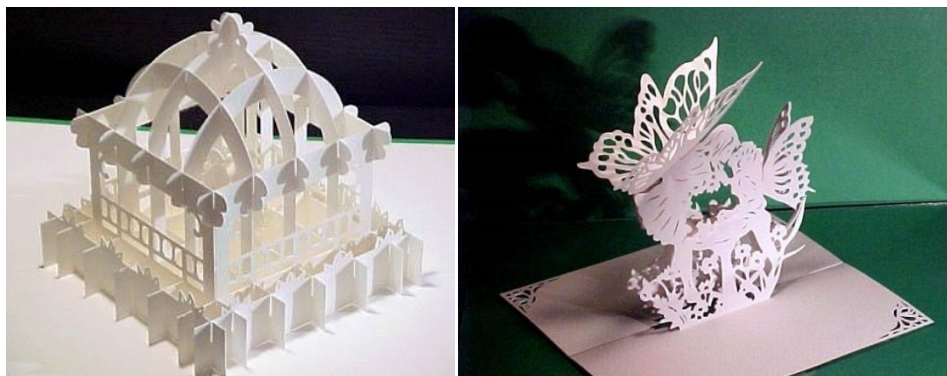
Figura 30 - Obras de Robert Lang: "Bull Moose" e "Oval Tessellation"



Fonte: Lang (2015)

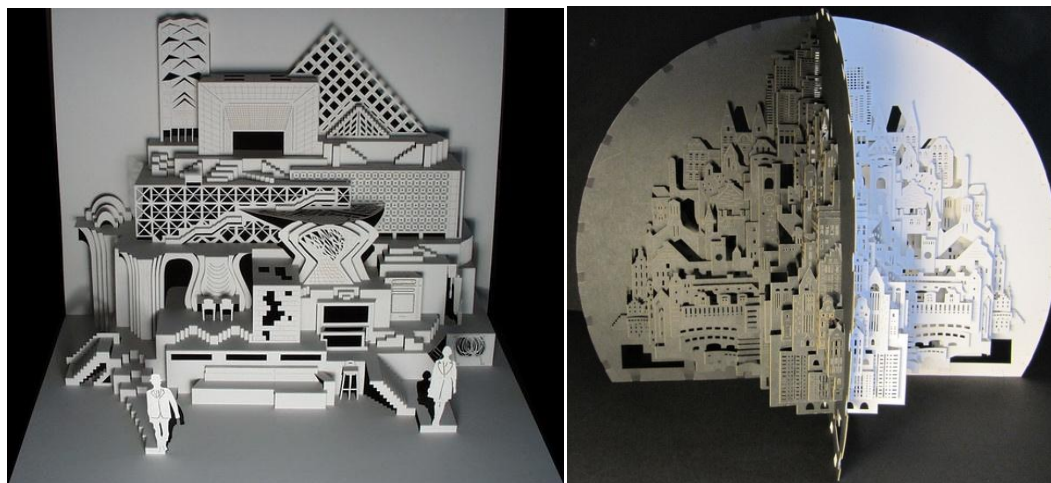
Entre os kirigamistas, destacam-se: Masahiro Chatani, com suas dezenas de publicações que ajudaram a difundir o origami arquitetônico pelo mundo; Maria Victoria Garrido, com seus trabalhos de *kirigami* 3D da modalidade 180° (figura 31); e Ingrid Siliakus, com suas complexas obras da modalidade 90° (figura 32).

Figura 31 - Obras de Maria Victoria Garrido: "Pergola" e "Kiss"



Fonte: Garrido (2012)

Figura 32 - Obras de Ingrid Siliakus, dos Países Baixos



Fonte: Siliakus (2013)

Durante o movimento neoconcreto brasileiro, alguns artistas exploraram cortes e dobras na transformação de um material bidimensional em uma estrutura tridimensional na busca por novas soluções na arte. Augusto de Campos e Julio Plaza (1984) exploraram técnicas semelhantes ao *kirigami* 3D em uma sequência de cartões de poesias concretas em

papel. Assim, os cortes e as dobras se conectam em um jogo de palavras, que ora se apresentam, ora se escondem, ao manusear a obra (figura 33).

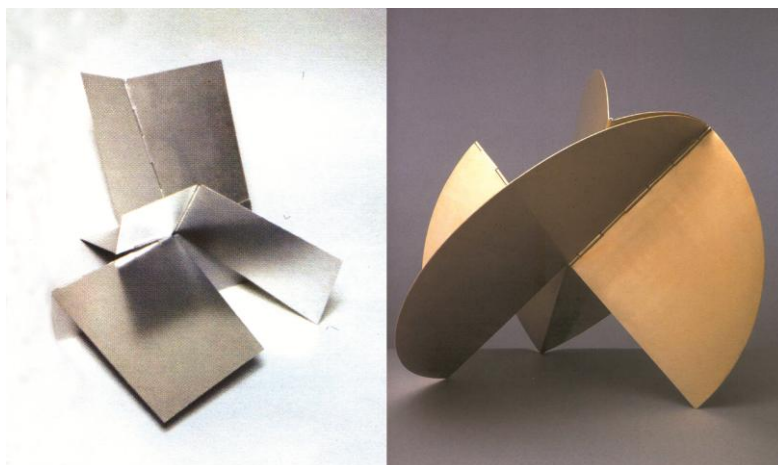
Figura 33 - Alguns cartões que compõem o Poemóviles



Fonte: Campos e Plaza (1984)

Outros artistas ousaram na exploração de cortes e dobras em materiais rígidos, de espessura fina ou grossa, articulados ou não. Assim, a esculturas flexíveis em chapas de alumínio "Bicho" e "Relógio de Sol" de Lygia Clark permitem experiências de exploração e manipulação de suas formas poligonais através da mobilidade atribuída pelas dobradiças metálicas (figura 34). Além disso, a proposta também era estimular o observador da obra a ser um co-autor participante, explorando seu aspecto vivo e mutável a cada interferência. Embora a estrutura não lembre o origami, a estratégia adotada por Clark de utilização de dobradiças em materiais que simplesmente não dobras e desdobram sem se partir, merece destaque.

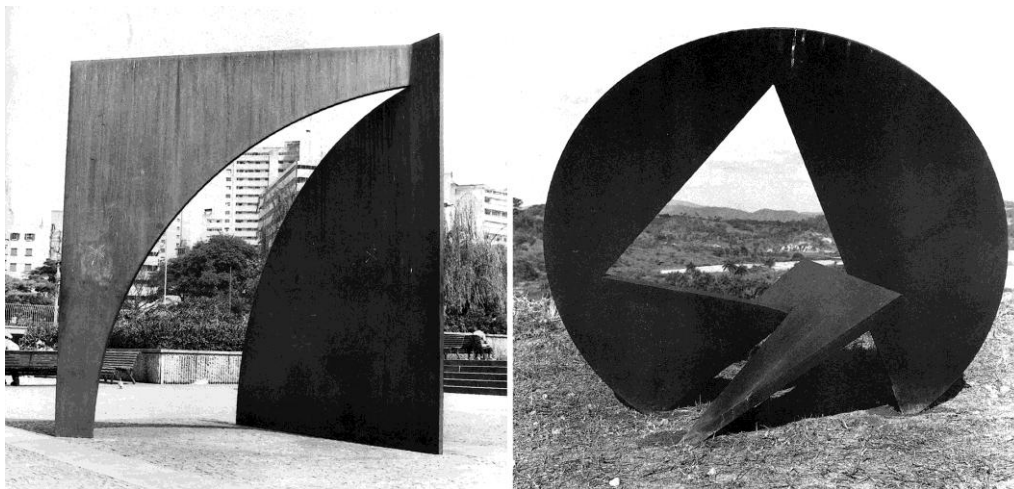
Figura 34 - Obras de Lygia Clark, 1960: "Bicho" (esquerda) e "Relógio de Sol" (direita)



Fonte: Paralelos (2002)

Já Amilcar de Castro chegou a estruturas com força formal, equilíbrio e estabilidade através de poucos cortes e dobra feitas em aço (figura 35). Percebe-se que o material não permite muitas intervenções, principalmente pela sua espessura e peso consideráveis que não convidam à flexibilidade, mas há uma releitura do formato inicial da peça com aproveitamento máximo, intervenção mínima, e resultado perfeito.

Figura 35 - Obras sem título de Amilcar de Castro, entre as décadas de 1970 e 1980



Fonte: Naves (1997)

Com esses exemplos de explorações artísticas do origami e do *kirigami*, percebe-se que extrapolar o material, saindo do papel e da qualidade "*kami*", permite novas releituras, novas possibilidades e, conseqüentemente, buscar novos desafios. O design brasileiro, ao contrário das artes visuais, até o momento ainda não percebeu e nem utiliza todo esse potencial, limitando-se a considerar essas técnicas apenas em projetos gráficos e alguns tímidos exemplos de produtos.

2.2.4. Potencial Matemático e Aplicado

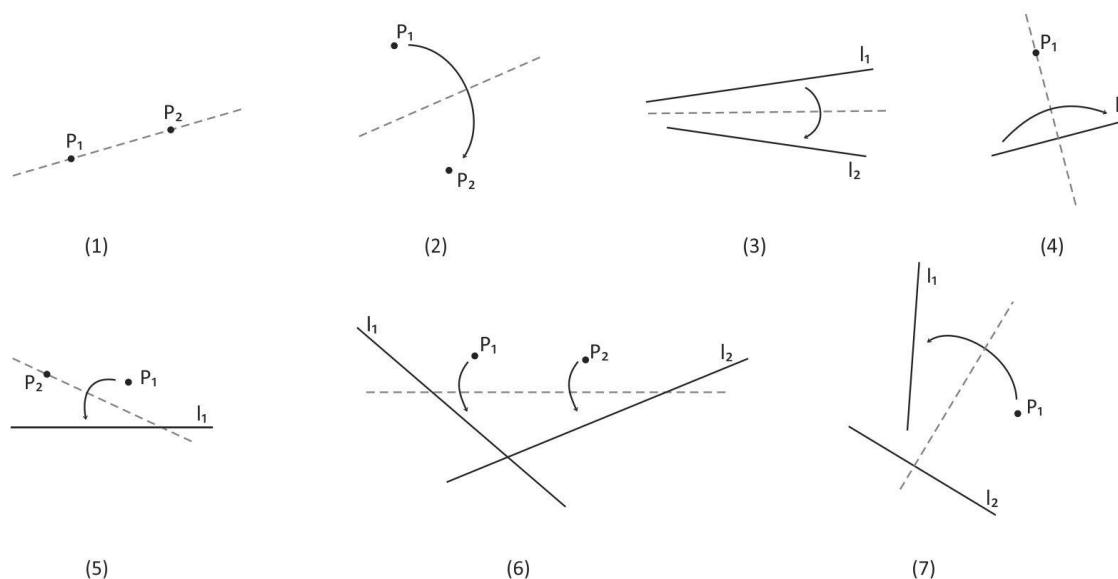
Com o emprego do origami como recurso didático para o ensino de geometria, mudou-se o foco original de representação de figuras cerimoniais ou de exploração de seu aspecto lúdico para o estudo científico de suas características formais e suas relações com outras áreas da matemática. Para entender como surgem figuras tridimensionais a partir de um material plano apenas aplicando-se dobras e cortes, os cientistas iniciaram, a partir de 1980, uma série de estudos que determinassem as leis que regiam a lógica construtiva do origami e do

kirigami. Esses estudos traduziram a linguagem física do papel dobrado-cortado em linguagem matemática, correlacionando essas técnicas com as áreas da geometria plana e espacial, trigonometria, cálculo e álgebra.

Foram então desenvolvidos teoremas e axiomas para explicar a geração de objetos tridimensionais através da dobra de superfícies planas, como os Axiomas de Huzita-Hatori (FEI; SUJAN, 2013). Esses axiomas foram descobertos por Jacques Justin, em 1989, aperfeiçoados por Humiaki Huzita, em 1991, e finalizados por três estudiosos matemáticos, Koshiro Hatori, Jacques Justin e Robert Lang, em 2001, e são considerados como os fundamentos do origami matemático. São eles (figura 36):

1. Dados dois pontos P_1 e P_2 , é possível dobrar uma única linha conectando os dois pontos.
2. Dados dois pontos P_1 e P_2 , é possível dobrar uma única linha que coincida P_1 em P_2 .
3. Dadas duas linhas l_1 e l_2 , é possível dobrar l_1 até coincidir com l_2 .
4. Dados um ponto P_1 e uma linha l_1 , é possível fazer uma dobra perpendicular a l_1 passando por P_1 .
5. Dados dois pontos P_1 e P_2 e uma linha l_1 , é possível fazer uma dobra que coloque P_1 sobre l_1 e que passe pelo ponto P_2 .
6. Dados dois pontos P_1 e P_2 e duas linhas l_1 e l_2 , é possível fazer uma dobra que coloque P_1 sobre l_1 e P_2 sobre l_2 .
7. Dado um ponto P_1 e duas linhas l_1 e l_2 , é possível fazer uma dobra que coloque P_1 sobre l_1 e que seja perpendicular a l_2 .

Figura 36 - Axiomas de Huzita-Hatori



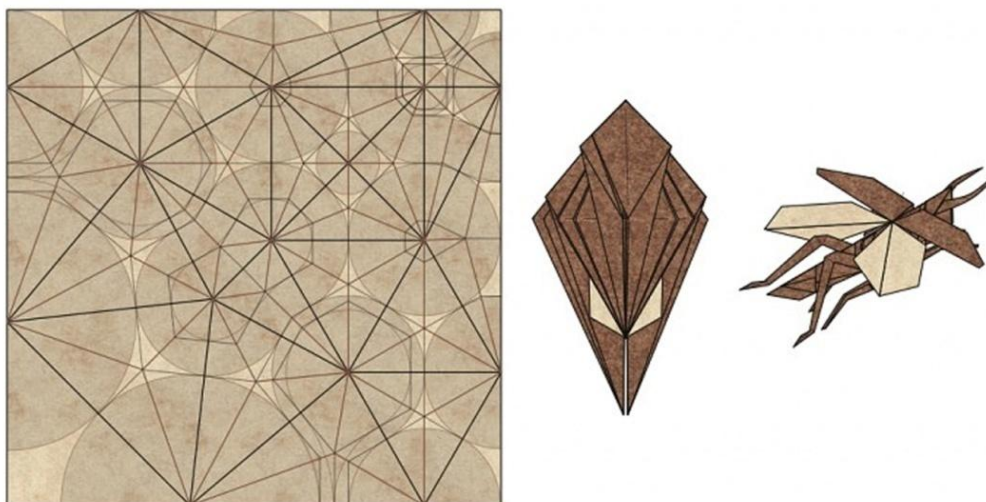
Fonte: Elaborada pela autora

A descoberta desse e de outros teoremas da matemática do origami possibilitou o desenvolvimento dos sistemas computacionais baseados no origami, ou seja, a tradução das dobras físicas no papel em virtuais, viabilizando a aplicação desses conceitos na busca por soluções de modelagem computacional de padrões de dobra.

Para iniciar esses estudos, os origami designers Jun Maekawa e Peter Engel dividiram o padrão de dobra em triângulos e retângulos e os rearranjaram para criar outros. Através desse pensamento simples, foi desenvolvido um algoritmo avançado capaz de gerar um novo padrão a partir de entradas arbitrárias de comprimento e reorganização de áreas. Um dos programas que utilizam esse algoritmo é o *TreeMaker* (LANG, 2015), que atua através de um método "tree" ("árvore" ou "tronco").

Para compreender esse método, é preciso saber que no origami existem dobras básicas, essenciais para fazer qualquer modelo, e formatos básicos, ou seja, uma figura básica da qual podem ser gerados novos modelos, dependendo do prosseguimento que se dá a partir dele. Por isso, esses formatos básicos são considerados como alicerces para novos modelos, tal como tronco de uma árvore de novos designs. Assim, o *TreeMaker* permite projetar um novo modelo de origami a partir de um formato básico, sugerindo a localização ideal de cada dobra para se obter o máximo aproveitamento do papel (figura 37).

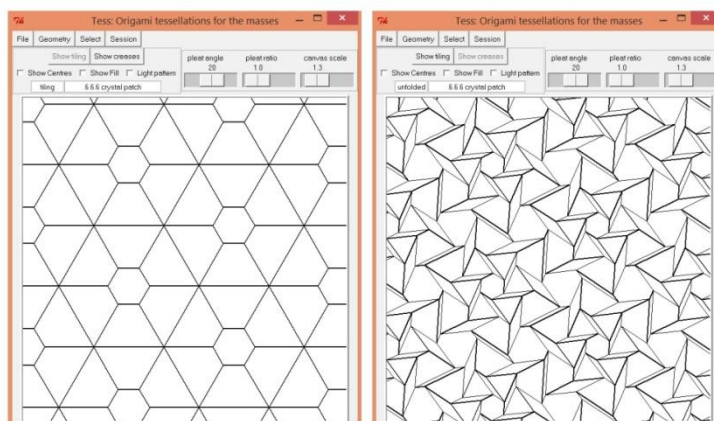
Figura 37 - Origami de um gafanhoto voador: diagrama de dobra, formato básico, e formato final



Fonte: Lang (2015)

O Tess (BATEMAN, 2013) é um programa para desenhar modelos de origami do tipo *tesselation*, que pode ser traduzido como "mosaico", lembrando padrões geométricos repetidos para pavimentação total de um plano (figura 38). Um origami *tesselation* é formado por formas geométricas dobradas em uma única folha de papel, criando um padrão de repetição de formatos por meio de vincos dobrados e torcidos (GJERDE, 2009). O interessante desse tipo de origami é o efeito criado com a sobreposição das formas geométricas e a mudança total de direção do papel com as dobras (figura 39). Além disso, existem tipos diferentes de *tesselation*, entre eles os que apresentam uma estrutura geométrica estática e os que oferecem movimento entre as peças (figura 40).

Figura 38 - Tela do programa Tess: padrão inicial (à esquerda) e o diagrama gerado (à direita)



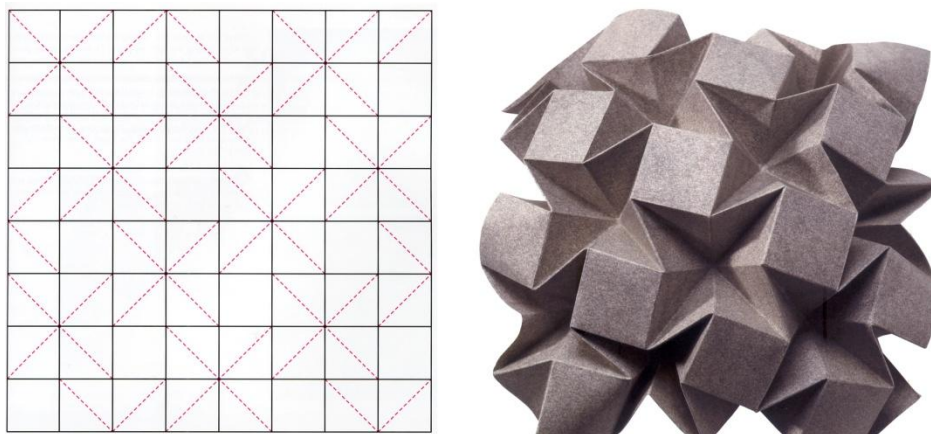
Fonte: Elaborado pela autora através do Tess

Figura 39 - *Tessellation "Spread hexagon"*: diagrama (esq.), e o modelo finalizado visto de frente e verso



Fonte: Gjerde (2009)

Figura 40 – Um modelo de *tessellation* com movimento: "*Waterbomb*"



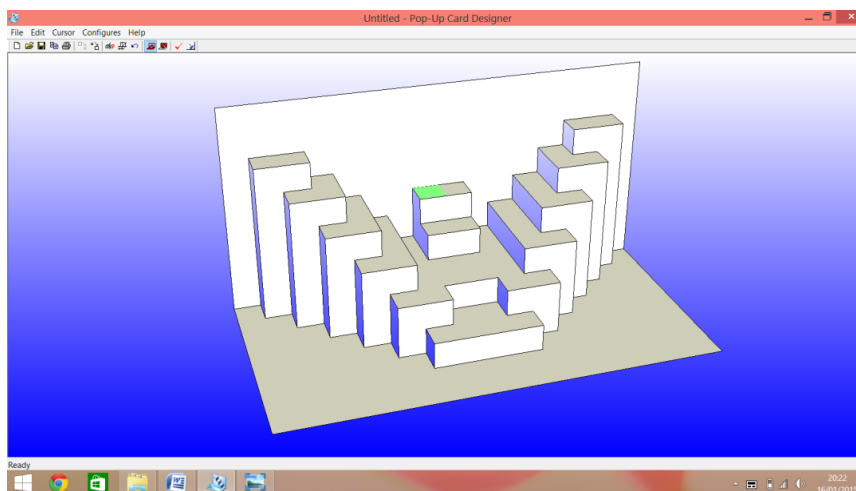
Fonte: Gjerde (2009)

Apesar da facilidade em gerar diagramas pelo programa, existe a possibilidade do modelo não funcionar, ou ainda, que ele seja um verdadeiro desafio. De qualquer forma, é válido pelo seu aspecto lúdico e pelas infinitas possibilidades que ele apresenta.

O *kirigami* também foi objeto de estudo para o estabelecimento de algoritmos capazes de darem suporte a programas capazes de desenhar modelos do tipo 90° (TOR; MAK; LEE, 2004; CHEONG; ZAINODIN; SUZUKI, 2006; LI et al., 2010) e da modalidade 180° (MITANI; SUZUKI, 2004; HARA; SUGIHARA, 2009; IZUKA et al., 2011). Assim, tem-se alguns programas disponíveis na internet como o *Pop-up Card Designer* (TAMA SOFTWARE, 2007) e o *Pop-up Card Designer PRO* (TAMA SOFTWARE, 2008). A facilidade desses softwares está na modelagem tridimensional rápida de novos modelos (figura 41) e na geração de um diagrama de corte e dobra que pode ser impresso em papel e executado com a certeza de sucesso. Entretanto, os dois softwares podem ser limitantes na criação de modelos

totalmente originais, especialmente se for empregado um alto nível de complexidade de dobras e cortes.

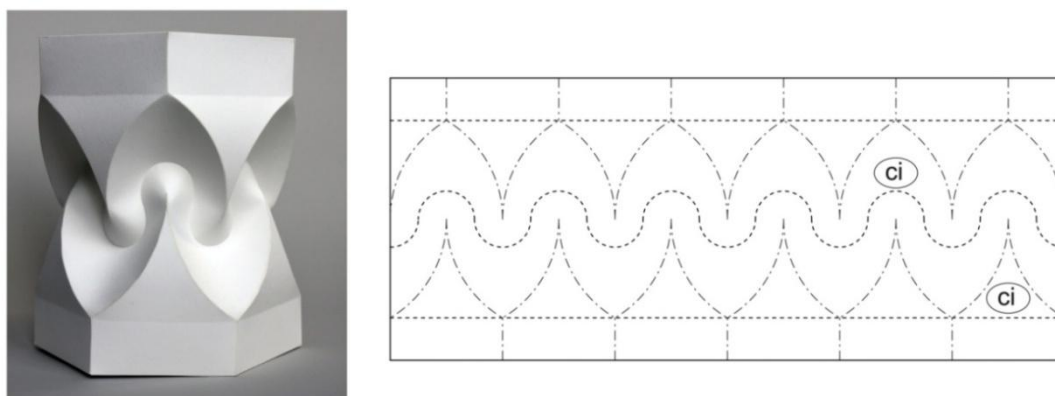
Figura 41 - *Pop-up Card Designer*



Fonte: Elaborada pela autora

Em contraste com a dobra em linha reta que se vinha empregando até esse momento, o origami computacional possibilitou também o emprego de dobras em linhas curvas. Um exemplo disso são os estudos de Huffman (DEMAINE; DEMAIN; KOSCHITZ, 2010), que permitiram a obtenção de dobras advindas de curvas cônicas, como a hipérbole e a parábola, e resultando em verdadeiras obras ao mesmo tempo plásticas e científicas (figura 42).

Figura 42 - "*Hexagonal column with cusps*" de Huffman: modelo dobrado e diagrama correspondente, que emprega arcos de circunferência (ci) e linhas retas

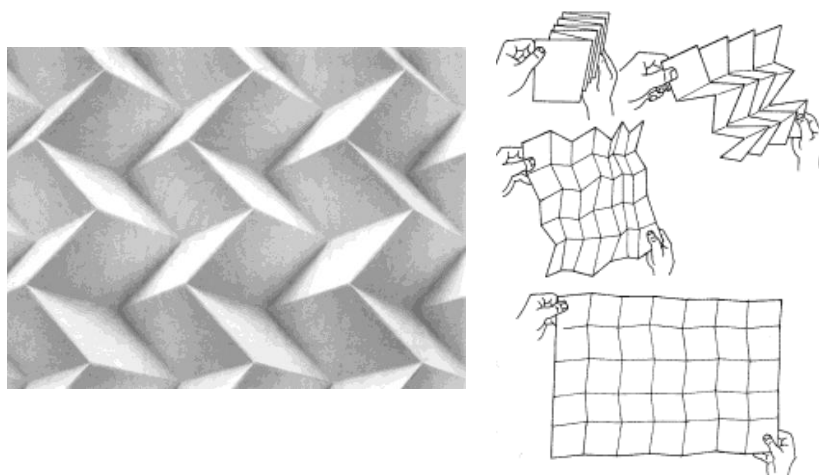


Fonte: Demaine, Demaine e Koschitz (2010)

Os programas desenvolvidos e a sua lógica baseada na estrutura do origami permitem que engenheiros desenvolvam projetos inspirados em biomimetismo⁹ e origami, como os estudos de Nojima Taketoshi, de modelagem robótica biomimética a novas interpretações de mecanismos biônicos (STEWART, 2007). Existem também pesquisas que acrescentam outro complexo campo de estudo, a tecnologia da robótica, surgindo o *Oribotics*, cujos padrões de dobra rígidas e não-rígidas atribuem um movimento natural de curvatura (GARDINER, 2009).

O modelo de Miura, também conhecido como Miura-Ori, foi desenvolvido pelo cientista japonês Koryo Miura para resolver o problema de compressão por encurtamento de um plano, verificando sua deformação. Por meio de várias pesquisas que se iniciaram nos anos 1970, Miura finalmente chegou ao padrão que fosse deformável simultânea e homoganeamente nas direções ortogonais. Para demonstrar uma aplicação prática de seu padrão, Miura o utilizou primeiramente como um padrão de dobragem do “Mapa de Veneza”, e que foi posteriormente aplicado em várias outras publicações desse tipo (figura 43).

Figura 43 - Miura-Ori original e sua aplicação em mapas



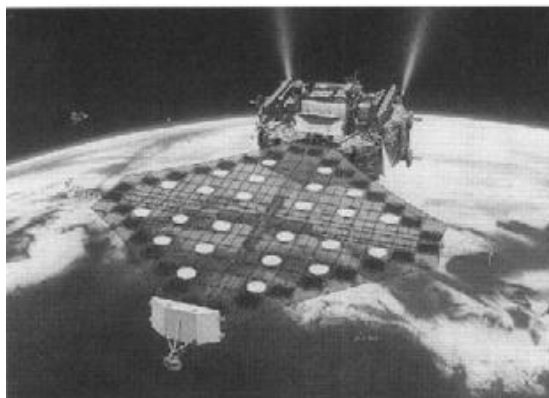
Fonte: Miura (2009)

Com esse mesmo padrão, Miura (2009) participou do projeto japonês “*Space Flyer Unit*”, para o desenvolvimento do painel solar transformável, que foi concluído com sucesso em 1995 (figura 44). Outras duas pesquisas na área da biologia, como a de Kobayashi,

⁹ Estudo dos princípios e estratégias da natureza visando à criação de soluções para os problemas atuais da humanidade, unindo funcionalidade, estética e sustentabilidade.

Kresling e Vincent (1998) e Mahadevan e Rica (2005), confirmaram a hipótese de Miura de que esse padrão exige o mínimo de energia para sua abertura, e que poderia ter aplicações em vários sistemas.

Figura 44 - Dobra de Miura aplicada no projeto *Space Flyer Unit*



Fonte: Miura (2009)

Esse e outros padrões de dobra solucionados para superfícies planas também funcionam em superfícies cilíndricas, como demonstraram os estudos de Fujimoto e Nishiwaki¹⁰ (1982 apud YOU; KURIBAYASHI, 2009). Um exemplo de aplicação prática é o padrão triangular cilíndrico comumente empregado pela indústria japonesa em latas dobráveis (figura 45), facilitando a dobragem e o descarte para reciclagem, sem ocupar muito espaço (HAN; YAMAZAKI; NISHIYAMA, 2004). A estrutura geométrica da lata lhe confere uma altura três vezes superior à de uma lata comum, obtendo-se 30% de redução de material.

Figura 45 - Latas dobráveis

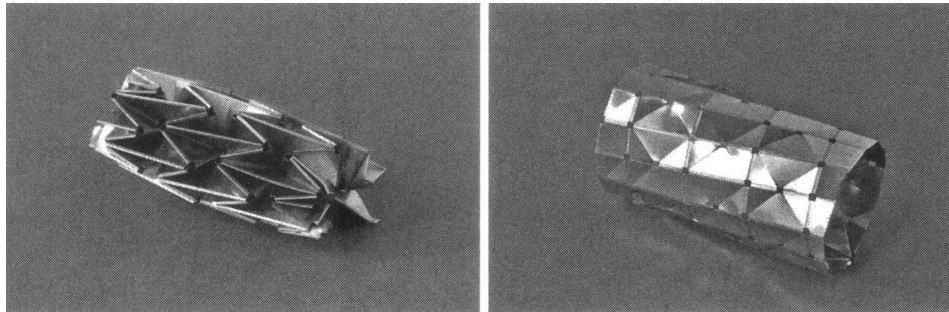


Foto: Thaís R. Ueno Yamada

¹⁰ FUJIMOTO, S.; NISHIWAKI, M. *Sozo suru origami asobi e no shiotai (An invitation to creative origami play, in Japanese)*. Osaka, Japan: Asahi Culture Center, 1982.

Percebendo o potencial dos cilindros expansíveis por meio de padrões estruturais do origami, Kuribayashi et al. (2006) desenvolveram um *origami stent graft* (endoprótese auto-expansível) com dois propósitos: desbloquear alguma veia, artéria ou tubo humano doente e isolar um aneurisma existente (figura 46).

Figura 46 - Origami stent graft



Fonte: Kuribayashi et al. (2006)

Outros exemplos do potencial de aplicação das estruturas dobráveis na área da engenharia são o software de simulação de abertura de *air-bags* de Hoffman (CIPRA, 2001), que evita maiores custos nos testes físicos desse tipo de equipamento, melhorando seu desempenho a partir do desenvolvimento de sistemas de dobragem e abertura mais eficientes, e o projeto do telescópio espacial expansível, da *Lawrence Livermore National Laboratory*, cujo objetivo é o de proporcionar maior facilidade de transporte no foguete, reduzindo seu tamanho, e alcançando o maior diâmetro possível com a sua abertura posterior no espaço (LANG, 2015).

Nojima Taketoshi, pesquisador da Tokyo Institute of Technology, propôs em 2002 o termo *Origami Engineering*, acreditando na importância de estudos acadêmicos sobre as tradicionais artes do origami e do *kirigami* para o desenvolvimento de sofisticados projetos e tecnologias. Uma de suas pesquisas dentro dessa área é o desenvolvimento de uma estrutura em origami para carros a fim de diminuir seu peso e aumentar sua eficiência na absorção de impacto em caso de colisão. Além dessa, há muitas outras possibilidades apontadas por Taketoshi de projetos que possam ser dobrados e desdobrados instantaneamente, tais como garrafas plásticas, latas e outros recipientes dobráveis, materiais de construção, equipamentos médicos e produtos usados em emergências e resgates (HAGIWARA, 2008).

Abrem-se então novos caminhos de pesquisas para descobrir o comportamento de diversos materiais em relação às estruturas do origami e do *kirigami*, e suas aplicações em problemas reais, evidenciando que o estudo científico dessas técnicas ainda tem muito a contribuir para a engenharia, para a biomedicina, assim como para o design, sendo uma importante ferramenta na concepção de projetos que precisem da transformação de um material bidimensional em um produto tridimensional.

Assim, um longo caminho foi percorrido pelo origami e *kirigami*, desde seus primeiros modelos em papel até tornar-se objeto de pesquisa científica, cuja trajetória é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Origami e *kirigami*: trajetória e principais características em cada período

Fase	Período	Características
Tradicional	Após 105 d.C.	<ul style="list-style-type: none"> • Forte simetria • Ligação forte com o material papel • Aplicação em cerimônias religiosas e ocasiões especiais • Utilização de cortes e dobras (<i>kirigami</i>) • Utilização de dobras (origami) • Autoria anônima
Educacional	A partir do final do Séc. XIX	<ul style="list-style-type: none"> • Correlações com a geometria • Ligação forte com o material papel • Aplicação como recurso lúdico e educativo • Utilização de cortes e dobras • Reprodução • Criação e experimentação
Criativo	A partir da segunda metade do Séc. XX	<ul style="list-style-type: none"> • Padronização da simbologia específica • Criação artística • Propriedade intelectual • Divulgação e internacionalização do origami e do <i>kirigami</i>
Computacional e Matemático	A partir de 1980	<ul style="list-style-type: none"> • Correlações com áreas da matemática: álgebra, geometria, trigonometria etc. • Axiomas e teoremas • Introdução das dobras curvas • Pesquisas de outros materiais além do papel: metal, plástico, madeira • Aplicação em softwares e projetos de engenharia, biomedicina, design

2.3. Design do Origami e do Kirigami

Neste trabalho, será considerado que o projeto de modelos em origami e *kirigami* receba a denominação geral de *design orikiri*. Isso porque a palavra *design* engloba planejamento, desenho e produção, ou seja, todas as fases da criação de um modelo em origami e *kirigami*. Assim, se as referências usadas fossem apenas usando o conceito "desenho", ele não faria jus à complexidade da concepção e do pensamento envolvidos durante todo o processo. E o termo *orikiri* atribui ao design as qualidades e essências do origami com as do *kirigami*, fundindo as técnicas de dobra (*oru*) e as de corte (*kiru*) em uma só denominação, eliminando o termo *kami*, que não faz mais sentido nesta proposta, pois o material do design *orikiri* não se restringe mais ao papel.

Em termos básicos, o origami e o *kirigami* se constituem da criação de uma forma volumétrica através de uma sequência de dobras (e cortes) em um material achatado/bidimensional (folha de papel, placas de metal, madeira, plástico etc). Dessa maneira, pode-se simplificá-los como sendo um conjunto de planos poligonais estruturados em determinada ordem, separados por linhas delimitantes (dobra/vinco) que se encontram em determinados pontos (vértices).

Segundo Yigit (2004), no design do origami, um plano é capaz de criar estruturas espaciais estáveis ou dinâmicas integrando e movimentando suas diversas partes em um todo. E isso só é possível pela mudança de pensamento bidimensional para o tridimensional. Assim, o princípio básico do design *orikiri* é mudar constantemente o pensamento 2D em 3D e vice-versa. Para isso, capacidade de visualização e rotação mental da forma em seu todo, analisando espaço e profundidade, são algumas características necessárias para quem for criar um novo modelo. Além disso, é necessário explorar o impacto da massa e testar diferentes materiais. Todas essas qualificações impulsionam o criador a pensar como um designer e como um engenheiro, sendo um trabalho desafiador e que necessita de grandes propriedades intelectuais (NOLAN, 1995).

2.3.1. Elementos e princípios do design orikiri

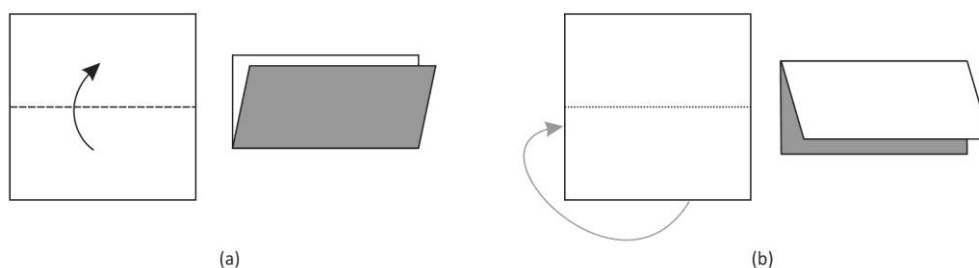
Considerando-se o origami e o *kirigami* como projetos com um tipo de material (específico e plano), o seu design requer a compreensão dos elementos estruturais básicos que os compõem. Tomando como base os elementos da linguagem visual de Dondis (1997), pode-

se elencar os que estão essencialmente ligados ao design *orikiri*: **ponto, linha, forma, direção, dimensão (bidimensional e tridimensional), textura, proporção e movimento**. Apesar de o **tom** e a **cor** não se incluírem nesta seleção, eles continuam sendo elementos do design do origami e do *kirigami*, mas considerados visuais e não estruturais.

O **ponto** é a referência principal para as dobras, demarcando um lugar no plano pelo qual devem passar os vincos. Ele pode ser o vértice da placa/folha inicial, o encontro entre uma linha de dobra e a borda da folha ou entre duas ou mais linhas de dobra.

A **linha** surge no plano ao ser dobrado ou vincado. A dobra caracteriza a mudança de direção de um plano. Se o plano se dobra para frente, é caracterizada a dobra “vale”, e se ele se dobra para trás, tem-se a dobra “montanha”, segundo linguagem própria do origami (figura 47). Quando ocorre a dobra e ela é desfeita logo em seguida, isso permite a marcação ou delimitação do plano em uma linha específica, chamada de **vinco**, que serve de referência para outras dobras adicionais ou para facilitar posteriores processo de dobra.

Figura 47 - Dobra vale (tracejado) e dobra montanha (pontilhado)



Fonte: Elaborada pela autora

As linhas de dobra e vinco no origami sempre foram retas, até o advento do origami computacional, que permitiu a realização de pesquisas com dobras curvas. Quanto à sua rigidez, elas podem ser flexíveis e espontâneas (em alguns modelos artísticos de origami) ou técnicas e rigorosas (na maioria dos modelos de origami). No *kirigami*, a linha representa também o caminho por onde é feito o corte (reto ou curvo), ou seja, onde o plano inicial irá se transformar em mais planos que mudarão de direção.

A **forma** básica inicial de muitos modelos de origami é quadrada, e dos modelos de *kirigami* 3D são retangulares, mas também pode-se partir de circunferências, triângulos,

losangos, entre outros. A estrutura gerada pela manipulação dessa forma básica inicial possui características fortemente geométricas, derivadas de suas construções fundamentais como: mediatriz, bissetriz, paralelismos, perpendicularidade, divisão proporcional de segmentos e ângulos.

Segundo Yigit (2004), as formas do origami podem ser classificadas por dois pontos de vista diferentes: purista e não-purista. A primeira (derivada do origami tradicional) possui linhas retas, planos poligonais e volume poliedral, com uma cor única e textura homogênea; a segunda, no entanto, apresenta linhas retas e também curvas, e os volumes podem ser orgânicos e não-poliedrais, multicoloridos e de textura heterogênea. Isso pode ser verificado por estudos que apresentam fortes relações da estrutura do origami com a natureza (KOBAYASHI; KRESLING; VINCENT, 1998; MAHADEVAN; RICA, 2005; STEWART, 2007).

A **proporção** no origami e no *kirigami* estabelece as devidas relações entre os vários elementos estruturais que os compõem os quais, se bem trabalhados, proporcionam maior unidade, conforto e funcionalidade do modelo. Se não for respeitada a proporção, corre-se o sério risco de surgirem imprevistos, e as várias partes do conjunto da obra não se encaixarem devidamente. Esse aspecto reforça a necessidade de planejamento e estudo para prever a aparência final do modelo e tomar decisões precisas e estratégicas para a construção do mesmo.

Todos os modelos de origami e de *kirigami* são executados por meio de **movimentos** que manipulam os elementos definidores bidimensionais da estrutura (pontos, linhas, formas), mas nem todos possuem movimento ao serem finalizados. Assim, existem modelos planos e espaciais que podem ser estáticos, imutáveis e extremamente rígidos, e outros modelos dinâmicos, manipuláveis e transformáveis.

Segundo Wong (2001), os elementos conceituais do desenho bidimensional e tridimensional são **ponto, linha, plano e volume**. Como são conceituais, eles não existem, são apenas percebidos e sentidos. Quando eles passam a existir, não são mais conceituais, passando a ser uma forma, com elementos visuais definidores de **formato, tamanho, cor e textura**. As relações e a localização dos elementos visuais são regidos pelos elementos relacionais, **direção, posição, espaço e gravidade**, que são percebidos ou sentidos pelos observadores. Enfim, todos eles estão presentes desde o momento da concepção mental do desenho até a sua forma física acabada. E definindo as formas volumétricas, estão os

elementos construtivos (**vértice, aresta e face**) que possuem qualidades estruturais fortes e são importantes na compreensão dos sólidos.

Em relação à constituição da forma, Lobach (2001) definiu a **ordem** e a **complexidade** como importantes fatores, pois um está extremamente ligado ao outro durante a sua compreensão visual. Quando o nível da ordem é muito alto, o da complexidade é baixo, assim como alta complexidade oferece pouca ordem. Isso porque a ordem estabelece a sensação de segurança visual e rápida compreensão, por meio do baixo esforço perceptivo. No entanto, ordenamento excessivo não é capaz de manter a atenção por muito tempo pois é pobre em informação. Já a complexidade se constitui de um grande número de elementos e informações, que fazem aumentar o tempo de observação e conseqüentemente requerem um esforço para ser compreendido, que pode cansar o observador e fazê-lo desistir.

O ideal para que a forma seja compreendida sem cansar e nem entediar, é equilibrar o nível de ordem e complexidade aplicando alguns princípios, como: **sistema horizontal-vertical, simetria, uniformidade e ritmo**. Todos esses princípios são confortáveis ao ser humano pois são relacionados à natureza (ciclo do dia, das estações e das marés) e ao próprio Homem (a respiração e os batimentos cardíacos ritmados). A "quebra" desses princípios transforma algo estático em dinâmico, o harmônico em contrastante.

Esses princípios estão presentes e são bem manipulados nas estruturas em origami e *kirigami*, evidenciando uma harmonia entre ordem e complexidade. Quando se parte de uma forma para uma estrutura, é preciso uma organização espacial total, que, embora dê uma aparência externa bastante complexa, seja na sua essência uma estrutura relativamente simples. E para isso, é possível manipular as unidades de forma através da simetria¹¹, evidenciada especialmente pela repetição ou gradação da forma.

Analisando todos os elementos do origami e do *kirigami* e a sua organização compositiva através dos princípios da forma, Yigit (2004) propôs seis conceitos básicos do design *orikiri*: **unidade, totalidade, simplicidade, abstração, flexibilidade e modularidade**.

¹¹ Existem cinco casos de simetria: 1) **Identidade**: sobreposição da forma sobre ela mesma ou através da rotação em 360 ° sobre seu eixo; 2) **Translação**: repetição e deslocamento da forma ao longo de uma linha através de um ritmo estabelecido; 3) **Rotação**: giro de uma forma em torno de um eixo, bidimensional ou tridimensionalmente, considerando que todos os seus pontos percorrerão um ângulo de medida constante no mesmo sentido a partir de um ponto fixo; 4) **Reflexão especular**: simetria bilateral, ou axial, determinada por um eixo que serve de referência para a imagem refletida da figura original; 5) **Dilatação**: ampliação ou redução da forma mantendo-se suas proporções. Os quatro primeiros são considerados de isometria, ou seja, caracterizam-se pela transformação congruente, mantendo as formas e medidas inalteradas. Já a dilatação é considerada uma homotetia, um processo de redução ou ampliação da figura a partir de um ponto fixo e de uma razão estabelecida (cujo símbolo é k). As figuras homotéticas são ao mesmo tempo semelhantes e possuem lados homólogos paralelos entre si.

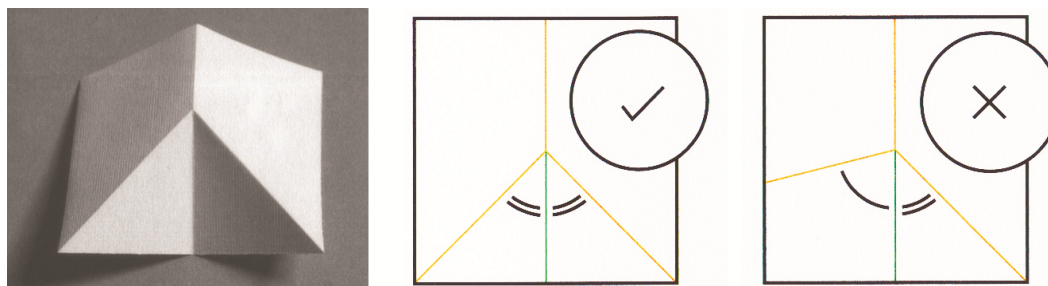
A unidade, contrária à fragmentação, é o equilíbrio de elementos diversos constituindo um todo, de uma maneira harmônica, coesa e íntegra. Essa unidade leva à totalidade, qualidade de algo completo, finalizado. A simplicidade é a ausência de complexidade excessiva e ornamentação. O que é simples apresenta ordem e uniformidade, muitas vezes denotando a difícil simplificação de uma tarefa ou desafio. Apresenta clareza de função, racionalização de material e produção. A abstração se distancia da representação em busca da essência da forma, sendo transmitida mais pelas sensações do que pela expressão explícita. Ela é atingida pelo emprego de ordenamento simples, formas primárias, geometria e leveza, qualidades que levam à flexibilidade, capacidade de adaptação e transformação através da maleabilidade de se curvar e dobrar. E por fim, a modularidade, que se origina da observação da natureza, cuja unidade modular básica se repete a fim de criar elegantes padrões de vida, ou seja, elementos simples e básicos gerando formas complexas.

Após compreender os elementos, conceitos e princípios que regem o design *orikiri*, é preciso conhecer as técnicas de dobra e de corte utilizados como estratégias para a criação de novos modelos. Afinal, o objetivo do conhecimento profundo do origami e do *kirigami* não se restringe mais à reprodução do que já se tem, mas elaborar desenhos originais e autorais, de acordo com as necessidades do designer. Assim, as possibilidades de combinações são infinitas e o processo de construção do novo modelo pode ser bem sucedido se forem levados em consideração os aspectos levantados a seguir.

2.3.2. Flat foldability

Nem todos os modelos de origami e *kirigami* são iguais. Além das características estruturais que os diferem, o movimento é um elemento importante para a distinção entre eles. Alguns modelos possuem a característica denominada *flat foldability*, ou seja, a habilidade de dobrar cada um dos planos poligonais entre si até ficarem completamente achatados. O modo mais simples de garantir essa condição de um modelo é desenhar as linhas de dobra formando uma perfeita simetria. Porém, se não ocorrer isso, como no caso de dobras assimétricas, o modelo poderá ser dobrado mas a habilidade de achatamento irá desaparecer (figura 48).

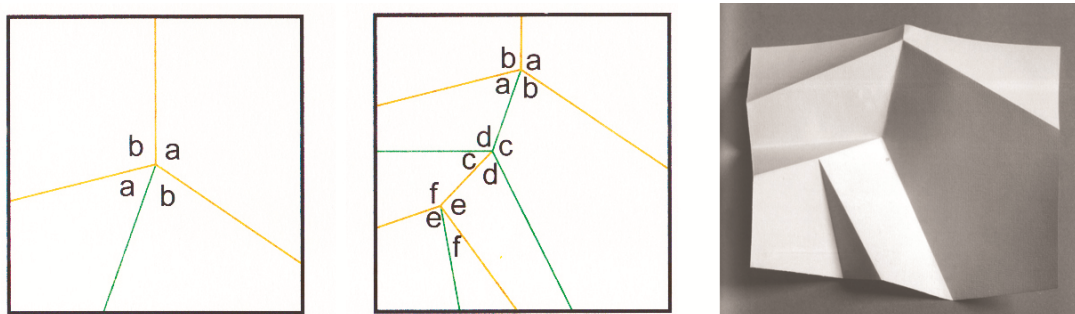
Figura 48 - Dobra simétrica *flat foldable* (foto e padrão de dobra à esquerda) e uma variação sem achatamento total (à direita)



Fonte: JACKSON (2011)

Porém, se o objetivo for trabalhar a assimetria e a habilidade de achatamento juntas, em mais de um vértice, Toshikazu Kawazaki, um importante estudioso do origami, estabeleceu dois critérios que possibilitam essa bem sucedida coexistência. O Teorema de Kawazaki afirma que, tomando como referência o vértice por onde partem as dobras, se a soma de seus ângulos opostos for de 180° , então a dobra permitirá que as faces se fechem perfeitamente entre elas até ocorrer o nivelamento total. Além dessa condição, é preciso que haja um número par de ângulos em volta do ponto de dobra central (quatro, seis, oito etc.) para preservar a característica de *flat foldability* (figura 49).

Figura 49 - Esquema de quebra da simetria sem perder a habilidade de achatamento: $a+a=b+b=c+c=d+d=180^\circ$



Fonte: Jackson (2011)

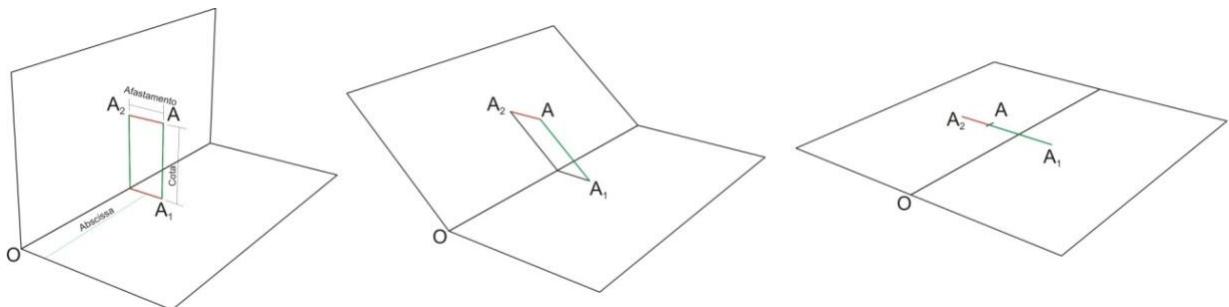
No caso do *kirigami*, se ele for originário de um corte ou dobra simétrico em relação a uma linha de dobra central, a capacidade de achatamento estará presente. Mas se forem trabalhados cortes e dobras assimétricos em relação a essa linha, é necessária uma atenção especial na determinação da localização das mesmas.

Para os modelos de *kirigami* 3D da modalidade 90° , Ueno (2011) propôs um método simples para determinar a localização dos cortes e dobras assimétricos pela comparação com o sistema mongeano. Quando o modelo de 90° está aberto, pode-se comparar a localização de um vértice de uma face da estrutura com as coordenadas do primeiro diedro do sistema ortogonal paralelo estabelecido por Gaspard Monge:

- Abscissa: distância de um ponto ao Plano de Origem das Abscissas;
- Cota: distância do ponto em relação ao plano horizontal de projeção;
- Afastamento: distância do ponto em relação ao plano vertical de projeção.

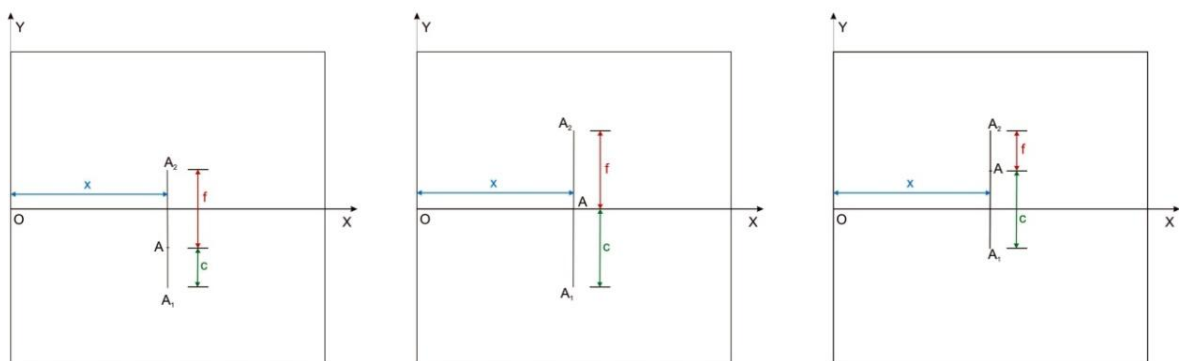
Com o movimento de abertura em 180° , percebe-se que a localização do ponto A irá depender das distâncias relativas ao afastamento e à cota (figura 50). Se forem iguais, o ponto A estará bem na linha central; se forem diferentes, eles podem se localizar abaixo ou acima da linha central “o” (figura 51).

Figura 50 - Correspondências do ponto A a 90° e na abertura a 180°



Fonte: Ueno (2011)

Figura 51 - Localização do ponto A e as diferentes relações entre cota (c) e afastamento (f)

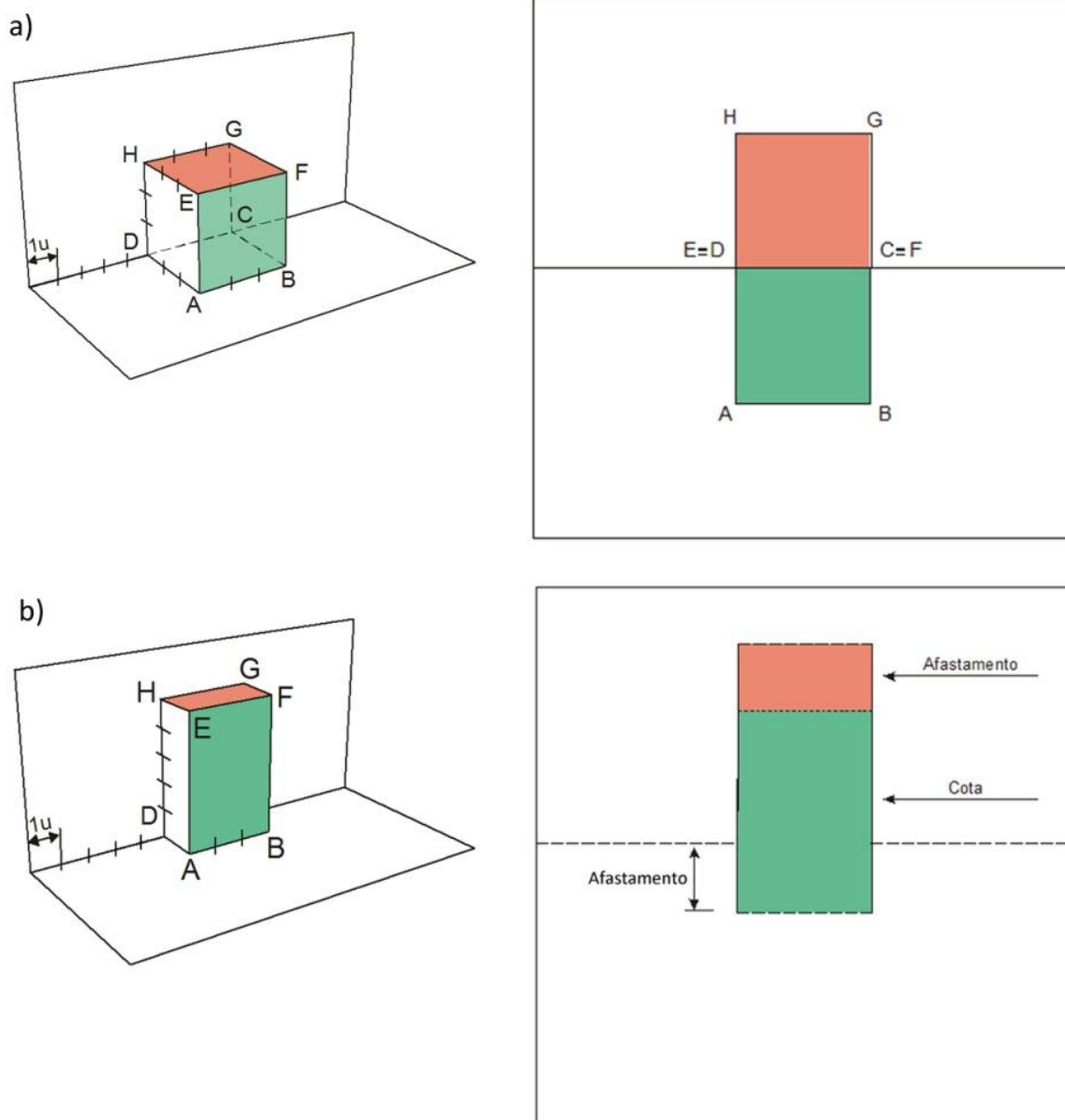


Fonte: Ueno (2011)

Traçando-se linhas horizontais a partir dos pontos A, A_1 e A_2 , tem-se então as linhas de dobra, que podem ser montanha ou vale. Se as medidas do afastamento e da cota forem iguais, a simetria do modelo será preservada assim como sua capacidade de achatamento.

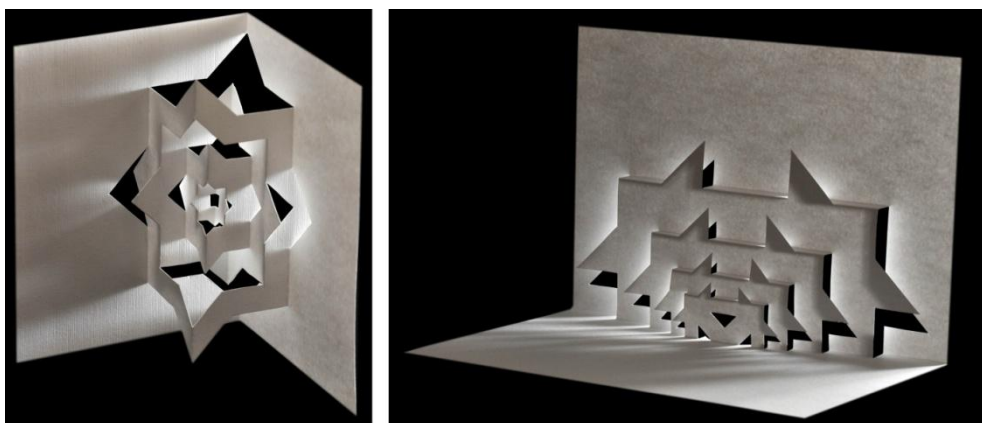
Porém, se elas forem diferentes, é necessário que a linha de dobra mais inferior esteja à mesma distância do afastamento da estrutura em relação à dobra central (figura 52).

Figura 52 – Determinação das linhas de dobra e corte em estruturas simétricas (a) e assimétricas (b)



Fonte: Elaborada pela autora

Seguindo essa estratégia, é possível desenhar modelos *flat foldable*, simétricos e assimétricos, simples e complexos, utilizando dobras e cortes horizontais, verticais ou diagonais (figura 53).

Figura 53 - Modelos *flat foldable*

Fonte: Elaborada pela autora

Para garantir a capacidade de achatamento dos modelos de *kirigami* 3D em 180° e 360°, basicamente basta seguir a simetria da estrutura pela linha de dobra central do modelo. Outras técnicas mais particulares serão tratadas nas próximas subseções.

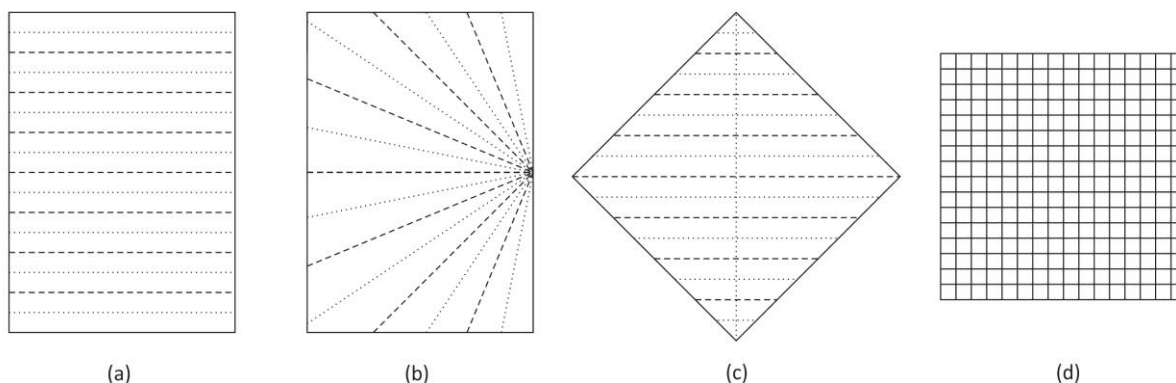
2.3.3. Técnicas básicas de dobra

Segundo Jackson (2011), tomar em mãos um material bidimensional e transformá-lo por meio de dobras (curvaturas, torcidas, drapeadas etc.) é uma das atividades mais comuns do processo de criação do designer. Assim, o ato de dobrar é um importante tópico a ser organizado metodologicamente para servir a esse profissional. A técnica de dobrar é relativamente simples, facilmente transferível, exigindo a prática para potencializar as habilidades manuais. É divertido, envolve as pessoas em uma atividade manual, é rápido e estimula o engajamento. Não é um treinamento de passos pré-determinados, mas uma técnica que pode ser explorada na experimentação, no erro, no acerto e na criação efetiva.

Assim, Jackson (2011) recomendou que todos os designers iniciantes na técnica de dobrar, comecem conhecendo e explorando os conceitos básicos da dobra e de suas variações. O básico é aquilo que é essencial e constante em qualquer trabalho com dobra. São muito úteis e altamente adaptáveis, porque são genéricos e, portanto, podem ser modificados em um número infinito de modos. Por outro lado, aqueles que são mais específicos, são menos adaptáveis. Assim, os conceitos básicos fornecem maior potencial criativo. São eles: técnicas de divisão do papel com dobras; repetições simétricas; alongamento e inclinação; e uso de outros polígonos. Dividir o papel em comprimentos ou ângulos iguais permite a construção de muitas outras técnicas. Embora possa-se utilizar

programas computacionais de desenho vetorial para isso, o autor priorizou em suas explicações o jeito manual de executá-los. Além disso, uma estratégia muito importante para potencializar ainda mais as possibilidades de combinações são as variações desse tipo de divisão: linear, rotacional, diagonal e formando um *grid* ou grade (figura 54).

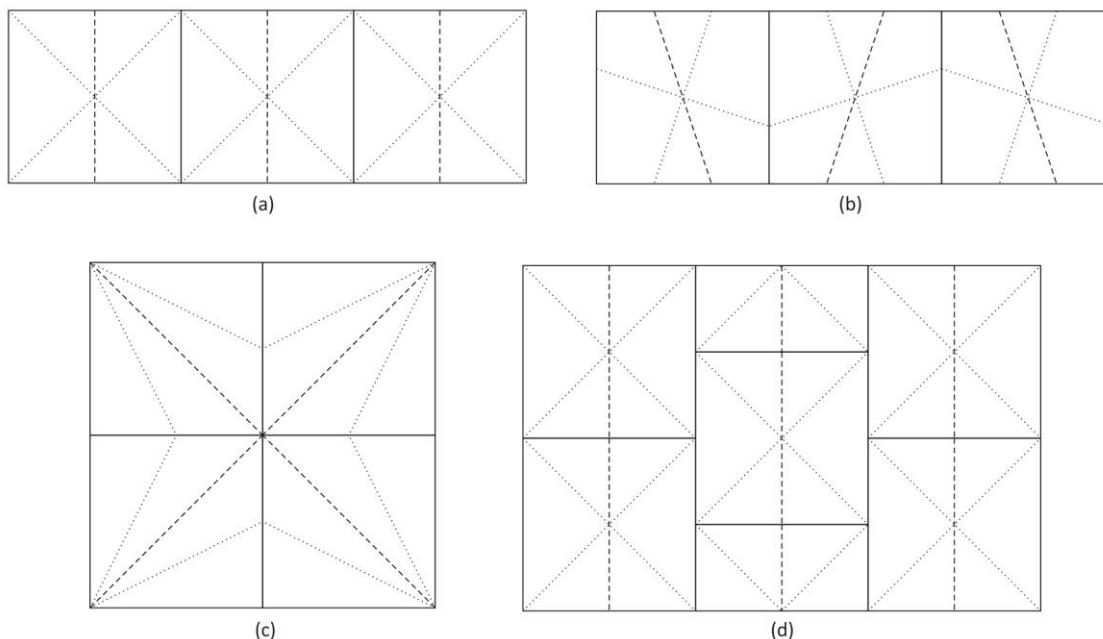
Figura 54 - Técnicas de divisão do papel: a) linear; b) rotacional; c) diagonal, d) *grid*



Fonte: Elaborada pela autora, baseada em Jackson (2011)

As repetições simétricas básicas de um determinado desenho de origem criam padrões variados de dobra cujos resultados podem ser inesperados (figura 55). A translação é a repetição exata do desenho em uma direção. Na reflexão, o desenho se repete em uma direção mas simetricamente ao anterior, fato que permite padrões de dobra mais complexos. Quando se aplica a rotação de um desenho, a repetição se desloca não mais linearmente, como nos dois casos anteriores, mas em volta de um ponto em comum. Já com a combinação de reflexão com translação é possível criar muitos padrões de dobra extremamente complexos. Além disso, esse tipo não se limita ao deslocamento do desenho em linha reta, mas em diferentes direções. Combinando-se uma grande quantidade do mesmo desenho cria-se um efeito transformável do papel.

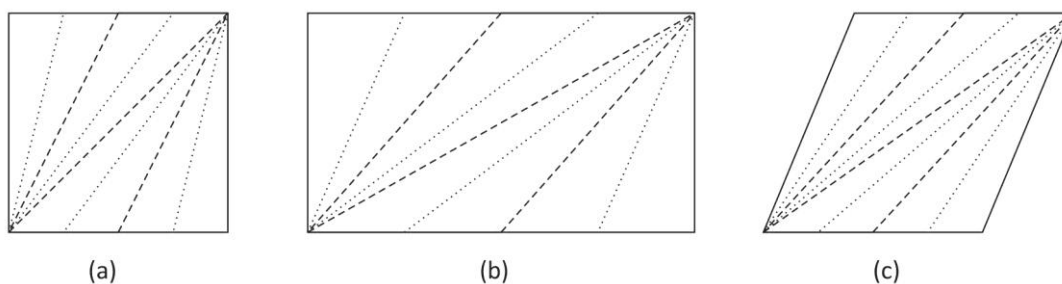
Figura 55 - Repetições simétricas: a) translação; b) reflexão; c) rotação; d) reflexão com translação



Fonte: Elaborada pela autora, baseada em Jackson (2011)

Alongar e inclinar um desenho de origem permitem a criação de variações, aumentando ainda mais as possibilidades de inspirações (figura 56). Os modelos mais tradicionais de origami iniciam sempre com um papel no formato quadrado, mas uma simples mudança do formato inicial básico do papel (em retângulo, por exemplo), o padrão de dobra pode se transformar diferentemente.

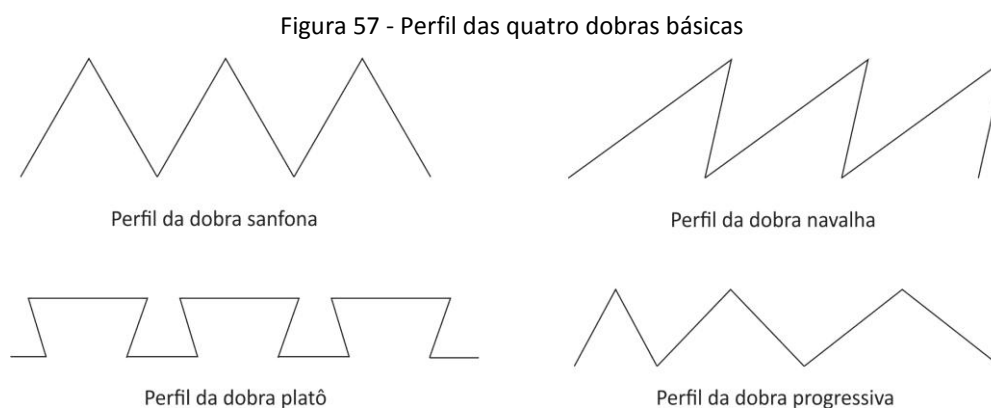
Figura 56 - Exemplos: a) desenho de origem; b) alongamento; c) inclinação



Fonte: Elaborada pela autora, baseada em Jackson (2011)

O uso de outros polígonos que não sejam os quadriláteros comuns em 90° (quadrado e retângulo), pode ser uma experiência ao mesmo tempo desorientadora e libertadora. Alguns resultados podem não agradar, mas pode acontecer de algum deles ser bem interessante e original.

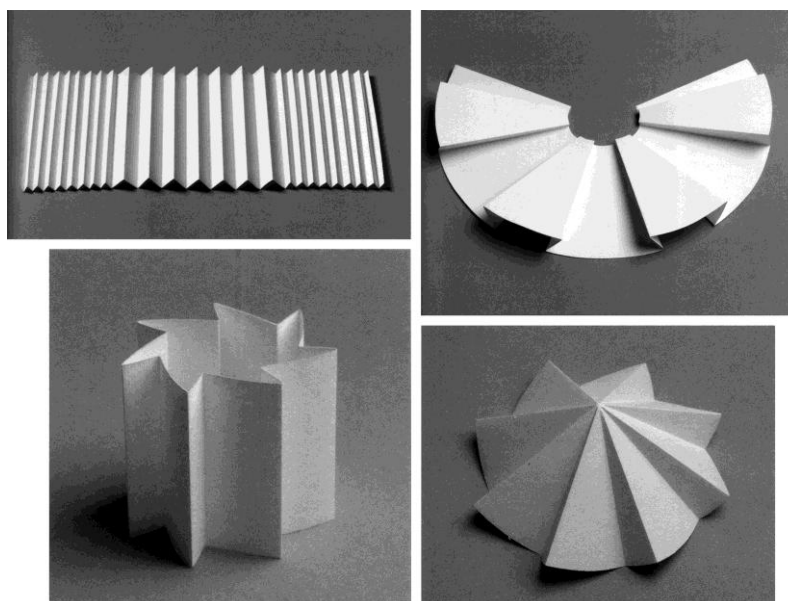
Após essa introdução desses conceitos básicos, Jackson (2011) elencou quatro dobras básicas assim consideradas por serem as mais comuns, versáteis e fáceis de usar, cujo conhecimento pode ser usado para criar uma grande diversidade de superfícies e formas sofisticadas. São elas: dobra sanfona, dobra navalha, dobra platô e dobras progressivas (figura 57).



Fonte: elaborada pela autora

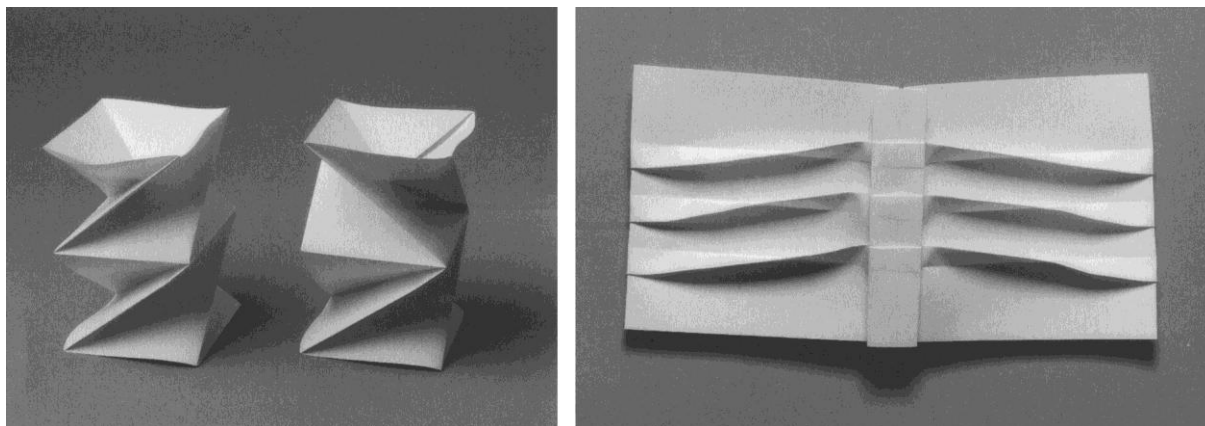
Cada uma delas pode ser variada por meio de técnicas de organização linear, rotacional e para formar superfícies cilíndricas e cônicas (figura 58). Uma outra maneira de combiná-las é fazer caixas espiraladas ou torcer as dobras, como os drapeados em tecidos (figura 59).

Figura 58 - Variações das dobras básicas (sentido horário): linear, rotacional, cônica e cilíndrica



Fonte: Jackson (2011)

Figura 59 - Variação de caixas espiraladas e dobras torcidas



Fonte: Jackson (2011)

Entre outras dobras, Jackson (2011) dedicou especial atenção àquelas que trazem um potencial dinâmico ao modelo finalizado, denominadas como Dobra-V e Arcos e Parábolas Dobráveis. A primeira transforma superfícies que se expandem e contraem, curvam e torcem em muitas direções por meio de um conjunto de dobras que forma um ou mais "Vs"; e não tem forma fixa, permitindo o movimento em variadas direções, dependendo da localização das dobras (figura 60).

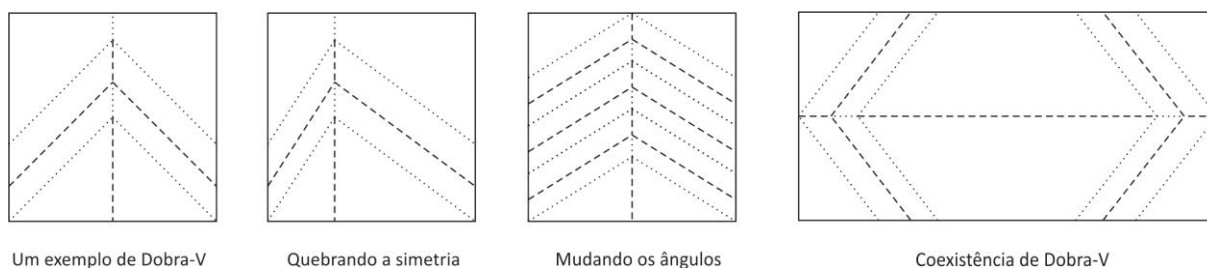
Figura 60 - Dobra-V e sua capacidade de achatamento



Fonte: Jackson (2011)

Pode-se variar a Dobra-V de várias maneiras: movendo a linha de simetria, mudando o ângulo das dobras, quebrando a simetria (veja o Teorema de Kawazaki) ou através da coexistência de várias Dobras-V (figura 61).

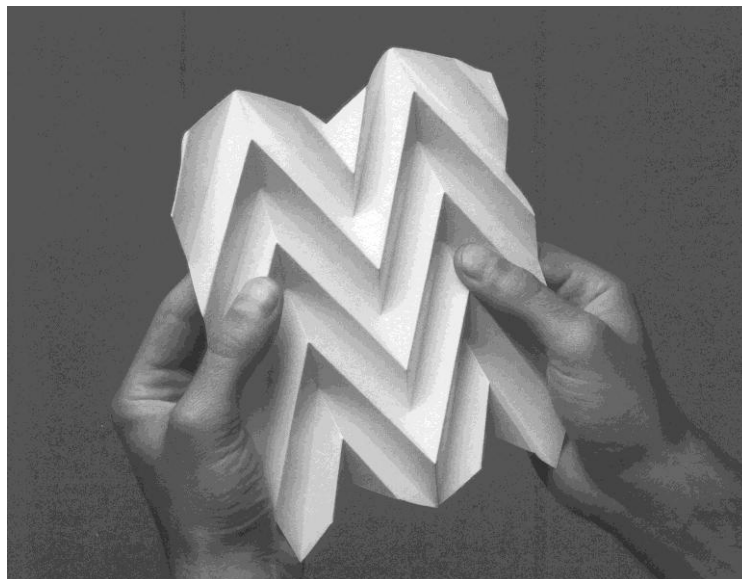
Figura 61 - Variações da Dobra-V



Fonte: Elaborada pela autora

Pode-se também ter múltiplas Dobra-V, ou seja, conectar a repetição da mesma Dobra-V em uma nova linha de simetria reta, radial ou aleatoriamente, resultando em múltiplos "Ms" e "Ws" (figura 62). O Miura-Ori é o exemplo mais famosos de um múltiplo V, cuja superfície do papel se transforma em um parabolóide extremamente flexível. A variação desse tipo de padrão também é possível, mas exige maior precisão nas dobras e atenção nas variações.

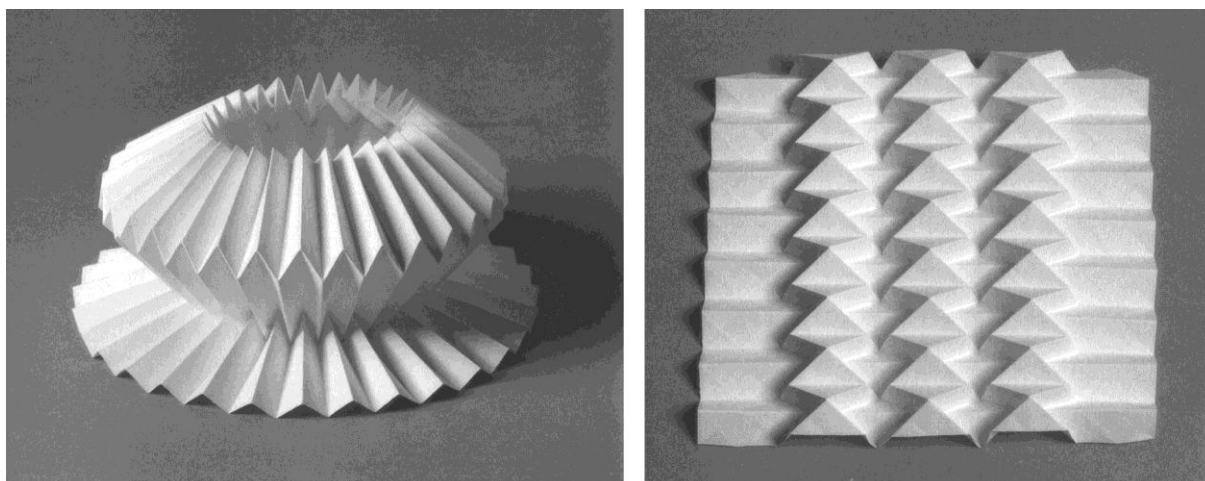
Figura 62 - Múltiplos Vs



Fonte: Jackson (2011)

Essa capacidade flexível da Dobra-V pode ser explorada a fim de criar formatos cilíndricos ou ainda superfícies complexas, trabalhando com *grids* (grade) de 45° ou 60° , criando o origami *tesselation* (figura 63).

Figura 63 - Variações da Dobra-V

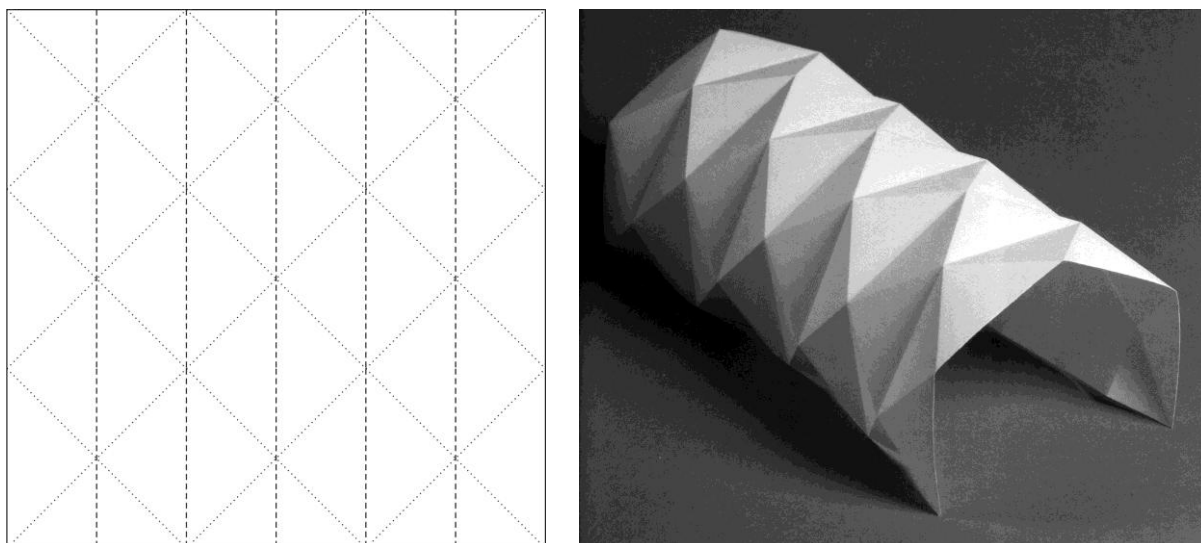


Fonte: Jackson (2011)

Finalizando as técnicas de dobra básicas, Jackson (2011) apresentou maneiras de o papel se transformar em parábolas e arcos que são uma progressão de formas poligonais dobradas em ângulos, parecendo tendas que tocam o chão ao longo de uma aresta ou de um vértice. É claro que essas curvas (parábolas e arcos) são ilusórias, já que se está tratando de dobras retas e as formas entre elas são planas. Embora sejam formadas por uma camada apenas de material (neste caso o papel), a curvatura, proporcionada por essas dobras, as atribui grande resistência mecânica e estabilidade. A presença de triângulos múltiplos cercados por dobras incrementa a resistência mecânica da estrutura, principalmente porque essa forma geométrica é comprovadamente a mais forte e estável dentre todos os polígonos. Intrigantemente, embora a superfície seja tomada totalmente por essa forma geométrica, muitas dessas estruturas podem ser fechadas em uma estreita faixa.

Os Arcos Dobráveis podem ser obtidos por meio de um padrão repetitivo de dobras que lembram um "X". Essa combinação de linhas forma vários triângulos, que podem ser modificados em equiláteros ou isósceles (figura 64). O padrão Yoshimura é o exemplo mais clássico desse tipo de Arco.

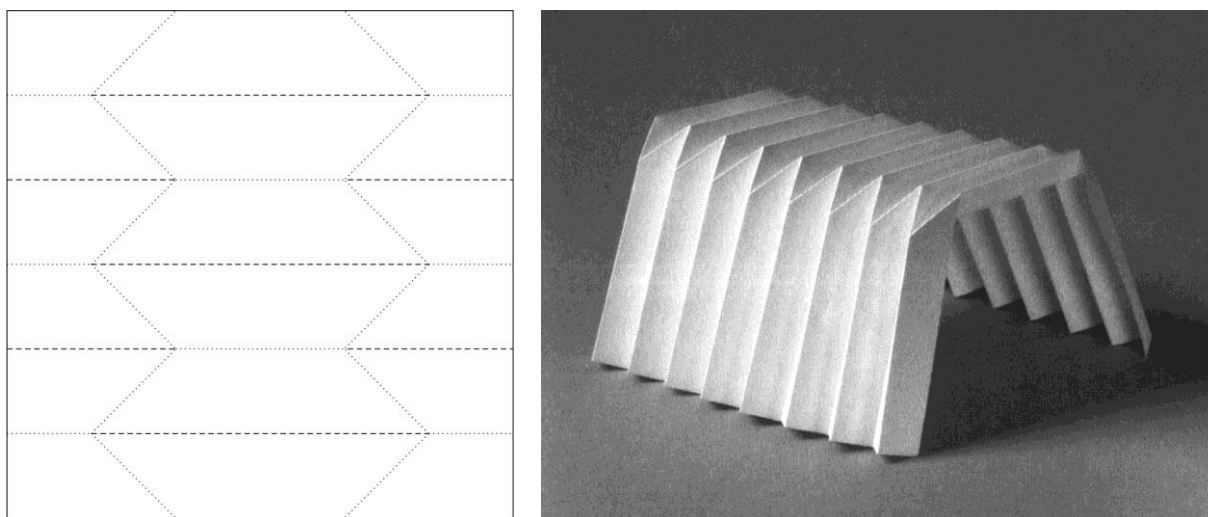
Figura 64 - Arco Dobrável a partir da Forma-X. Padrão Yoshimura



Fonte: Padrão de dobra elaborado pela autora com base em Jackson (2011); Foto: Jackson (2011)

Quando os Arcos Dobráveis são obtidos com a Dobra-V, as estruturas obtidas são mais semelhantes ao tipo caixa do que as com Dobra-X (figura 65).

Figura 65 - Arco Dobrável a partir da Dobra-V

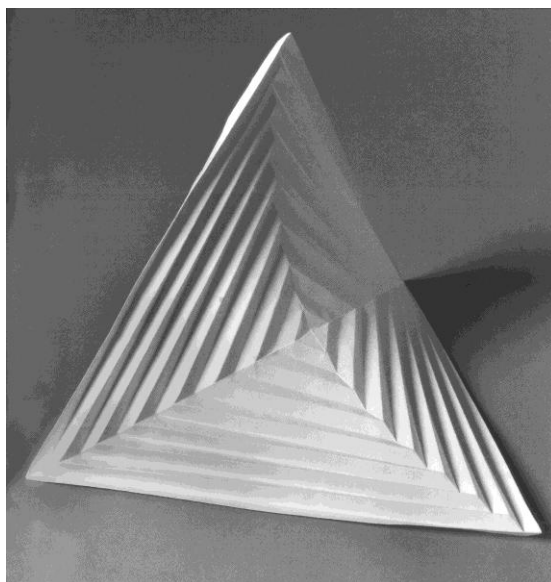


Fonte: Padrão de dobra elaborada pela autora com base em Jackson (2011); Foto: Jackson (2011)

Enquanto a maioria dos arcos dobrados são "curvas simples" que se curvam em uma única direção, como um cilindro, uma parábola dobrada é uma "curva complexa" que se curva em duas direções, como uma esfera. Assemelha-se mais a um parabolóide hiperbólico e seu resultado impressiona tanto visual quanto perceptivamente (figura 66). Apesar de ser um desafio dobrá-lo com paciência e precisão, ele funciona muito bem quando bem

finalizado em papel. Mas deve-se ressaltar que ainda fica a dúvida se tal tipo de estrutura funcionaria com outro tipo de material que fosse mais rígido, como seria o caso do BLaC.

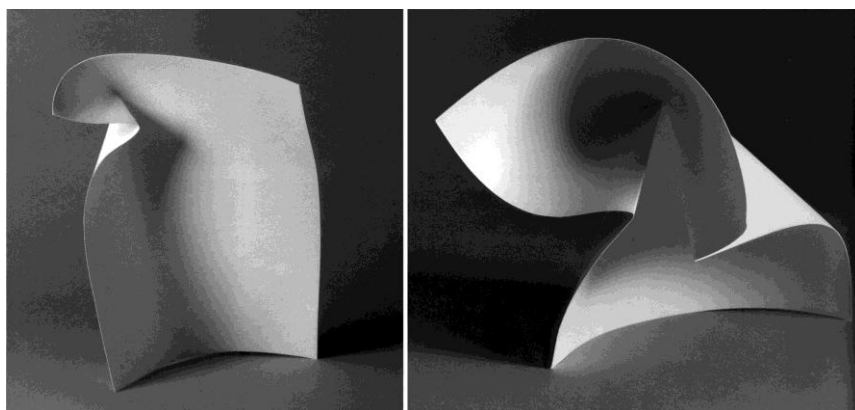
Figura 66 - Parabolóide hiperbólico dobrado



Fonte: Jackson (2011)

E, por fim, Jackson (2011) apresentou modelos com apenas um vinco ou ainda sem vinco algum, contradizendo qualquer conceito básico do origami (figura 67). São estruturas que mexem com a imaginação e apresentam uma plasticidade ainda não muito explorada. Os sem vinco utilizam a estratégia de "quebra" de direção da folha, criando curvas côncavas e convexas. Aplicando apenas um vinco do tipo montanha, também é possível realizar novas experimentações "quebrando" a direção em um ponto ao longo dessa linha.

Figura 67 - Modelos sem vinco e com apenas um vinco



Fonte: Jackson (2011)

2.3.4. Técnicas básicas de corte e dobra

Enquanto o origami necessita basicamente de papel e da habilidade das mãos para sua execução, o *kirigami* requer também outros materiais básicos, como lápis, borracha, régua, placa de corte e estilete ou tesoura. Além disso, os modelos de *kirigami* nunca serão feitos somente com cortes, precisando elaborá-los em conjunto com dobras vale e montanha estrategicamente determinados. Por isso, nessa seção serão tratadas algumas técnicas de corte e dobra para a criação de novos modelos.

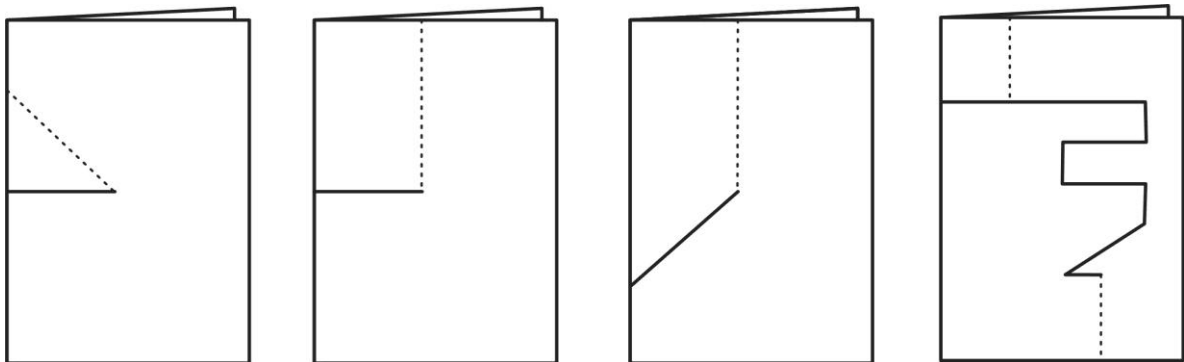
Para fins de convenção simbólica, Chatani (1983) empregou em todos seus livros a linha tracejada para significar dobra vale, a pontilhada para dobra montanha e a linha contínua para o corte. Por essa razão, antes do designer iniciar cada trabalho, é importante adotar essa convenção ou estabelecer seu próprio critério visual para a correta diferenciação entre elas.

Basicamente, os modelos de *kirigami* podem partir de apenas uma única peça (uma folha de papel) ou através da junção de múltiplas peças (várias folhas de papel). Os modelos que partem de apenas uma peça são os da modalidade 90° e 0° , e os que necessitam de mais peças são da modalidade 180° e 360° e o modo de planejar os cortes e as dobras é específico para cada um desses casos.

Nas publicações de Chatani, em que ele apresenta muitos moldes prontos para serem executados, pouco se trata das técnicas de criação de novos modelos. Mas algumas técnicas de corte para a criação de novos modelos em peça única ou múltiplas foram sugeridas por Jackson (1993), que inclusive as enfatizou na criação de cartões comemorativos e livros *pop-up*. Por essa razão, foram selecionadas somente as técnicas básicas e fundamentais para a compreensão da geometria envolvida na determinação dos cortes e das dobras e que podem ser melhor exploradas pelos designers de produto.

Para iniciar os modelos construídos a partir de uma peça, a técnica básica é fazer um único Corte Contínuo (reto ou curvo) e realizar experimentações através da variação do ângulo da dobra e/ou do corte, seguido por formatos mais complexos. Nos casos mostrados na figura 68, o resultado sempre será uma estrutura baseada na simetria de reflexão, que garante sua capacidade de achatamento.

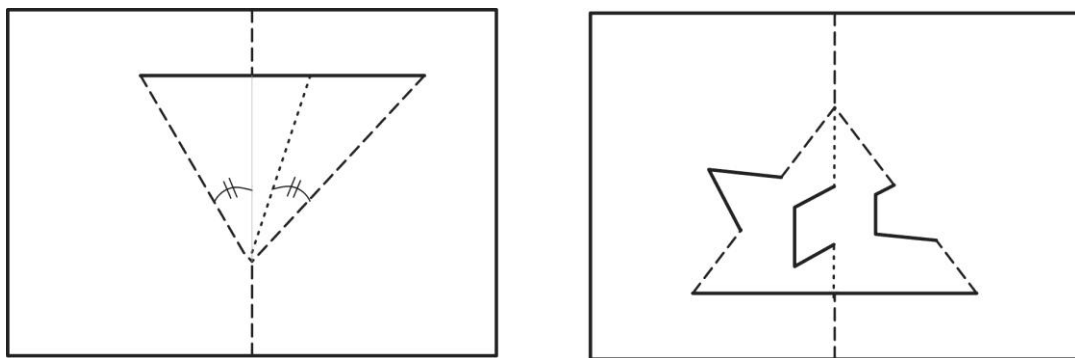
Figura 68 - Corte único e variações no ângulo da dobra, no ângulo do corte e no formato do corte



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

Após o domínio dessa exploração, a estratégia é trabalhar com a assimetria do desenho em relação à dobra central da folha que a origina. Para garantir o *flat foldability*, é importante levar em consideração que o menor ângulo formado entre a dobra vale e a central deve ser o mesmo do ângulo formado entre a outra dobra vale e a dobra montanha (figura 69). Tanto nas estruturas simétricas e assimétricas podem ser explorados outros cortes e desvios que não interferem no seu fechamento correto e que ajudam na variação de seu formato, gerando resultados inesperados.

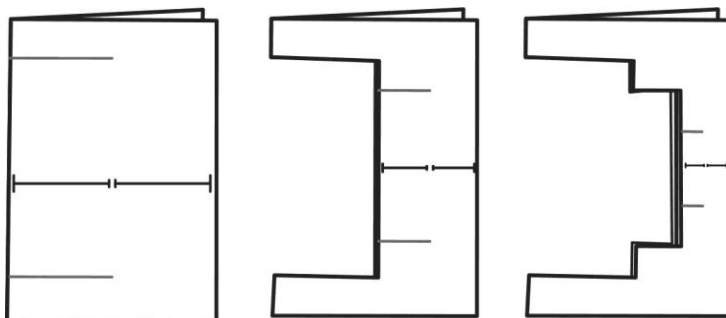
Figura 69 - Variações de corte assimétrico e desvios no formato do desenho



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

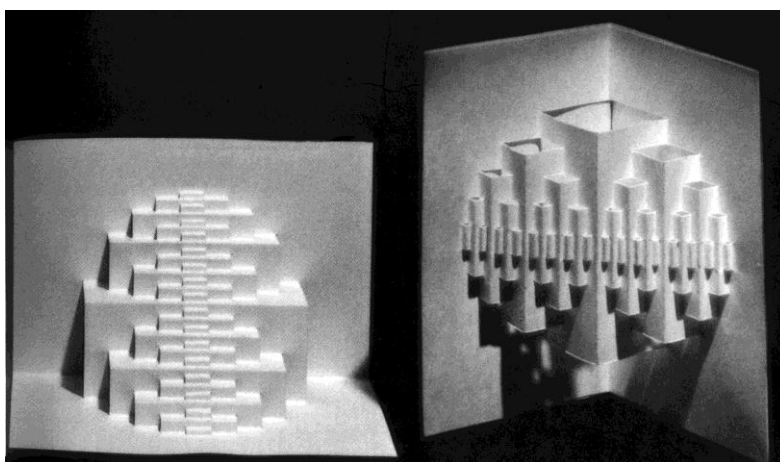
Os chamados Cortes Duplos podem ser paralelos entre si ou não, e podem também sofrer variações de ângulos dos cortes e das dobras, assimetria e desvios. Mas as experiências com resultados mais interessantes estruturalmente, são as que criam gerações de cortes e dobras (figuras 70 e 71).

Figura 70 - Gerações de cortes duplos paralelos



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

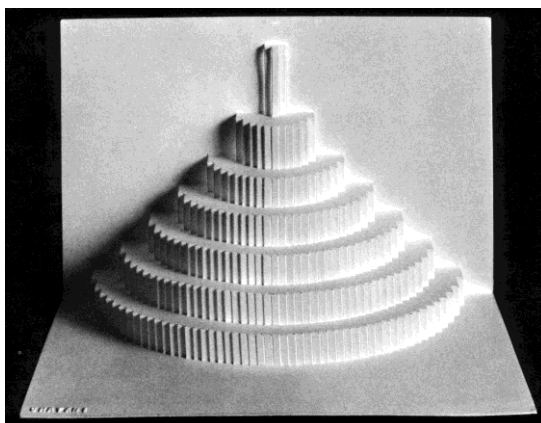
Figura 71 - "*Mayan Pyramid*". Exemplo da Técnica da Geração de Cortes



Fonte: Chatani (1993)

A Técnica de Múltiplos Cortes é a que apresenta maior potencial na criação de estruturas abstratas rítmicas, pois os cortes e as dobras possibilitam um conjunto harmonioso de formas que criam efeitos de luz e sombra, fechamento e abertura, simplicidade e totalidade (figura 72).

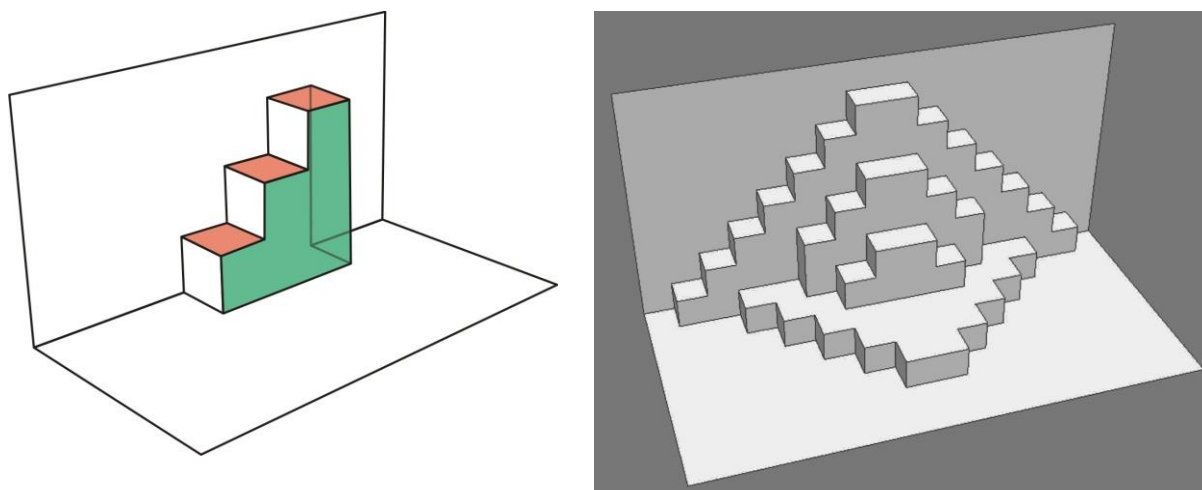
Figura 72 - "*Wedding Palace*". Exemplo da Técnica dos Múltiplos Cortes



Fonte: Chatani (1993)

Segundo Jackson (1993), a Técnica do Degrau é provavelmente a mais fascinante e viciante das técnicas de corte em uma peça. Partindo do modelo mais simples para as combinações de diferentes direções e quantidade de degraus, os resultados podem criar verdadeiras esculturas (figura 73).

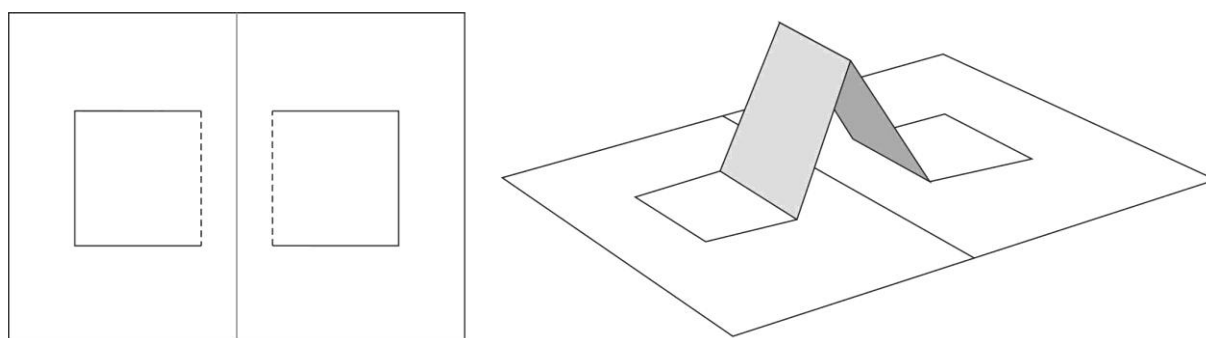
Figura 73 - Modelo básico da Técnica do Degrau (esquerda) e uma variação (direita)



Fonte: Elaborado pela autora

A Técnica das Asas é a mais básica para a criação de estruturas da modalidade 180° (figura 74). Embora os exemplos a seguir sejam figurativos e voltados a produtos gráficos, esse conceito poderia ser explorado também pelo designer de produto.

Figura 74 - Técnica das Asas: modelo básico



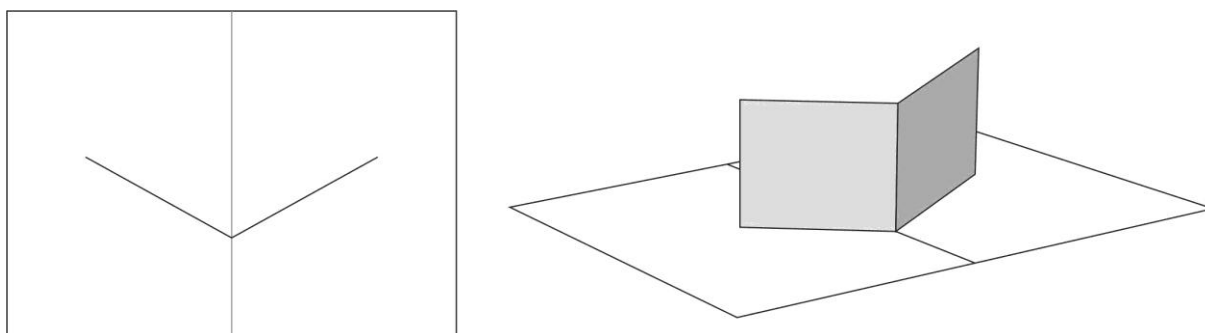
Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

Chatani (1983) lembrou ainda que pode-se construir modelos de 180° por meio da junção de dois modelos de 90° . Assim, todas essas técnicas básicas podem ser potencializadas se forem planejadas no sentido de criar modelos mais avançados de 90° . Ou

ainda, seguindo por esse mesmo raciocínio, pode-se criar também modelos de 270° e 360° , conforme pode ser observado em algumas obras de Siliakus (vide figura 32).

Para os modelos construídos a partir de múltiplas peças, a técnica mais básica é a do V-Horizontal, que aplica o conceito da simetria para garantir a capacidade de achatamento dos modelos 180° (figura 75).

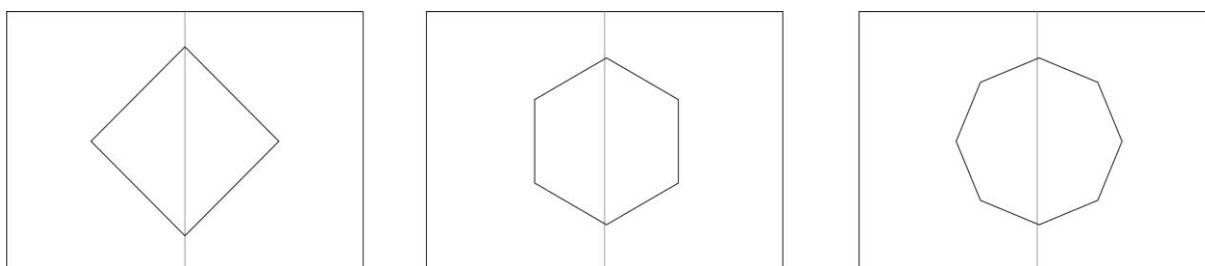
Figura 75 - Técnica V-Horizontal



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

A próxima é chamada de Caixa Diagonal pois consiste basicamente em um quadrado cuja diagonal coincide com a linha de dobra central (figura 76). Em termos técnicos, é uma variação do V-Horizontal. Muitos trabalhos de Chatani aplicam essa técnica, variando o formato da base em outros polígonos, cujo número de lados sempre será par, e construindo diferentes poliedros, como prismas e pirâmides.

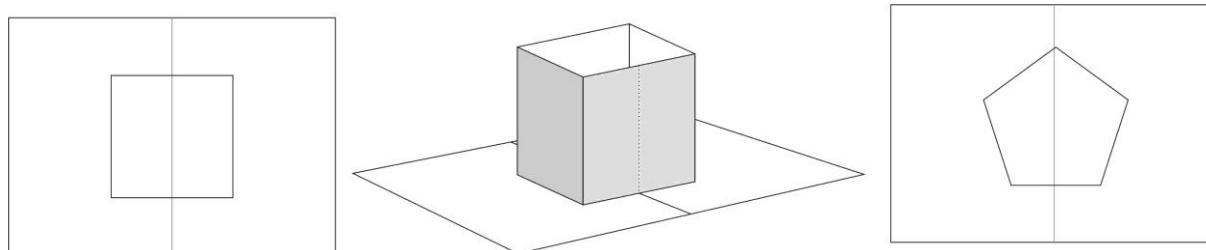
Figura 76 - Técnica Caixa Diagonal e variações com outros polígonos



Fonte: Elaborado pela autora baseada em Jackson (1993)

Alterando a posição da Caixa Diagonal em Caixa Paralela, o quadrado roda 45° e se posiciona de maneira que necessite de mais duas dobras na sua lateral para que se achate durante o fechamento (figura 77). Esse tipo de estratégia também permite que sejam aplicados na base os polígonos de lado ímpar.

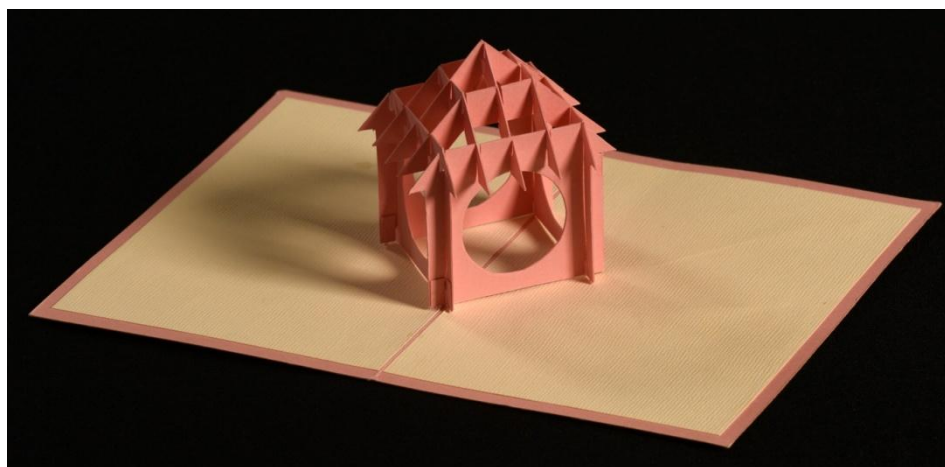
Figura 77 - Técnica da Caixa Paralela



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

E por fim, a técnica denominada "Treliza" (JACKSON, 1993) é composta por muitas fatias de papel que se encaixam com um certo grau de liberdade para que se achatem simultaneamente durante o fechamento. Essa técnica é altamente adaptável e é muito utilizada por Chatani na construção de formas esculturais que se sustentam em pé (figura 78). No entanto, é necessário garantir que as fatias de papel estejam entrelaçadas no ângulo de 90° entre si, a fim de garantir a capacidade de achatamento da estrutura. Depois das fatias compostas formarem uma caixa, esta pode ser adaptada na Técnica da Caixa Diagonal.

Figura 78 - Exemplo da Técnica da Treliza



Fonte: Modelo de Chatani e Nakazawa (1994); Execução: Thaís R. Ueno Yamada; Foto: Ricardo K. Yamada

2.3.5. Uma classificação para o design orikiri

Existem inúmeros tipos de origami e classificações que levam em conta o grau de dificuldade, a origem, os estilos, e ainda outros tipos de critérios. No início da fase criativa do origami, Akira Yoshizawa (KODANSHA, 1983) organizou uma classificação por seu estilo, tendo-se:

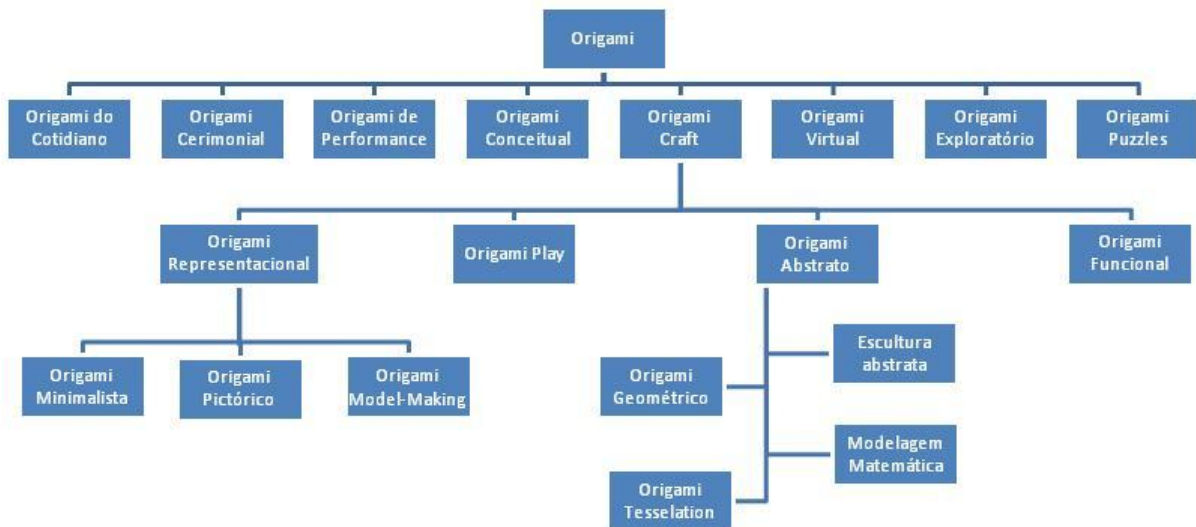
- *oshi-e* origami - estilo usado em bonecas de papel feitas por meio de técnicas especiais de corte e dobra;
- *nishiki-e* origami - papeis coloridos em xilografia e delicados cortes no papel;
- *kasaneori* - dobras com papeis de várias cores, sendo que, no final do processo, apenas algumas cores aparecem;
- *kawari-e* origami - praticado por crianças no período japonês denominado Era Meiji (1868-1912);
- *kiritsunagi* origami - utiliza o *washi*, papel artesanal japonês, por ser fino mas ao mesmo tempo resistente, já que esta técnica consiste em dobrar várias figuras conectadas em si mesmas. O livro *Sembazuru Origata* explora muito este estilo, apresentando cerca de 49 maneiras diferentes de cortar um papel quadrado com pequenos quadrados conectados ao centro, a fim de se fazer vários *tsurus*¹² (grous) juntos.

Em relação ao grau de dificuldade como parâmetro para classificação, existem as que levam em consideração o número de dobras sequenciais e o grau de facilidade ou dificuldade, que, no geral, podem variar de projetos para principiantes ou iniciantes, intermediários e avançados. No entanto, há certa dificuldade em mensurar e catalogar a percepção geral de indivíduos sobre o que pode ser considerado difícil ou fácil, já que cada um tem uma história e uma experiência muito própria com o origami.

Existem também classificações que levam em consideração a espécie ou o gênero do origami, como a da *Origami Resource Center* (2014) com 85 tipos de origami, relacionando entre eles o *kirigami* e o origami arquitetônico. A classificação de David Mitchell [s.d.] denominada como *Design Styles Overview*, oferece um panorama de estilos de design do origami que estabelece uma divisão por intenção de uso e aplicação, conforme figura 79.

¹² *Tsuru* é uma ave similar à garça, conhecida também como grou. O origami do *tsuru* é sem dúvida o mais representativo, mais antigo e com a técnica de dobra mais conhecida no Japão. Talvez isso se deva à crença de que o *tsuru* traz o presságio de uma vida de mil anos, sendo muito popular no Japão como símbolo de felicidade e longevidade. Além disso, segundo Honda (1969), sua forma balanceada dá o sentido da beleza oriental, sendo também base para dobras de muitos animais e aves.

Figura 79 - Design Styles Overview



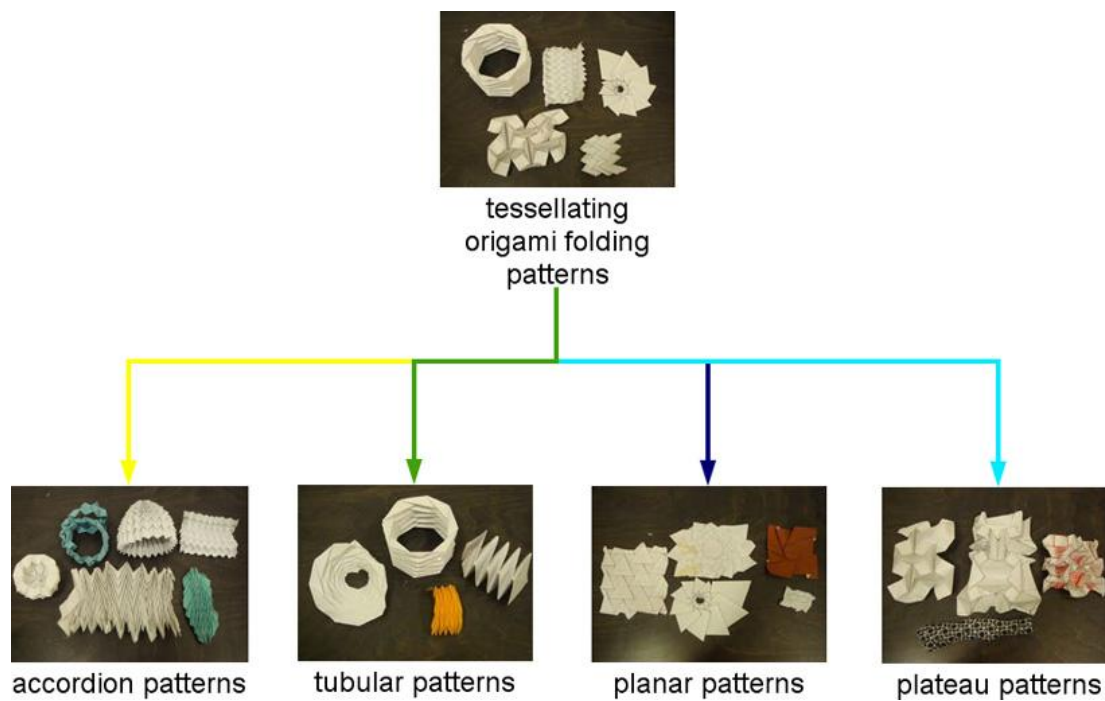
Fonte: Elaborada pela autora, adaptada de Mitchell [s.d.]

O *kirigami* aparece, em algumas classificações, como um tipo de origami, mas em outras, ele é considerado separadamente. Assim, ele pode ser o *kirigami* simples ou 2D, e o *kirigami* 3D ou origami arquitetônico.

Nesta seção e para essa pesquisa, busca-se organizar um sistema de classificação que possa ser empregado no design de produtos *flat foldables*. Portanto, as classificações anteriormente apresentadas não trazem neste escopo contribuições efetivas para o entendimento e aplicação das estruturas do origami.

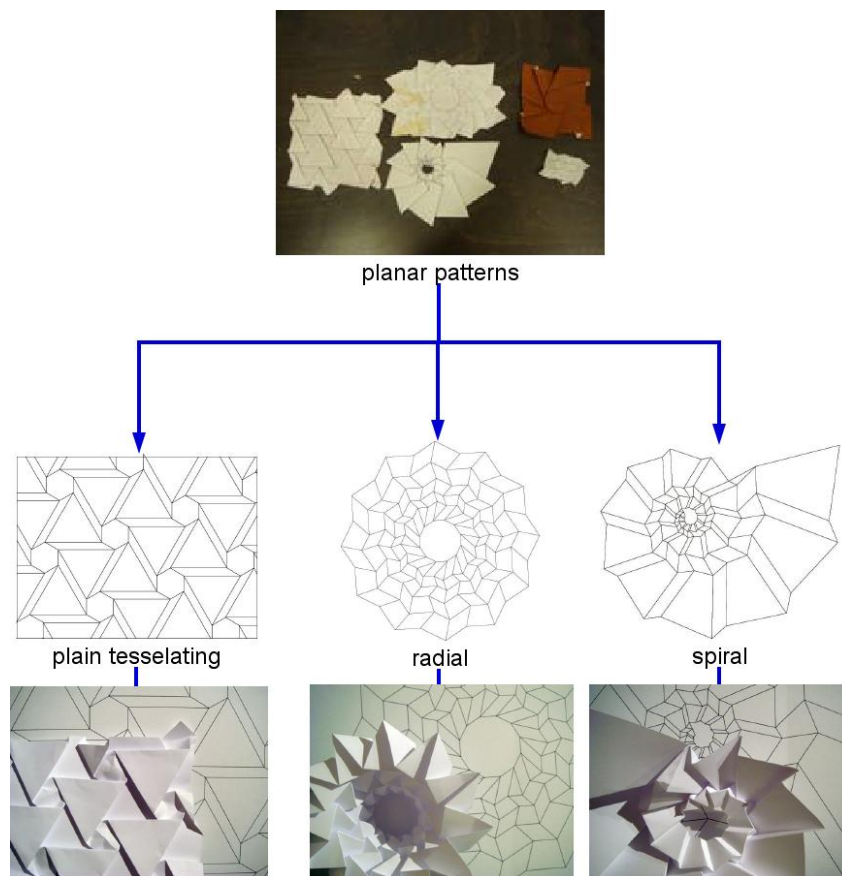
Assim, buscando referências de processo de seleção de tipos de origami e *kirigami* em pesquisas envolvendo o desenvolvimento de produtos, avaliou-se o trabalho de Ruysser (2009) sobre estruturas de origami em metal e tecido para novos vestuários. Em sua pesquisa, a autora selecionou apenas o origami do tipo *tesselation* e o classificou de acordo com o seu comportamento no momento da dobra: padrões sanfonados, tubulares, planares e platôs (figura 80). Além disso, cada um desses padrões receberam subníveis, de acordo com o desenho das linhas de dobra vale e montanha (figura 81). Essa classificação se aproxima da forma com que Jackson (2011) organizou as técnicas de dobra, apresentado na seção anterior.

Figura 80 - Classificação de Padrões de *Tessellation* segundo Ruysser



Fonte: Ruysser (2009)

Figura 81 - Padrão plano e suas três variações



Fonte: Ruysser (2009)

Uma outra classificação organizada por Yigit (2004) considerou, para a completa construção do modelo, o número de peças planas empregadas, sejam de papel ou de qualquer outro tipo de material. Assim, tem-se basicamente dois grupos distintos: estrutura plana transformável e estrutura modular. A primeira é aquela gerada por dobra e/ou corte de apenas uma peça inicial e a segunda, é aquela que necessita de duas ou mais peças para sua completa construção. Dos tipos de origami dessa classificação, as estruturas *pop-up* (ou *kirigami* 3D) estão entre as do primeiro grupo e os padrões modulares (figura 82) estão entre as do segundo grupo.

Figura 82 - Exemplos de Origami modular plano e tridimensional



Fonte: Modelos de Tomoko Fuse. Execução: Thaís R. Ueno Yamada. Foto: Ricardo K. Yamada

Porém, como apresentado anteriormente, as estruturas em *kirigami* 3D podem ser formadas tanto por uma única peça como por várias delas. Assim, essa classificação apresenta algumas falhas. Além disso, embora ela englobe praticamente a totalidade dos principais tipos de origami e *kirigami*, a distinção entre os grupos por número de chapas utilizadas não fará mais sentido para a aplicação em placas de BLaC, material selecionado para esta pesquisa. Afinal, elas serão cortadas em inúmeras placas poligonais as quais farão parte do conjunto unitário do modelo projetado, resultando que todas, sem exceção, serão estruturas modulares ao final, mesmo que em sua essência tenham surgido de uma estrutura plana única.

Em relação ao aspecto formal, essa classificação também não é a mais adequada para o escopo desta tese, cujo objetivo é o de investigar a aplicação das estruturas que são *Flat*

Foldables, ou seja, que tem como característica a capacidade de achatamento e expansão volumétrica por meio de dobras (articulações). Nesse sentido, não se encaixam nessas propriedades as estruturas estáticas e fixas, como as esculturas curvas de Huffman e os padrões modulares.

Portanto, para fins de organização, classificação e seleção de estruturas *flat foldable* para essa pesquisa, optou-se por não adotar o critério por tipos de origami e de *kirigami*, fato que causaria muitas exceções e variações e talvez pudesse ser mais confuso do que elucidativo. Assim, organizou-se a Tabela 1 apresentando os principais tipos de dobra, suas variações, se são potencialmente *flat foldable* e quais seriam as condições para atender a esse critério. Dessa forma, busca-se iniciar o estudo de design *orikiri* não por modelos prontos mas pelas técnicas de dobras essenciais e pela criação de composições por meio da exploração das mesmas.

Tabela 1 - Classificação de tipos de dobra para o design *orikiri*

(continua)

Tipo de Dobra	Variação	<i>Flat Foldable</i>	Condição
Sanfona	Linear	Sim	-----
	Rotacional	Sim	-----
	Cilíndrica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
	Cônica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
Navalha	Linear	Sim	-----
	Rotacional	Sim	-----
	Cilíndrica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
	Cônica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
Platô	Linear	Sim	-----
	Rotacional	Sim	-----
	Cilíndrica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
	Cônica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha

Tabela 1 - Classificação de tipos de dobra para o design *orikiri*

(conclusão)

Tipo de Dobra	Variação	<i>Flat Foldable</i>	Condição
Progressiva	Linear	Sim	-----
	Rotacional	Sim	-----
	Cilíndrica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
	Cônica	Com restrição	Se considerar um número par de conjuntos de dobra vale e montanha
Espiral	Simplex	Sim	-----
	Caixa	Com restrição	Se a caixa tiver um número par de lados
Torcida	-----	Não	-----
Dobra-V	Simétrica	Sim	-----
	Assimétrica	Com restrição	Se observado o Teorema de Kawasaki
	Coexistência de Vs	Com restrição	Se observado o Teorema de Kawasaki
	Múltiplos Vs	Com restrição	Se observado o Teorema de Kawasaki
	Cilíndricos Vs	Não	-----
	Superfícies Complexas	Com restrição	Se observado o Teorema de Kawasaki
Arcos Dobráveis	Forma-X	Sim	-----
	Dobra-V	Sim	-----
Parábolas Dobráveis	-----	Não	-----
Uma Dobra	-----	Não	-----
Sem Dobra	-----	Não	-----

Fonte: Elaborada pela autora

Em relação às técnicas de corte e dobra, originalmente todos os modelos de *kirigami* 3D (modalidade 0° , 90° , 180° , 360°) são *flat foldable*. Isso porque a capacidade das estruturas abrirem e fecharem com perfeição é essencial e primordial no planejamento de novos modelos. Para todos eles, é necessário atender as condições apresentadas na seção anterior para garantir a capacidade de achatamento. Na Tabela 2, apresenta-se um esquema

de tipos de cortes e dobras e suas variações para uma melhor compreensão da técnica e para a exploração e criação de novos modelos.

Tabela 2 - Classificação dos tipos de corte e dobra *flat foldable* para o design *orikiri*

Quantidade de Peças	Tipo de Corte e Dobra	Variação Nível 1	Variação Nível 2
Peça única	Um corte contínuo	Simétrico	Mudança de ângulo de dobra
			Mudança de ângulo de corte
			Mudança de formato do corte
		Assimétrico	-----
		Gerações de Corte	-----
	Desvios	-----	
	Corte Duplo	Simétrico	Mudança de ângulo de dobra
			Mudança de ângulo de corte
			Mudança de formato do corte
		Assimétrico	-----
		Gerações de Corte	-----
	Desvios	-----	
	Múltiplos Cortes	-----	-----
	Degraus	-----	-----
Asas	-----	-----	
Múltiplas Peças	V-Horizontal	-----	-----
	Caixa Diagonal	-----	-----
	Caixa Quadrada	-----	-----
	Treliças	-----	-----

Fonte: Elaborada pela autora

Acredita-se que, com a organização dessas tabelas, dá-se um importante passo em direção à compreensão da geometria envolvida no processo de criação de modelos em origami e *kirigami*, assim como do comportamento das dobras e dos cortes em relação às suas variações. Assim, englobando os elementos e os princípios do origami e do *kirigami*, o *flat foldability* e as técnicas de dobra e corte, é possível ao designer compor e criar novos produtos explorando o melhor que essas artes tem a oferecer para a resolução de problemas do mundo real.

2.4. *Origamics* e design

Conforme apresentado anteriormente, o estudo científico do origami e do *kirigami* permitiu a obtenção de avanços em várias áreas, da matemática à ciência da computação, da engenharia ao design industrial. Assim, para efeito de organização, Lang (2015) estabeleceu três principais categorias do origami científico, cujos limites podem não ser tão definidos, tramitando entre uma e outra: origami matemático, origami computacional e origami tecnológico. O origami matemático descreve as leis da matemática presentes na estrutura do origami enquanto o computacional se preocupa com algoritmos e teorias para a resolução de problemas em origami. E, finalmente, o origami tecnológico estuda aplicações do origami e seus processos de dobra na solução de problemas de engenharia, design industrial, arquitetura e tecnologias em geral.

Para reunir os principais pesquisadores do origami científico, foram organizadas cinco conferências internacionais a partir de 1989. A primeira foi realizada na Universidade de Pádua, Itália, e organizada por Humiaki Huzita, e a segunda ocorreu em 1994, na Universidade de Arte e Design Seian, no Japão. Na terceira edição, estabeleceu-se o nome *International Conference on Origami Science, Mathematics and Education* (OSME), que permanece até a quinta edição, ocorrida em 2010, em Singapura.

Os anais dos dois primeiros encontros são extremamente raros de se encontrar e estão esgotados nas editoras, mas foi possível encontrar na internet o quadro de trabalhos apresentados nas terceira, quarta e quinta conferências. Analisando a quantidade de artigos publicados na 3OSME, verificou-se que cerca de 20% envolviam pesquisas relacionadas ao design ou à engenharia. Na 4OSME, essa quantidade caiu para cerca de 16% e na 5OSME, para menos de 4% dos artigos apresentados. Analisando esses números, de uma maneira geral, observou-se que os estudos de origami matemático e computacional predominaram nessa conferência, seguidos pelos de origami educacional e pelos estudos de engenharia, tecnologia e design.

Isso poderia oferecer um panorama pessimista para as pesquisas na área do design industrial, se não houvesse tantos lançamentos de produtos no mercado com “inspiração” no origami. A reflexão então é que talvez estejam faltando mais pesquisas e publicações científicas que explorem a metodologia desses projetos, analisando o modo de projetar utilizando a estrutura do origami e do *kirigami* como base para o desenvolvimento de novos

produtos. Tanto que, no mais recente OSME, ocorrido em agosto de 2014, no qual a pesquisadora participou como única representante do Brasil, a quantidade de trabalhos apresentados envolvendo aplicações do origami na engenharia, na arquitetura e no design voltou a cerca de 20% do total. Desses, muitos eram estudo de casos de projetos de produto, tais como vestuário, joia e mobiliário, com técnicas diversas de curvar e dobrar vários materiais.

O potencial existe e havia sido reforçado por Stewart (2007) ao afirmar que o origami é uma excelente ferramenta para suprir a necessidade de economia de espaço, tanto em termos comerciais, de engenharia e de estrutura, e para a construção de formas elaboradas a partir de simples materiais planos. O autor, ao mostrar as pesquisas desenvolvidas por Nojima Takedoshi, afirmou que essa é uma nova disciplina que surgiu, chamada “*origamics*”, uma combinação da engenharia, da matemática e da biologia para a criação de novos produtos que atendam necessidades produtivas, de transporte, de armazenamento e de utilização flexível.

Quanto ao *kirigami*, seu estudo e aplicações na área da tecnologia e no design de produtos ainda é tímido. Pouco se sabe sobre uma metodologia de projeto que aplique essa técnica e bem como as possibilidades e os limites da transposição de sua geometria em outros materiais diferentes do papel.

Assim, apesar de não haver limites nas criações artísticas baseadas nessas técnicas tradicionais de dobra e corte, existem limites nas suas estruturas, que são definidos pela sua geometria (LANG, 2009). Além disso, existem também limitações técnicas e tecnológicas, que podem dificultar ou impossibilitar que determinado avanço seja efetuado.

Quando se estudam novos modelos com origami ou *kirigami* no papel, as variáveis são o formato inicial, as gramaturas, a resistência mecânica do material, as texturas (que podem interferir no resultado final), além de outras características físicas. Além disso, utilizando-se de variações de técnicas de dobra e corte vistos anteriormente, as possibilidades de combinações e criações de novos modelos são numerosas. Porém, quando se estudam novos modelos em novos materiais, as variáveis são muitas, entre elas as características físicas desse material escolhido e as tecnologias existentes para seu processamento adequado (dobra, corte etc.). E para completar, pode ser que nem todos os tipos de origami e de *kirigami* sejam passíveis de serem adequados a outro material que não

seja o papel. Assim, a evolução tecnológica, o conhecimento do material e a escolha do tipo de origami e de *kirigami* são fatores fundamentais para o design *orikiri* de novos produtos.

Superando todos esses fatores, o estudo do design do origami e do *kirigami* torna-se relevante pois possibilita sua aplicação em produtos de alta performance que trazem reais benefícios à indústria e ao usuário. Segundo Lobach (2001), o ser humano possui necessidades e aspirações, que podem ser supridas e alcançadas pelo uso de objetos que lhe tragam bem-estar, relaxamento e prazer.

Isso ocorre por meio das funções dos produtos, que no processo de utilização, se manifestam como valores de uso. A satisfação de certas necessidades presume o desenvolvimento de determinados objetos, quer dizer produtos, no qual o designer industrial toma parte representando os interesses dos usuários. (LOBACH, 2001, p.31).

Os produtos industriais buscam uma lógica da produção em massa e a racionalização dos processos econômico e produtivo. Porém, essa produção serial e repetitiva traz a sensação de que todos os produtos são iguais, sem diferenciação, atingindo menos aspectos sociais e suprimindo cada vez menos as necessidades psíquicas individuais. Neste aspecto, o design precisa se inserir como meio de desenvolvimento de produtos, por meio da diversificação ou da diferenciação, aumentando o valor de uso. A primeira estratégia visa desenvolver produtos em uma expansão horizontalizada, com o acréscimo de novos produtos ligados à produção da empresa. A segunda estratégia busca oferecer muitas alternativas de compra aos usuários por meio de versões diferentes de produtos já existentes.

Seja diversificando ou diferenciando, a aplicação dos princípios e conceitos do origami e do *kirigami* pode ser uma estratégia com alto potencial de inovação. Segundo o Manual de Oslo (1997), inovações "incrementais" incorporam novos elementos ao produto ou ao processo, podendo abrir novos mercados e preenchendo continuamente o processo de mudança. O usuário percebe a inovação em um produto quando ele obtém uma vantagem relativa em relação aos demais e permanece compatível com seus valores e necessidades.

Segundo Füssler (2012), a grande oferta de programas de computador que fazem todo o serviço para o designer acaba limitando o processo de design dentre as opções e

ferramentas oferecidas por eles. Por essa razão, a busca por novas fontes de ideias além daqueles já existentes dentro do universo do design é muito importante não somente para o desenvolvimento do design como também no **processo** de desenvolvimento do design.

Assim, por meio do design *orikiri*, torna-se possível oferecer algo a mais em um produto com maior significado, com design inovador, inteligente, funcional e prático, despertando interesse e valor em algo único. Se bem trabalhado, atende-se a função prática do produto industrial, com a satisfação dos aspectos fisiológicos do uso; a função estética, pois a aparência do produto pode atrair sensorialmente o usuário, sendo um importante fator de decisão de compra; e a função simbólica, incrementada por relações de empatia e identificação.

Um dos conceitos básicos do design *orikiri* é a simplicidade, qualidade muito valorizada por Munari (1998), pois esse processo de descomplicar exige muita criatividade e trabalho, explorando qualquer técnica e material sem preconceitos, projetando para a satisfação de todos os sentidos, especialmente a visão e o tato. Assim, simplificar utilizando o design *orikiri* é explorar técnicas de dobra e de corte em diversos materiais, podendo ajudar a reduzir custos, diminuir os tempos de trabalho, de montagem e de acabamento.

Segundo Jackson (2011), o ato de dobrar pode ser considerado como uma das mais comuns técnicas utilizadas no design, pois todos os designers dobram, curvam, torcem, inclinam, viram, rebatem, contorcem, vincam um material bidimensional, mesmo que os resultados, muitas vezes tridimensionais, nem sempre tenham a aparência claramente relacionada ao origami.

Quando se projeta claramente a partir de modelos de origami, o resultado final apresenta uma qualidade plástica bem próxima aos seus conceitos básicos: unidade, totalidade, simplicidade, flexibilidade e modularidade.

Um bom exemplo são os trabalhos de Garibi (2014), que considera o origami como uma arte baseada na transformação do que já existe, sem adicionar ou retirar nada, como ocorre na pintura (adiciona-se tinta) e na escultura (retira-se material). O que se tem no começo no trabalho é exatamente o mesmo no final. Após se aposentar como um oficial militar e dobrar milhares de modelos de origami como hobby, o artista começou a criar seus próprios designs baseados nas primícias da visão purista do origami: sem cola, sem corte,

apenas vincos e dobras. Suas experiências com materiais diversos geraram obras que se apresentam como verdadeiras esculturas de arte, explorando a dobra e a combinação de metal, papel, concreto e madeira (figuras 83 a 85).

Figura 83- Palmas: uma série de vasos de concreto baseados no modelo *Diamond* de Garibi, 2012



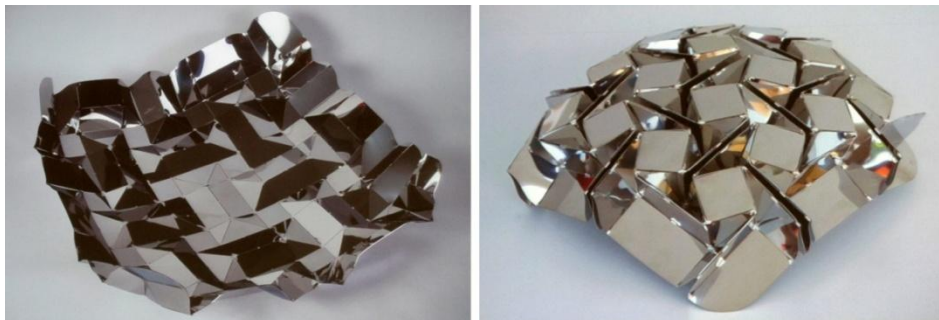
Design: Offir Zucker e Ilan Garibi. Foto: Reprodução de Offir Zucker

Figura 84 - Tavolini: série de mesas de canto feitas de metal e madeira dobradas à mão, 2013



Fonte: Garibi (2014)

Figura 85 - *Metal Origami Sculptures*. Chapa de aço inoxidável com 1 mm de espessura, cortado à laser e dobrado à mão



Fonte: Garibi (2014)

Esta série de esculturas em metal dobrado foi aperfeiçoada e apresentada na Galeria dos Talentos do Design do Miart 2013, uma das maiores e mais importantes exposições de arte em Milão, Itália. Para a edição de 2014 dessa mesma exposição, Garibi apresentou uma coleção de jóias compostas por anéis, colares e braceletes, mesclando papel, madeira e metal dobradas à mão (figura 86).

Figura 86 - Design de Jóias com origami



Fonte: Garibi (2014)

Lang (2015) elencou três critérios que determinam a presença e utilização do origami no design:

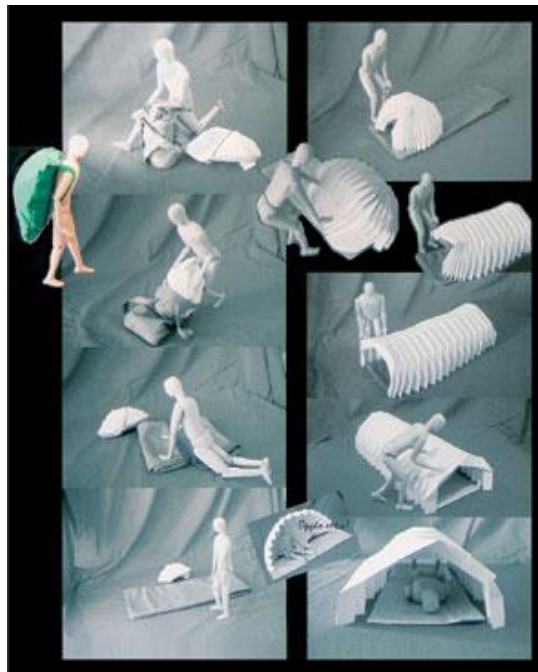
- O objeto deve ser fino e feito por folhas/placas, qualquer que seja o material;
- Ele precisa estar plano e deve ser passível de abertura no seu destino final (3D) e
- Precisa se apresentar em menor tamanho durante o seu transporte.

Embora as experimentações de Garibi com materiais sejam muito importantes para quebrar o paradigma de que só é possível fazer origami com papel, e que suas obras sejam de uma qualidade plástica indubitável, seus resultados não são flexíveis a ponto de permitir o retorno do formato tridimensional para o bidimensional que o originou e vice-versa. Essa característica de se apresentar achatado e de se transformar em tridimensional por meio de sua abertura é a mais importante para o desenvolvimento de design *orikiri flat foldable* flexível.

Atendendo todos esses critérios, tem-se o exemplo do Abrigo-Origami-Contêiner, de Tahara (2005), um projeto de design social constituído de um abrigo temporário emergencial para moradores de rua, adaptando técnicas tradicionais do origami para transformar uma

superfície plana em um tipo de cabana. Percebe-se aqui que a designer empregou a técnica de Arco Dobrável com Dobra-V que confere resistência natural ao material escolhido, um papel com camadas de polietileno e alumínio, que tem características de isolante térmico e acústico. Além disso, como o material é leve, o projeto pode ser dobrado e carregado em mochilas e montado diariamente (figura 87).

Figura 87 - Projeto Abrigo-Origami-Contêiner



Fonte: Tahara (2005)

Issey Miyaki, trabalhando em colaboração da Issey Miyake Reality Lab. com a Artemide, produziu uma coleção de luminárias feitas de fibras de garrafas PET recicladas adotando um design claramente *orikiri* (figura 88). O designer empregou o processo desenvolvido por um programa matemático com princípios geométricos tridimensionais de Jun Mitani baseados no origami, para criar produtos que se dobram e desdobram, facilitando o transporte e a estocagem. Além disso, quando aberta, a estrutura auto-sustenta seu formato sem a necessidade de um esqueleto interno de outro material. Como é feita de papel, as técnicas de dobra empregadas (a maioria em espiral e suas variações) foram bem aceitas pelo material. Esse projeto chamado IN-EI ganhou o *iF Design Award* 2013 e o *Compasso d'Oro* 2014, por ter mesclado tradição e modernidade em um objeto essencial, tecnologicamente avançado mas ao mesmo tempo poético (ADI, 2015).

Figura 88 - Coleção *IN-EI*, que em japonês significa "sombra", "nuance"



Fonte: Artemide (2014)

Buscando experimentar as técnicas de dobra em outros tipos de material e com outras tecnologias, Ruysser (2009) elaborou peças de vestuário a partir de estruturas do tipo *tesselation*, aliando tecido e metal (figura 89). O conceito básico do origami de flexibilidade tornou possível a adequação desses objetos a qualquer tipo físico, podendo ser o início de uma moda adaptável a qualquer tipo de usuário ou ainda como elemento de proteção física. Como o tecido se comporta de maneira equivalente ao papel, e as camadas de metal adicionadas eram bem finas (cerca de 2 a 3 mm de espessura), as técnicas de dobras utilizadas foram também bem sucedidas.

Figura 89 - Capa e bracelete da série "*Wearable Metal Origami*" de Ruysser



Fonte: Ruysser (2009)

Estes são apenas alguns dos vários projetos que empregam os conceitos e princípios do origami e do *kirigami* em estruturas de materiais diversos como papel, tecido e plástico finos. Há a vantagem construtiva de serem leves e se adaptarem a diferentes tipos de dobra, devido à pouca espessura e à alta maleabilidade desses materiais. Com eles, torna-se possível fazer praticamente qualquer estrutura plana transformável ou modular, necessitando apenas de alguns ajustes e conhecimento de modos industriais de curvatura e dobragem.

Para materiais rígidos, como placas de madeira e vidro, que não podem sofrer alterações em seu estado de planura - do contrário podem trincar ou quebrar - existe a área de estudo denominada *Rigid Origami*, ou Origami Rígido, que estuda os limites de padrões de dobra em materiais não deformáveis utilizando estratégias de articulações variadas (WATANABE; KAWAGUCHI, 2009).

As possibilidades de combinação e usos de diferentes estratégias de articulações e modificações na geometria das unidades modulares (painéis) constituintes dessas estruturas são muitas, e apresentam vantagens para a engenharia, a arquitetura cinética e o design de produtos transformáveis. Porém, deve-se observar que somente as técnicas de dobra e de corte elencadas como *flat foldable* nas tabelas 1 e 2, apresentadas no capítulo anterior, podem ser exploradas nesse sentido.

Um exemplo são os abrigos temporários da Global Village Shelters (2013) que utilizam a dobra básica da sanfona para montar as paredes do abrigo, facilitando seu transporte e montagem (figura 90). Os abrigos são feitos de polipropileno, equipados com porta, janelas e cobertura, e disponibilizados em dois tamanhos. Os de 6 m² pesam 77 kg e podem ser montados por dois adultos em menos de 20 minutos e os de 20 m², tem 236 kg e ficam prontos em apenas uma hora.

Figura 90 - Montagem da casa de 6 m² da Global Village Shelters



Fonte: Global Village Shelters (2013)

Tachi (2010) afirmou que, além da clara possibilidade de projetar estruturas impermeáveis para cobertura de espaços ou fachadas, é importante observar também outros aspectos vantajosos dessa área de estudo. Como essas estruturas possuem mecanismos puramente geométricos que não dependem de módulos de elasticidade do material, há a possibilidade de conceber objetos modulares cinéticos robustos em grande escala sem que a gravidade interfira significativamente. Além disso, há a possibilidade de uso de mecanismos semi-automáticos retráteis, já que a transformação da configuração da estrutura é controlada por pequenos graus de liberdade.

O projeto da *Make Architects* (2015) chamado *Canary Wharf Kiosk*, em Londres, aplica essa vantagem técnica do *Rigid Origami* para criar uma estrutura geométrica que se abre para atender o público e se fecha, garantindo a segurança dos objetos deixados em seu interior e compoendo visualmente com o local onde está inserido (figura 91).

Figura 91 - *Canary Wharf Kiosk*: aberto, fechado e detalhe das dobradiças metálicas



Fonte: Make Architects (2015)

Externamente, a estrutura é composta por painéis de alumínio com acabamento durável que exige uma manutenção mínima. A estrutura é extremamente leve, portátil, não necessitando de fundação. Internamente, oferece um espaço de 3 m de comprimento por 1,95 m de profundidade e é composta por uma estrutura de aço cujas faces internas são feitas por uma fina camada de compensado de madeira coberta por uma membrana à prova d'água. Toda a estrutura é previamente fabricada e entregue no local completa e pré-montada, o que facilita a instalação.

Pelo seu perfil, observa-se a técnica de dobra sanfona rotacional e que a cobertura é constituída por múltiplos "Vs". Percebe-se ainda que a espessura dos painéis é fina o suficiente para conferir leveza à estrutura. A articulação que atua como uma dobra do material é

composta por dobradiças em volta de pinos de aço e o sistema de abertura e fechamento é controlado por um sistema de contrapesos acionado por um dispositivo elétrico.

A fachada da *Kiefer Technic Showroom*, Áustria, da Ernst Giselbrecht+Partner (2007) também adota as vantagens construtivas do origami rígido para controlar a entrada de luz por meio do sistema automático de posicionamento de seus painéis metálicos articulados, distribuídos em várias dobras sanfonas simples, que juntas tornam possível a criação de várias composições da mesma fachada, atribuindo dinamismo a esse elemento arquitetônico (figura 92).

Figura 92 - *Kiefer Technic Showroom* e algumas configurações da sua fachada



Fonte: Ernst Giselbrecht + Partner (2007)

Materiais como placas de madeira e de bambu podem ser aplicados na área do Origami Rígido, pois são superfícies planas delimitadas por linhas de dobras (arestas) que não esticam e nem se curvam. E se elas tiverem o tratamento e proporções adequadas, podem se adaptar de pequenas a grandes escalas, do design de produto à engenharia espacial.

A seguir, serão apresentados alguns exemplos dessas aplicações dos conceitos e princípios do origami e do *kirigami* em projetos que utilizam a madeira ou bambu (alguns deles fixos e estáticos, outros dobráveis), evidenciando o potencial dessa estratégia como elemento de inovação.

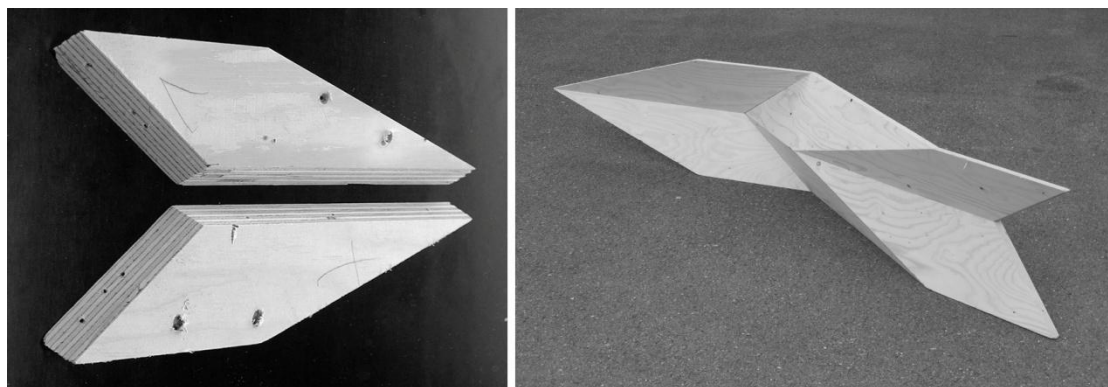
2.4.1. Design orikiri com madeira e bambu

Por meio da análise do padrão de Miura-Ori, Buri e Weinand (2008) geraram uma estrutura do tipo fixa, composta por módulos de placa de madeira compensada de 21 mm para

montar um protótipo com três propósitos: demonstrar a exequibilidade do uso de painéis para estruturas baseadas na sua geometria; ter uma primeira experiência com os métodos de montagem e de conexão; e comparar a deformação do protótipo com um modelo numérico.

A Figura 93 mostra as duas placas simétricas trapezoides que fazem a composição de toda a estrutura, e que foram fixadas em pares por parafusos auto-perfurantes. Doze pares formaram um arco com vão de 6,7 m e largura de 2,6 m. Com seis arcos, a composição estava completa.

Figura 93 - Módulos da composição do protótipo



Fonte: Buri e Weinand (2008)

O teste de carga estática mostrou que ocorreram importantes deformações na estrutura, principalmente nos lados abertos a uma carga de 2,7 kN, o que evidenciou a necessidade de efetuar-se um aperfeiçoamento das conexões nesse tipo de estrutura, para que houvesse também uma melhora no teste (figura 94).

Figura 94 - Protótipo finalizado e submetido aos testes mecânicos



Fonte: Buri e Weinand (2008)

A construção do protótipo mostrou a viabilidade desse tipo de estrutura (origami e placas de madeira), assim como evidenciou que, apesar da sua complexidade, a fabricação e a montagem não são complicadas, pois os elementos, apesar de serem constituídos por placas de madeira compensada, foram flexíveis o suficiente para absorverem pequenas variações de carga.

Posteriormente, Buri (2010) também desenvolveu um segundo protótipo em madeira compensada para uma exposição. Inspirado por uma estrutura semelhante a um cilindro poligonal aberto, semelhante ao Arco com Dobra-V, o protótipo foi produzido em painéis de madeira com 21 mm de espessura, fixados por cavilhas, cola e parafusos (figura 95). O autor observou que a simplicidade da geometria básica da estrutura colaborou para que fosse obtida uma importante vantagem econômica de construção.

Figura 95 - Segundo protótipo



Fonte: Buri (2010)

A Local Architecture et al. (2008) de Lausanne, Suíça, ergueu uma capela provisória para as freiras da vila de Saint Loup, sul da Suíça, em apenas dois meses, utilizando os conhecimentos adquiridos pelos estudos anteriores, ou seja, projetando uma estrutura "dobrada" de painéis poligonais. As placas que compõem a capela foram cortadas por meio de um *plotter* digital a laser e unidas por placas metálicas dobradas. Pode-se observar, na Figura 96, que seu padrão poligonal irregular conferiu diferentes composições de luz e sombra em seu interior e exterior e apresentou uma variação da dobra básica em Arco com Dobra-V, apresentado por Jackson (2011).

Figura 96 - Capela provisória de Saint Loup



Fonte: Local Architecture, Buri e Weinand (2008)

O uso de formas poligonais que se articulam entre si faz com que haja uma interação entre as placas para criar uma estrutura tridimensional, e que pode ser encontrada em fachadas arquitetônicas dobráveis e projetos de interiores. O escritório de arquitetura Foreign Office Architects (2008) projetou painéis articulados de finos colmos de bambu para o projeto de Habitação Social Carabanchel, em Madri, a fim de atribuir aos moradores a possibilidade de escolha na exposição de sua habitação ao sol, ao jardim localizado nas imediações ou na privacidade individual (figura 97). Ela é uma composição de várias dobras sanfonas com mobilidade independente entre as placas paralelas.

Figura 97 - Carabanchel e sua fachada de placas de bambu articuladas



Fonte: Foreign Office Architects (2008)

Em relação ao bambu, há um potencial muito grande no uso desse material em projetos de habitações sociais assim como em arquiteturas mais sofisticadas. Tang & Yang Architects (2009) receberam o primeiro lugar no Prêmio *Self Sufficient House Competition* e foram finalistas no *Earth Award 2009*, pela proposta do projeto de um abrigo emergencial em bambu e papel chamado de *Folded Bamboo House*, para os desabrigados pelo terremoto que atingiu a China em 2008. Sua estrutura é articulada, sendo uma mistura de conceitos do

desenho e movimento de guarda-chuva e de leques dobráveis, apresentando várias configurações para diferentes necessidades (figura 98). Infelizmente, tal projeto ainda não foi executado e não foram encontradas informações sobre essas articulações e se elas realmente funcionariam em uma situação real.

Figura 98 - *Folded Bamboo House* e suas possibilidades de configurações



Fonte: Tang e Yang Architects (2009)

No projeto de interiores do Café e Restaurante STIX, os arquitetos da *3SIXØ Architecture* (2009) projetaram mobiliários dobráveis, também aplicando uma variação da dobra sanfona, em que as mesas se articulam por meio de dobradiças, das paredes para o chão e vice-versa, podendo abrir espaço para uma festa. Na figura 99, percebe-se também que os arquitetos se preocuparam em compor o ambiente de maneira que as faixas de madeira tivessem continuidade do chão ao teto, fazendo com que todo o mobiliário se fundisse na composição do espaço.

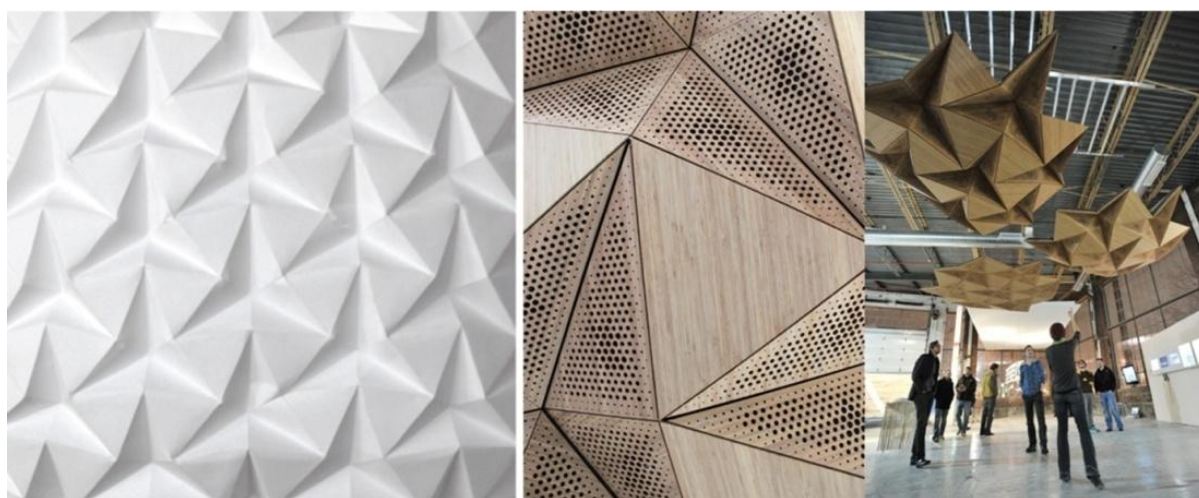
Figura 99 - A articulação das mesas e a composição do espaço



Fonte: *3SIXØ Architecture* (2009)

Uma outra aplicação na área de interiores, é o protótipo de painéis cinéticos de ressonância feitos de bambu, por Thün et al. (2012). Os painéis de ressonância exploram a acústica através de pesquisas na área computacional e de prototipagem, utilizando testes de materiais, fabricação digital e atuação em tempo real para criar sistemas flexíveis e adaptáveis a diferentes necessidades acústicas. Essa pesquisa alia as propriedades do origami rígido, das placas de bambu e da estrutura geométrica composta por células triangulares, e pretende-se, com a propriedade cinética, alterar a acústica de teatros e ambientes de espetáculos conforme a necessidade. Observa-se que esta estrutura é baseada nas superfícies complexas com múltiplas Dobra-V que é, segundo Thün et al. (2012), comprovadamente mais sensível acusticamente e de melhor integração com os eletroacústicos (figura 100). Como a espessura da placa de bambu é muito fina, a articulação é feita não com dobradiças mas por uma camada de tecido que atribui maleabilidade e movimento ao conjunto.

Figura 100 - Estrutura em origami e o protótipo do painel de ressonância



Fonte: Thün et al. (2012)

O emprego dos conceitos e princípios do origami e do *kirigami* no design de um produto pode resolver problemas relacionados à racionalização no uso de material, na facilidade de fabricação por conta da modularidade e na melhoria na resistência mecânica. É o exemplo do projeto de Kimpara (2008), que, apesar de não possuir articulações, é uma peça de mobiliário forte o suficiente para a função à qual foi projetada. O banco em bambu laminado colado foi elaborado para servir de mobiliário urbano aplicado especificamente na região da Liberdade, em São Paulo (figura 101). Por esse motivo, a designer optou por

utilizar o origami pela sua proximidade cultural com os moradores e frequentadores da região. Mas seria muito interessante se esse banco fosse articulado a ponto de ser fechado quando não estivesse sendo utilizado.

Figura 101 - Banco em BLaC com influência do origami em sua estrutura



Fonte: Kimpara (2008)

Quando se aplica a articulação em produtos com design *orikiri*, pode-se contribuir para facilitar o transporte e o armazenamento desses produtos, pois considera-se a economia de espaço, já que são transformáveis, e potencializa-se o uso pela flexibilização e versatilidade de suas formas. Além disso, tem-se um forte apelo visual e busca-se a inovação pela multiplicidade de configurações.

Assim, estruturas articuladas *flat foldable*, que se transformam do bidimensional para o tridimensional, resolvem questões como eficiência do espaço e portabilidade. A Figura 102 mostra a mesa retrátil de parede em bambu da *Union Elemental* de Bogotá (ALVARADO, 2009) que possibilita a otimização do espaço quer esteja em uso ou não.

Figura 102 - Mesa retrátil de parede (esquerda)



Fonte: Alvarado (2009)

Outro importante exemplo é a série *Rising Furniture* de Van Embricqs (2015) que, embora não denominando a influência do *kirigami* 3D, explora em uma única peça múltiplos cortes paralelos em placas de bambu a fim de criar móveis que surgem da "elevação" e do movimento dos módulos constituintes de sua estrutura, sendo máximo o aproveitamento do material (figura 103). Lembra o *kirigami* 3D da modalidade 180°, com a técnica da asa, mas se abre de maneira diferente, não pela rotação dos planos neste ângulo, mas pelo deslizamento dos mesmos. Também não foram encontradas informações detalhadas sobre o processo de projeto e produção desses móveis, ou seja, os estudos de modelos, se foram virtuais e/ou físicos, quais tecnologias empregadas, as dificuldades e os limites de se trabalhar com o design *orikiri* com bambu.

Figura 103 - *Rising Table* e *Rising Chair* do designer alemão Robert Van Embricqs

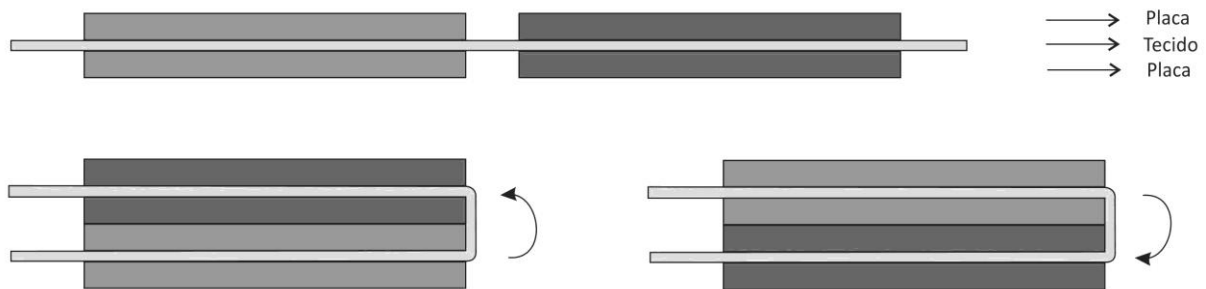


Fonte: Van Embricqs (2015)

Por meio de todos os exemplos anteriores, observam-se três estratégias de articulação adotadas em materiais rígidos: tecido, pino e dobradiça. O tecido é usado como um substituto do papel no quesito maleabilidade e flexibilidade, servindo como um "recheio" de placas de outros materiais. A distância entre as camadas de placas deve ser

determinada pela espessura das mesmas, a fim de tornar possível a dobra total. Serve para todas as espessuras, mas não há como definir se a dobra será vale ou montanha, já que os planos poligonais podem dobrar tanto para cima quanto para baixo (figura 104).

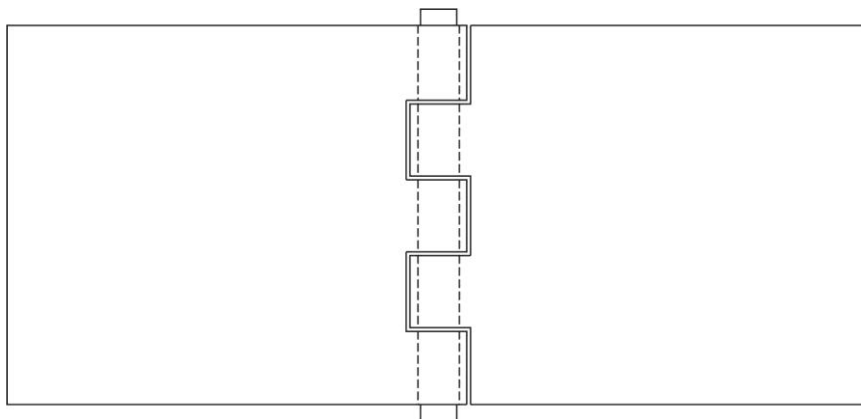
Figura 104 - Representação gráfica da composição de placas com tecido no meio



Fonte: Elaborada pela autora

A segunda estratégia é o uso de pinos ou cavilhas entre as placas, permitindo que elas se movimentem em torno de um eixo (furo). Os pinos podem ser metálicos ou de madeira, mas o seu uso dependerá da espessura das placas e dos ângulos de abertura e fechamento. Nesse caso, a geometria das placas precisa ser adaptada prevendo o encaixe dos pinos (figura 105).

Figura 105 - Representação gráfica do uso de pinos para articulação de duas placas



Fonte: Elaborada pela autora

A terceira estratégia é uma variação da segunda, ou seja, utilização de dobradiças prontas que vão atuar como os pinos. As vantagens são: existem diversos tipos de dobradiças, em materiais mais resistentes, e específicos para cada espessura e necessidades;

e não necessita executar cortes e furos nas placas para inserir um pino. As desvantagens são: não há dobradiças para espessuras inferiores a 10 mm; não há dobradiças que rodem 360° em torno do seu eixo.

Conhecer o material e as estratégias de articulação que melhor se adaptam foi uma questão abordada por Jackson (2011), ao afirmar que adaptar ideias bem sucedidas no papel em outros materiais é sempre a etapa mais desafiadora no processo de design. Trabalhando com o material a aplicar a dobra nos estágios mais iniciais pode ser uma solução para conhecê-lo melhor, ao invés de apenas utilizá-lo ao final de um longo processo apenas com papel. Deve-se inclusive questionar se fazer os modelos em papel é realmente necessário. Assim será possível conhecer melhor o material e as suas qualidades, a fim de descobrir soluções aproveitando suas melhores características e não indo contra elas.

Mas se não for possível efetuar muitos testes de dobras no material que se pretende trabalhar, devido ao seu custo elevado, é importante adotar outras estratégias, como a utilização de programas gráficos adequados para a realização de simulações virtuais antes de serem efetuadas as simulações físicas. Neste sentido, existem muitos programas de modelagem que podem servir ao propósito do design *oriki*: AutoCAD 3D, Inventor e 3DS Max, da Autodesk; Rhinoceros 3D; Solid Edge, da Siemens PLM; e SolidWorks, da Dassault Systèmes. A escolha dependerá da familiaridade do designer com o programa e do que se espera dele.

Observa-se também, pelos exemplos de aplicação apresentados anteriormente, que as dobras básicas sanfona foram as mais utilizadas para as estruturas articuladas, de diversas espessuras e materiais. A Dobra-V e suas variações também foram empregadas, mas somente em estruturas articuladas de espessura fina (com tecido e pinos como articulação), ou em estruturas fixas, sem articulação, de espessura maior e de madeira. Os Arcos Dobráveis também foram utilizados, mas constituídos por placas de polipropileno de pequena espessura ou em estrutura de madeira não dobrável. Assim, existem muitas técnicas de dobra e de corte que ainda não foram exploradas no design de produtos *orikiri*.

Com bambu, tem-se apenas três exemplos de aplicação com articulação, dos quais um (*Bamboo Folded House*) ainda não foi executado e os outros dois usam a dobra sanfona linear. Além disso, tem-se apenas um exemplo de aplicação com as técnicas de corte e dobra similares, mas não iguais, às do *kirigami* 3D, embora com maior potencial *flat foldable*

flexível de todos. Para completar, faltam informações sobre o processo de projeto desses objetos.

Assim, verifica-se que há uma lacuna de pesquisas em desenvolvimento de produtos os quais evidenciem os tipos de dobra e de corte mais adequados para esse tipo de intervenção, assim como são carentes informações sobre o comportamento do material durante a preparação e a construção dos modelos físicos, especialmente em relação ao BLaC, determinando seus limites. Além disso, cada tipo de dobra e de corte pode exigir modificações na geometria das placas, para a otimização dos movimentos de abertura e fechamento, assim como determinação dos limites da utilização e da localização de dobradiças ao longo dos limites das placas. Estas são questões que pretendem ser respondidas por esta pesquisa. Como são escassos os usos da estratégia do design *orikiri* com BLaC, pretende-se aproveitar ao máximo as vantagens construtivas e estéticas do origami e do *kirigami* e as potencialidades deste material para lhe atribuir ainda maior valor de mercado.

3. Materiais e Métodos

3.1. Métodos

Dentre os tipos gerais de pesquisa, essa se caracterizou como sendo prática e aplicada, pois utilizou-se de leis e de teorias voltadas a certas realidades e a casos específicos na busca de soluções concretas e imediatas ao problema pesquisado, via experimentação. Visou apontar para fins práticos, novos conhecimentos e soluções, para o design *orikiri* aplicado em BLaC, além de descobrir potencialidades após os resultados obtidos e abrir caminhos para novas descobertas.

Quanto aos objetivos, segundo Gil (2010), esta pesquisa foi do tipo exploratória, pois buscou familiarizar-se com um assunto ainda pouco conhecido e pouco explorado, sendo que, ao final, buscou conhecer mais sobre esse assunto e construir outras hipóteses. Como qualquer exploração, a pesquisa exploratória dependeu da intuição do explorador.

Quanto aos procedimentos técnicos e/ou metodológicos, esta pesquisa caracterizou-se como experimental, pois: utilizou-se de um experimento - modelo da realidade pesquisada - para testar e validar hipóteses; estabeleceu um objeto de estudo, identificam-se as variáveis participantes e/ou que interferissem no processo, verificou-se a existência (ou não) de relações de dependência entre as variáveis, e, em uma outra etapa (geralmente denominada de pesquisa aplicada), analisou-se a sua aplicabilidade prática, ou seja, de que modo esta pesquisa pode ser utilizada para interferir na realidade.

3.2. Materiais

3.2.1. Bambu Laminado Colado

Para a confecção do BLaC nessa pesquisa, utilizou-se:

- Colmos maduros de bambu da espécie *Dendrocalamus asper*, pois como já foi relatado anteriormente, ele apresenta porte grande, parede de espessura adequada para obter ripas e retidão dos seus colmos.

- Equipamentos e instrumentos do Laboratório de Experimentação com Bambu, da UNESP, Bauru:

- Moto-serra (marca Stihl)
- Serra circular destopadeira (adaptada)
- Serra circular refiladeira dupla (adaptada)
- Serra circular de bancada (marca Verry Máquinas)
- Plaina duas faces (marca Baldan, DPC-3, 1200 X 250 mm)
- Desengrossadeira (marca Baldan, DGR-4, 400 mm)
- Super Taquara (Máquina de Laminar Bambu LATIC)
- Tanque
- Lixadeira
- Ferramentas diversas para marcenaria (serrote, furadeira, parafusadeira, martelo)
- Adesivo Cascorez Extra PVA e Adesivo Cascorez para Madeira PVA na gramatura de 300 g/m²
- Produtos diversos para acabamento

3.2.2. Papel

Para as etapas iniciais com modelos físicos, aplicando e selecionando as técnicas de dobra e de corte trabalhadas nesta pesquisa, utilizou-se o papel sulfite, branco, 75 g/m², e o papelão do tipo chapa ondulada, composto por três camadas: a capa ou o forro superior, o miolo (em formato de onda) e a capa ou o forro inferior. Este papelão tem cerca de 3,8 mm de espessura, e é muito utilizado para moldes, maquetes, divisórias de produtos em embalagens etc.

3.2.3. Programas gráficos de modelagem tridimensional

Dentre as várias opções disponíveis no mercado (AutoCAD, Inventor e 3DS Max, da Autodesk; Rhinoceros; Solid Edge, da Siemens; SolidWorks, da Dassault Systèmes), optou-se por utilizar o SolidWorks 2015, para a modelagem tridimensional dos modelos virtuais, pelas seguintes razões: familiaridade da pesquisadora com este programa; facilidade em modelar chapas poligonais de espessura contínua; facilidade em modelar o conjunto das peças e atualizar as medidas a partir dos desenhos iniciais que as compõem; possibilidade de simular movimentações das peças, importante para avaliar a eficácia ou não do desenho adotado; possibilidade de detectar colisões entre as peças antes, como se fossem modelos físicos. Também adotou-se o CorelDRAW X6 para o desenho dos modelos escolhidos, e para a

transposição dos desenhos do SolidWorks para os softwares de Prototipagem Rápida. Esses programas foram executados em computador com Processador Intel Core i5, memória RAM de 6 GB e Sistema Operacional de 64 Bits, Windows 8.1 Single Language.

3.2.4. Articulações

Conforme descrito no capítulo anterior, verificou-se a adoção de três estratégias de articulação em produtos com material rígido: tecido, pino e dobradiça. Como o tecido já foi utilizado em uma pesquisa com múltiplos "Vs", assim como o pino metálico, para essa pesquisa selecionou-se a dobradiça, pela variedade disponível no mercado e pela relativa facilidade construtiva.

3.2.5. Tecnologias de prototipagem

As tecnologias de prototipagem rápida começaram a surgir nas últimas duas décadas para construir modelos físicos a partir de dados de um projeto auxiliado por computador (CAD). A construção de protótipos dos modelos virtuais selecionados para esta pesquisa é parte essencial pois possibilita a análise da sua forma final, das dimensões, da estética visual e da funcionalidade das articulações. Existem muitas vantagens na adoção de tecnologias de prototipagem rápida: rapidez, precisão, acabamento e adequação ao projeto.

No CADEP - Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos da UNESP de Bauru, existem equipamentos que executam dois tipos de prototipagem rápida (por adição ou por redução de material). Para essa pesquisa, selecionou-se a Router CNC 3D Transform 2000, uma fresadora precisa para a usinagem com subtração (corte, desbaste, gravação etc) de chapas de vários materiais, como madeira e MDF. No entanto, não havia referências no CADEP do uso dessa tecnologia com BLaC.

Outro equipamento selecionado foi a Rolland MDX 540 com quarto eixo rotacional ZCL 540. Esse sistema de prototipagem rápida por subtração de material apresenta um excelente desempenho e facilidade de operação e produz diversos tipos de modelos, protótipos e moldes com a configuração de três eixos (comprimento, largura e altura) e um quarto eixo rotacional, que permite a usinagem de objetos a 360°.

Apresentam-se, a seguir, os equipamentos e instrumentos utilizados do CADEP:

- Computador desktop com Processador Intel Core2Duo, memória RAM de 4 GB e Sistema Operacional de 64 Bits, Windows 7 Home Premium
- Software Aspire
- Software Mach3 CNC Controller
- Router CNC 3D Transform 2000/2 com mesa de 2.550 mm x 1.850 mm
- Fresa de topo de 3 mm de diâmetro com área de corte de 12 mm e corpo de 38 mm na Router
- Fita adesiva VHB (*Very High Bond*) da 3M
- Rolland MDX 540 (volume máximo de trabalho = 500 mm x 400 mm x 155 mm)
- Fresa frontal de canais de topo reto de 6 mm para desbaste na Rolland
- Fresa *ball nose* de 6 mm para acabamento na Rolland

3.2.6. Registro

Câmera fotográfica para registro das várias etapas de desenvolvimento da pesquisa

3.3. Procedimentos da pesquisa

3.3.1. Definição dos tipos de dobra e de corte

Por meio da revisão bibliográfica, foram encontradas estruturas em origami e *kirigami* que possuem a característica *flat foldability*, ou seja, todas as suas faces ou planos poligonais dobram entre si, fechando-se completamente em achatamento. Observou-se também que essa característica só é possível se forem observadas condições especiais de determinação geométrica com esse objetivo, também apresentados anteriormente. E para completar, se o material é rígido, a estrutura não pode depender da sua deformação para ser flexível.

Sendo assim, foram selecionadas da Tabela 1 apenas as estruturas potencialmente *flat foldable* (mesmo aquelas com restrições) e detectaram-se as técnicas que foram aplicadas em produtos de madeira ou de bambu, se estes eram articulados e qual seria a estratégia a ser utilizada (Tabela 3).

Tabela 3 - Ocorrências dos tipos de dobras básicas em produtos

Tipo de Dobra	Variação	Flat Foldable	Exemplos em madeira ou bambu	Articulados	Tecido/Pino /Dobradiça
Sanfona	Linear	Sim	X	X	Dobradiça
	Rotacional	Sim	-----	-----	-----
	Cilíndrica	Com restrição	-----	-----	-----
	Cônica	Com restrição	-----	-----	-----
Navalha	Linear	Sim	-----	-----	-----
	Rotacional	Sim	-----	-----	-----
	Cilíndrica	Com restrição	-----	-----	-----
	Cônica	Com restrição	-----	-----	-----
Platô	Linear	Sim	-----	-----	-----
	Rotacional	Sim	-----	-----	-----
	Cilíndrica	Com restrição	-----	-----	-----
	Cônica	Com restrição	-----	-----	-----
Progressiva	Linear	Sim	-----	-----	-----
	Rotacional	Sim	-----	-----	-----
	Cilíndrica	Com restrição	-----	-----	-----
	Cônica	Com restrição	-----	-----	-----
Espiral	Simplex	Sim	-----	-----	-----
	Caixa	Com restrição	-----	-----	-----
Dobra-V	Simétrica	Sim	-----	-----	-----
	Assimétrica	Com restrição	-----	-----	-----
	Coexistência de Vs	Com restrição	-----	-----	-----
	Múltiplos Vs	Com restrição	X	-----	-----
	Superfícies Complexas	Com restrição	X	X	Tecido
Arcos Dobráveis	Forma-X	Sim	X	-----	-----
	Dobra-V	Sim	X	-----	-----

Fonte: Elaborada pela autora

A mesma seleção foi feita a partir da Tabela 2 com todos os tipos de cortes e dobras (todos são *flat foldable*, observando as condições para isso) e detectou-se que nenhuma técnica foi aplicada em produtos de madeira ou bambu, com exceção de uma variação da técnica da asa presente no projeto de Van Embricqs (Tabela 4).

Tabela 4 - Ocorrências dos tipos de corte e dobra básicos em produtos

Quantidade de Peças	Tipo de Corte e Dobra	Variação	<i>Flat Foldable</i>	Exemplos em madeira ou bambu	Articulados	Tecido/Pino /Dobradiça
Peça única	Um corte contínuo	Simétrico	Sim	-----	-----	-----
		Assimétrico	Sim	-----	-----	-----
		Gerações de Corte	Sim	-----	-----	-----
		Desvios	Sim	-----	-----	-----
	Corte Duplo	Simétrico	Sim	-----	-----	-----
		Assimétrico	Sim	-----	-----	-----
		Gerações de Corte	Sim	-----	-----	-----
		Desvios	Sim	-----	-----	-----
	Múltiplos Cortes	-----	Sim	-----	-----	-----
	Degraus	-----	Sim	-----	-----	-----
	Asas	-----	Sim	Sim	Sim	Dobradiça
Múltiplas Peças	V-Horizontal	-----	Sim	-----	-----	-----
	Caixa Diagonal	-----	Sim	-----	-----	-----
	Caixa Quadrada	-----	Sim	-----	-----	-----
	Treliças	-----	Sim	-----	-----	-----

Fonte: Elaborada pela autora

Analisando-se essas tabelas, verificou-se que, das quatro dobras básicas (sanfona, navalha, caixa e progressiva), apenas a dobra sanfona linear foi utilizada em produtos de madeira ou de bambu com articulação de dobradiça. Não foram empregados a dobra espiral, variações de Dobra-V e os Arcos Dobráveis.

Como as dobras básicas são muito simples, optou-se por escolher dentre as que permitissem um exercício mais desafiador em termos de projeto e complexidade de dobras, como a Dobra-V e algum Arco Dobrável. Nesse sentido, selecionou-se para essa pesquisa os padrões mais famosos dessas duas categorias: **Miura-Ori** e **Padrão Yoshimura**.

Em relação às técnicas de corte e dobra, percebeu-se um grande potencial de experiências, já que nenhuma destas técnicas foi empregada com BLaC. Optou-se por escolher algumas técnicas dentre as elaboradas a partir de apenas uma peça e outras elaboradas por múltiplas peças. Assim, no primeiro grupo encontra-se a **técnica de múltiplos cortes com desvio (modalidade 90°)**, e no segundo grupo, a **técnicas da caixa paralela (modalidade 180°)**, acreditando que elas possuem o potencial formal de serem adaptadas posteriormente em produtos. Embora seja uma variação das técnicas de corte e dobra básicas, também elaborou-se uma estrutura da **modalidade 360°**, utilizando a **técnica da caixa diagonal**.

Com esta escolha, buscou-se obter uma variedade de modelos em que possam ser testados os limites e as possibilidades do design *orikiri* em BLaC, e que sirvam de base para a criação de novos modelos a partir das técnicas de combinações e variações apresentadas no capítulo anterior.

3.3.2. Definição da espessura da placa de BLaC

De acordo com a revisão bibliográfica, foram detectadas no mercado placas de BLaC de diferentes espessuras (entre 3 e 38 mm) que atendem a diferentes aplicações (revestimentos, pisos, móveis etc.). Como esta pesquisa buscou realizar experimentos com esse material para sua futura aplicação no design de produtos de modo geral, foram selecionadas inicialmente três espessuras diferentes para serem trabalhadas, visando abranger uma gama maior de possibilidades de aplicação: 3 mm, 10 mm e 20 mm. Essas espessuras seriam testadas em modelos físicos para cada uma das técnicas de dobra e de corte selecionadas, o que geraria um total de 15 protótipos.

No entanto, a fim de buscar uma solução mais ecológica e econômica, adotou-se o seguinte procedimento: as diferentes espessuras de placas seriam testadas virtualmente após a constatação de que o desenho do modelo funcionaria com apenas uma espessura, evitando-se, assim, o corte de uma grande quantidade de colmos de bambu e otimizando-se

o tempo. Assim, seria necessário selecionar apenas uma espessura de placa, que seria o suficiente para: testar a funcionalidade dos desenhos gerados virtualmente e se eles se comportariam da mesma maneira; testar o processo de usinagem desse material em relação aos desenhos gerados; observar e analisar o processo de montagem dos modelos com as dobradiças escolhidas. Assim, definiu-se a espessura intermediária dentre as três anteriormente cogitadas (10 mm) para os modelos físicos e a maior espessura (38 mm) seria testada somente nos modelos virtuais.

O próximo passo seria determinar como essa espessura seria obtida por diferentes colagens das ripas: vertical, horizontal ou em direções invertidas. Somente uma camada de ripas coladas na horizontal poderia romper-se facilmente devido à área de colagem insuficiente. Camadas de ripas coladas na vertical aumentariam essa resistência mecânica, mas a placa ficaria muito pesada. Três camadas de ripas em direções invertidas só valeriam a pena quando a espessura fosse maior. Assim, decidiu-se trabalhar com duas camadas de ripas coladas na horizontal em direções invertidas, para diminuir o risco de ocorrer rompimento nas linhas de colagem, para dar uma diferenciação na textura visual entre as faces (que poderia facilitar a montagem) e para manter a planura do material.

3.3.3. Definição do tipo de dobradiça

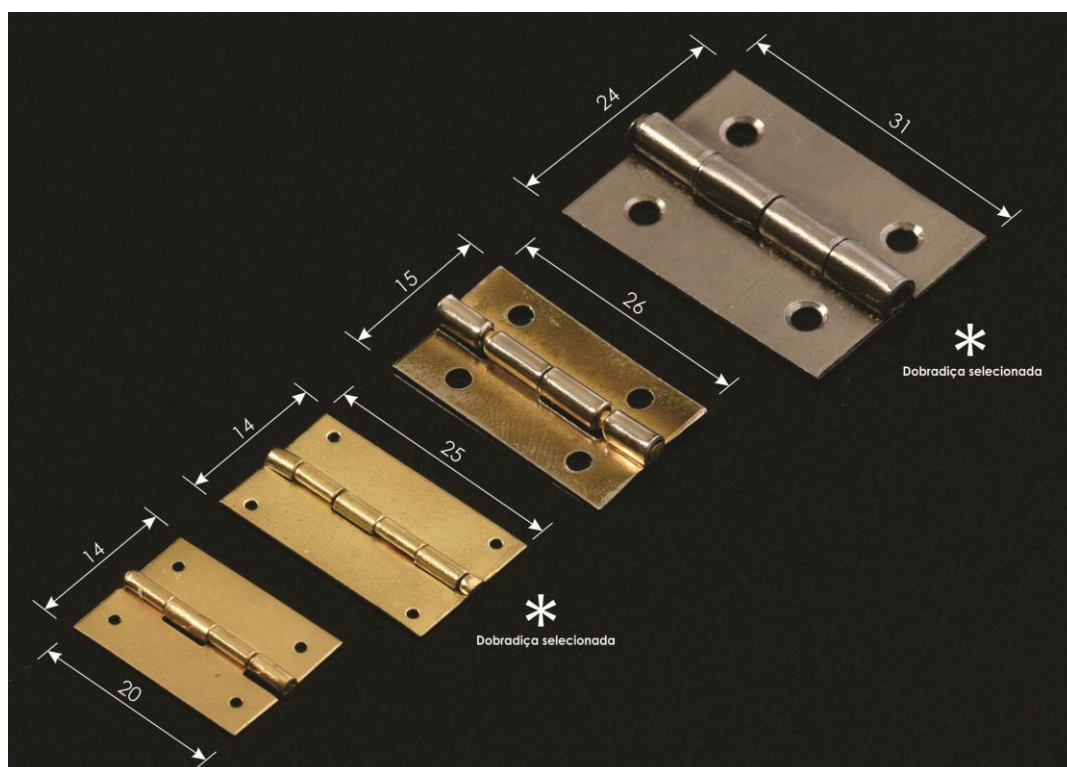
Sendo definidos os tipos de dobra e de corte a serem pesquisados e a espessura da placa de BLAc, era preciso escolher que tipo de dobradiça seria utilizada. Embora exista uma grande variedade de dobradiças no mercado, a maior parte delas é desenvolvida para espessuras superiores. A dobradiça de piano é a mais fina, atendendo uma espessura mínima de 16 mm, porém seu longo comprimento (2000 mm) precisaria ser adequado constantemente ao das placas dos modelos, o que aumentaria em muito o tempo de montagem das placas.

Para placas de 10 mm, foram encontrados três tipos de dobradiça pequena, de latão, bronze e aço. Entre elas, selecionou-se a de latão, com acabamento em ouro, dimensões 14 mm x 25 mm, muito utilizada em caixas e pequenos objetos de madeira, por ter o melhor acabamento visual e pela menor espessura de dobradiça (figura 106). Apesar de não apresentar muita resistência mecânica, ela seria capaz de exercer bem a função de "dobra" nos modelos físicos apenas como experimento. Posteriormente, essa dobradiça pode ser

substituída por qualquer outra à medida que aumente a espessura das placas ou que se mude o local de fixação das mesmas (não mais pelo topo das placas mas pelas faces).

Para as duas últimas estruturas, selecionou-se a dobradiça 24 mm x 31 mm com parafusos autoatarraxantes de cabeça chata, Phillips RI, de 2,2 mm x 9,5 mm zincado branco, a fim de observar a fixação das mesmas nas placas e se haveriam alterações no processo de montagem.

Figura 106 - Dimensões de algumas das menores dobradiças disponíveis no mercado



Fonte: Elaborada pela autora a partir de foto de Ricardo K. Yamada

3.3.4. Etapas dos procedimentos experimentais

As variáveis da pesquisa ficaram definidas da seguinte maneira:

- Tipos de dobra e de corte: Miura-Ori, Padrão Yoshimura, Múltiplos Cortes com Desvio - Modalidade 90°, Caixa Quadrada - Modalidade 180° e Caixa Diagonal - Modalidade 360°
- Espessura das placas: 10 mm (modelos físicos) e 38 mm (modelos virtuais)
- Colagem das ripas: duas camadas coladas na horizontal em direções invertidas
- Tipo de dobradiça: pequena (14 mm x 25 mm e 24 mm x 31 mm)

Como procedimento experimental, iniciou-se com a **criação de modelos físicos iniciais em papel**, consistindo do estudo exploratório tridimensional dos modelos escolhidos em papel sulfite e papelão micro-ondulado a fim de analisar sua geometria e auxiliar na etapa seguinte, da **criação de modelos virtuais**. Nesta fase, ocorreu a aplicação da geometria observada nos modelos físicos em papel na etapa de modelagem tridimensional no programa SolidWorks para a observação das possibilidades e das limitações de sua adequação em maior espessura e material rígido, assim como para executar simulações de movimento dos modelos. Concomitantemente a esta etapa, foi realizada a **colheita de bambu e produção de placas de BLaC**, quando colmos de bambu foram colhidos, processados e transformados em placas de BLaC para serem utilizados na etapa de **criação de modelos físicos em BLaC**. Esta etapa consistiu na geração de modelos definitivos, a partir dos dados obtidos dos modelos virtuais, para a usinagem do BLaC. Neste momento foram observados: o comportamento do bambu ao ser submetido à Router CNC e à Rolland; o tempo de usinagem relativo ao desenho das peças; a exatidão e o acabamento da usinagem. Em seguida, efetuou-se a montagem dos modelos com as peças usinadas e com as dobradiças a fim de observar as vantagens e as desvantagens da estratégia do design *orikiri* em relação à montagem, bem como confrontar a simulação física com os dados da simulação virtual. Também foi realizado o teste virtual com os modelos aplicando-se a espessura de 38 mm às placas. Por último, foram analisados os dados obtidos como sendo de caráter "comportamental":

- Como o BLaC se comportou no processo de de montagem dos modelos físicos?
- As técnicas de dobra e de corte selecionadas se comportaram no BLaC da mesma maneira que no papel?
- Os modelos físicos se comportaram da mesma maneira que os correspondentes modelos virtuais?
- A modificação na espessura das placas acarretou na alteração na geometria do modelos para preservar *flat foldability*?

Após as análises, foram destacados as possibilidades e os limites de aplicação das técnicas de corte e de dobra baseadas no origami e no *kirigami* em estruturas *flat foldable* de BLaC.

Cumprindo ressaltar que as etapas em sequência da criação de modelos físicos em papel, da modelagem virtual dos mesmos no SolidWorks, da usinagem e montagem em BLaC foram apresentadas dentro de cada experimentação com as técnicas de dobra e de corte selecionadas. Isso para que a linha de raciocínio e desenvolvimento pudesse ser apresentada claramente dentro de cada especificidade dos modelos trabalhados. Assim, antes de iniciar com a apresentação dos resultados e as análises, segue-se com o relato da produção das placas de BLaC utilizadas nesta pesquisa.

3.3.5. Colheita e Produção das Placas de BLaC

Das espécies de bambu recomendadas para a produção de BLaC, escolheu-se a *D. asper*, pelas suas características adequadas à produção de ripas de espessura adequada e pela sua disponibilidade no campus da UNESP de Bauru, onde foi realizada essa pesquisa. A colheita foi feita na Área Experimental Agrícola do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, no período do inverno, estação do ano predominantemente seca, pois os colmos apresentam menor teor de umidade, tornando-se mais leves e facilitando o transporte. Além desse fato, como há menor quantidade de seiva circulando e menor teor de amido, os colmos são menos suscetíveis ao ataque de fungos e insetos. O corte foi feito com moto-serra e serrote, sendo colhidos no total quatro colmos maduros com idade entre 3 e 6 anos (figura 107).

Figura 107 - Moita de *D. asper*; corte com a moto-serra; colmos cortados em menor comprimento para transporte



Fonte: Elaborada pela autora

Após remover os ramos e cortar os colmos em seções menores em comprimento adequado para o tanque de tratamento (cerca de 90 cm), eles foram transportados ao Laboratório de Experimentação com Bambu e passaram por um tratamento preventivo de imersão por 15 minutos em tanque com solução de octaborato de sódio, na concentração de 8% a 10% em solução aquosa, e deixados para secar ao ar (figura 108). Essa quantidade de colmos colhidos foi calculada tendo como base a previsão da produção por colmo de 60 ripas de 90 cm de comprimento por 2,5 cm de largura. Assim, para os cinco modelos escolhidos, seriam necessárias de cinco a seis placas de 90 cm x 90 cm.

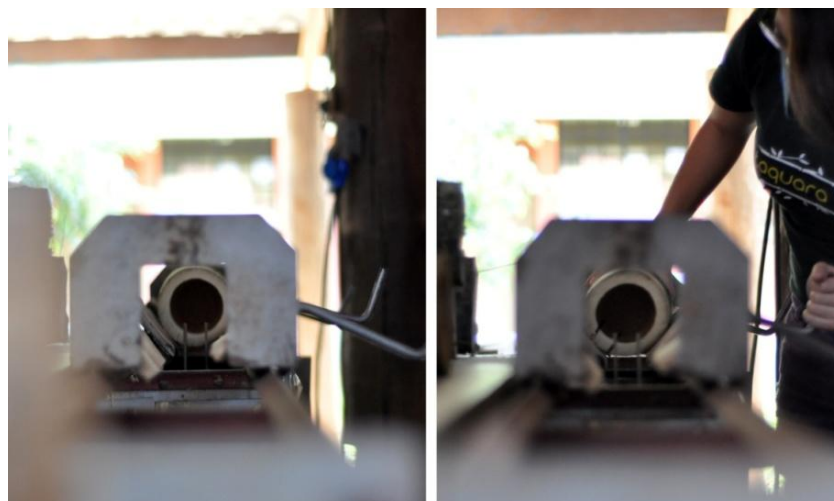
Figura 108 - Colmos no tanque para tratamento preventivo e secagem



Fonte: Elaborada pela autora

Ao iniciar a etapa seguinte de processamento dos colmos, os alunos integrantes do Projeto Taquara auxiliaram na produção das ripas, refilando todas as seções em serra refiladeira dupla, produzindo cerca de 6 a 8 ripas por seção do colmo (figuras 109 e 110).

Figura 109 - Detalhe da posição das lâminas de corte da refiladeira dupla na seção do colmo



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara

Figura 110 - Seção de colmo e aproveitamento em ripas



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara

Em seguida, as ripas foram separadas manualmente rompendo-se os diafragmas, e passaram novamente por tratamento de prevenção por meio da imersão em tanque por 15 minutos na solução de octaborato de sódio (8%), sendo posteriormente colocadas para secarem ao ar (figura 111). Após a secagem, as ripas foram levadas para a retirada das protuberâncias causadas pelos nós (externamente) e diafragmas (internamente) na serra circular de bancada (figura 112).

Figura 111 - Tratamento das ripas e secagem



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara

Figura 112 - Corte das protuberâncias das ripas



Fonte: Elaborada pela autora

Concluída a limpeza superficial das ripas, deu-se início à laminação das ripas, com o esquadreamento na plaina duas faces própria para bambu (figura 113). Assim, foram feitos os ajustes das laterais paralelas das ripas e a retirada das camadas mais internas e externas, com o objetivo de atingir a planura desejada. Como as espessuras das seções dos colmos variam de acordo com a localização dos mesmos em relação à altura do bambu (mais grossa na base e mais fina no topo), o ajuste final foi feito visando um melhor aproveitamento de todo o material e evitando-se o desperdício. Assim, as ripas mais finas também foram aproveitadas para compor com as mais grossas, resultando em espessuras de 5 mm a 7 mm.

Figura 113 - O processamento da ripa na plaina duas faces



Fonte: Elaborada pela autora

Após o esquadreamento, as ripas foram selecionadas de acordo com as espessuras, e coladas lado a lado na horizontal formando uma simples camada, com cola PVA de madeira na gramatura 300 g/m² e tomando o devido cuidado para os nós não se alinharem, por apresentarem, nesse caso, o maior grau de fragilidade na lâmina (figura 114). As ripas ficaram prensadas por 24 h a 1,5 MPa, pressão recomendada pelo fabricante da cola.

Figura 114 - Colagem e prensagem das ripas laminadas



Fonte: Elaborada pela autora

Após a colagem, as placas passaram por uma desengrossadeira a fim de desbastar as irregularidades e aplainar o BLaC em uma espessura uniforme desejada (figuras 115 e 116). Porém, como a plaina desengrossadeira do Laboratório de Experimentação com Bambu possui a largura máxima de 40 cm, não seria possível passar as placas previstas no tamanho 90 cm x 90 cm. Assim, elas foram inicialmente cortadas na serra circular de bancada na largura máxima de 30 cm.

Figura 115 - Entrada da placa de desengrossadeira (esquerda) e sua aplainagem (direita)



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 116 - As placas antes e depois de passarem na plaina desengrossadeira



Fonte: Elaborada pela autora

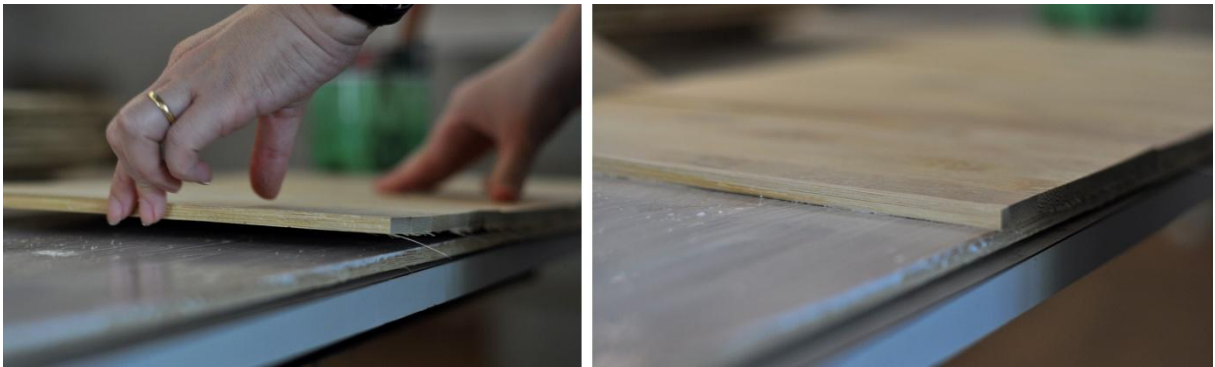
Com as placas coladas e aplainadas em uma camada simples, foi preciso acertar suas medidas na serra circular de bancada para a posterior colagem na direção invertida da segunda camada (figuras 117 e 118). Buscou-se o aproveitamento máximo de todas as partes e a colagem das placas mais finas com as mais grossas, a fim de obter a espessura final desejada de 10 mm.

Figura 117 - Corte na serra circular de bancada para ajustes



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara

Figura 118 - Colagem das camadas



Fotos: Marcos Takeshi Matsumoto - Projeto Taquara

Após a colagem das placas, elas foram levadas para um equipamento de prensagem 1,5 MPa por, no mínimo 24 h, para otimizar a adesão entre as lâminas, otimizando o processo (figura 119).

Figura 119 - Prensagem das ripas coladas



Fonte: Elaborada pela autora

No total, foram produzidas doze placas de BLaC com 10 mm de espessura, distribuídas da seguinte maneira de acordo com suas dimensões finais: cinco placas de 820 mm x 295 mm;

duas placas de 810 mm x 295 mm; uma placa de 795 mm x 290 mm; duas placas de 820 mm x 210 mm; uma placa de 805 mm x 210 mm; e uma placa de 420 mm x 210 mm. Acreditou-se que a modularidade das peças dos modelos previstos pode se adequar ao tamanho das placas, mesmo que as dimensões não sejam as inicialmente previstas, podendo ser um dos aspectos vantajosos do uso dos conceitos básicos do origami e do *kirigami*.

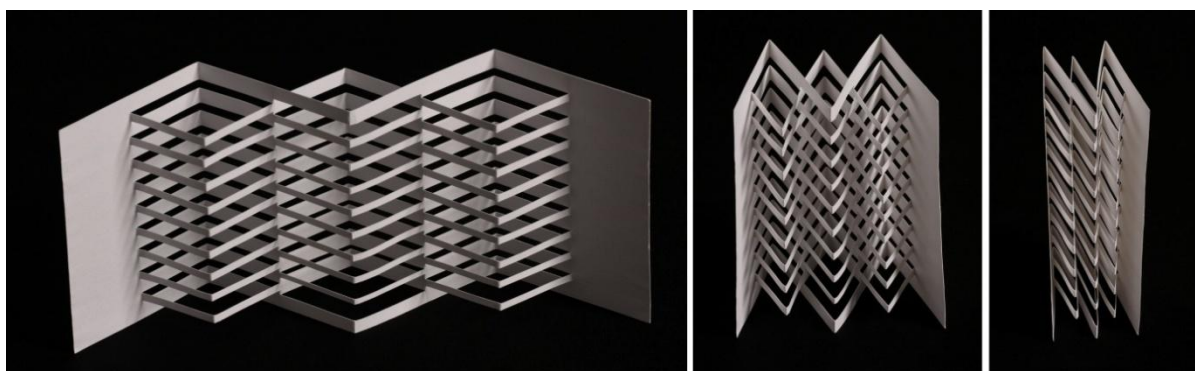
4. Resultados e análises

4.1. Kirigami 3D da modalidade 90° - Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio

Como foi anteriormente descrito no subcapítulo que trata das técnicas de corte e de dobra, os modelos de *kirigami* 3D podem partir apenas de uma única peça (uma folha de papel) ou da junção de múltiplas peças (várias folhas de papel). Esses que partem de apenas uma peça são, em sua grande maioria, os da modalidade 90°. A técnica selecionada para ser estudada nesta seção foi a Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio, ou seja, o modelo em papel parte de vários cortes efetuados, cujo formato sofre um desvio a fim de criar efeitos tridimensionais diversificados.

Analisando-se os modelos de Chatani que empregam esse tipo de técnica, a obra denominada "*Screen*" chamou a atenção pela simetria e regularidade entre as partes, pelos efeitos de luz e sombra gerados, e pelo movimento de abertura e fechamento. Além disso, esta obra empregou a alternância de três níveis de dobras vale e montanha, ao invés de apenas um (o tipo mais comum), em uma série de ângulos de 90°, conferindo o nível de complexidade adequado para esse experimento. Com o modelo físico em papel sulfite, foi possível observar melhor a geometria das peças e o movimento de interação entre cada uma delas, que gera uma relação total de interdependência (figura 120).

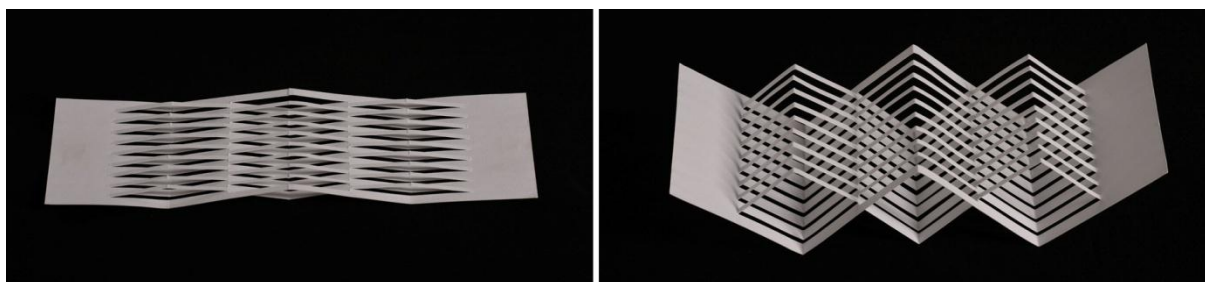
Figura 120 - Estudo do movimento entre as partes durante o fechamento



Fonte: Modelo de Chatani (1983). Execução: Thaís R. Ueno Yamada. Foto: Ricardo K. Yamada

Este modelo também é particularmente interessante pois permite um aproveitamento total do papel, sem ocorrerem desperdícios. Além disso, a cada olhar ou posicionamento da estrutura, abrem-se novas possibilidades para a sua aplicação (figura 121).

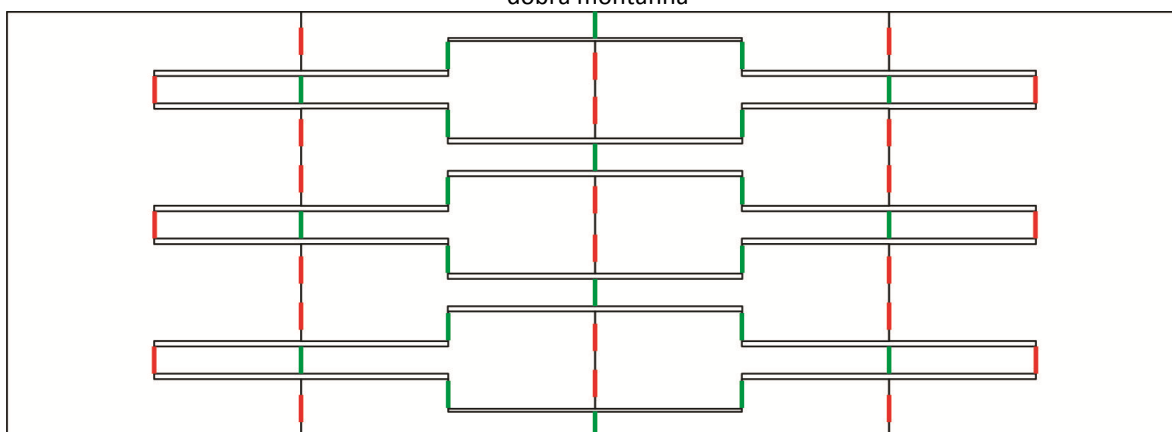
Figura 121 - Modelo aberto em 180° (esq.) e outro ponto de vista do modelo



Fonte: Modelo de Chatani (1983). Execução: Thaís R. Ueno Yamada. Foto: Ricardo K. Yamada

Analisando-se esse modelo em papel e visando à construção de um modelo físico, optou-se por não reproduzi-lo fielmente, mas eleger um tamanho ideal mínimo para que a estrutura pudesse ser compreendida como um conjunto uniforme, adaptando as dimensões das peças de acordo com as da dobradiça e com as dimensões das placas de BLaC produzidas. Dessa maneira, as medidas adotadas refletem o mínimo para que as peças se encaixem empregando a menor dobradiça existente no mercado. Assim, a partir desse experimento, pode-se aumentar proporcionalmente as dimensões da estrutura e empregar outras dobradiças. Na figura 122, está representada a estrutura com os locais previstos para colocação das dobradiças.

Figura 122 - Em vermelho, as dobradiças devem ser colocadas visando uma "dobra vale"; em verde, uma "dobra montanha"

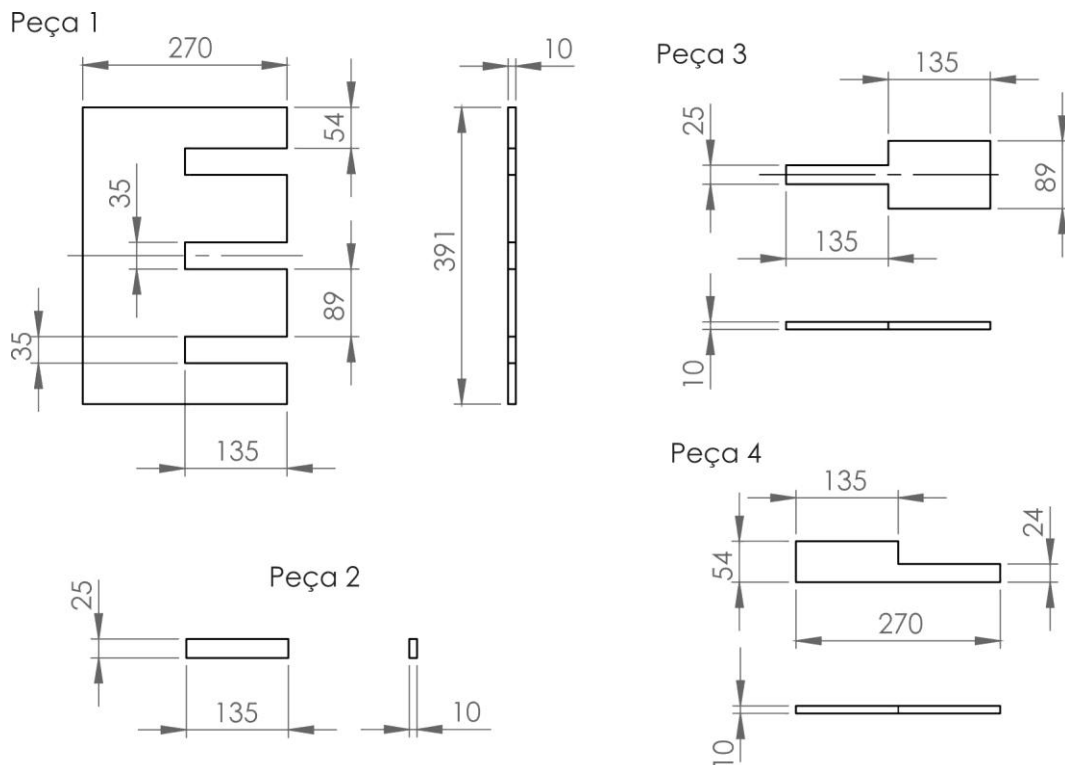


Fonte: Elaborada pela autora

Um outro dado muito importante, é que, de início, as dimensões das peças que compõem o modelo buscavam o total aproveitamento da placa de BLaC, assim como o próprio desenho do modelo aproveita integralmente o papel que o origina. Porém, para a

usinagem das placas na Router CNC, a recomendação é adotar uma distância mínima entre as peças de 5 mm, pois a fresa tem 3 mm de diâmetro. Procedendo-se dessa maneira e visando ao aproveitamento máximo das placas, as dimensões das peças foram ligeiramente reduzidas a fim de seguir essa recomendação (figura 123).

Figura 123 - Desenhos técnicos das peças do modelo (dimensões em mm e sem escala)



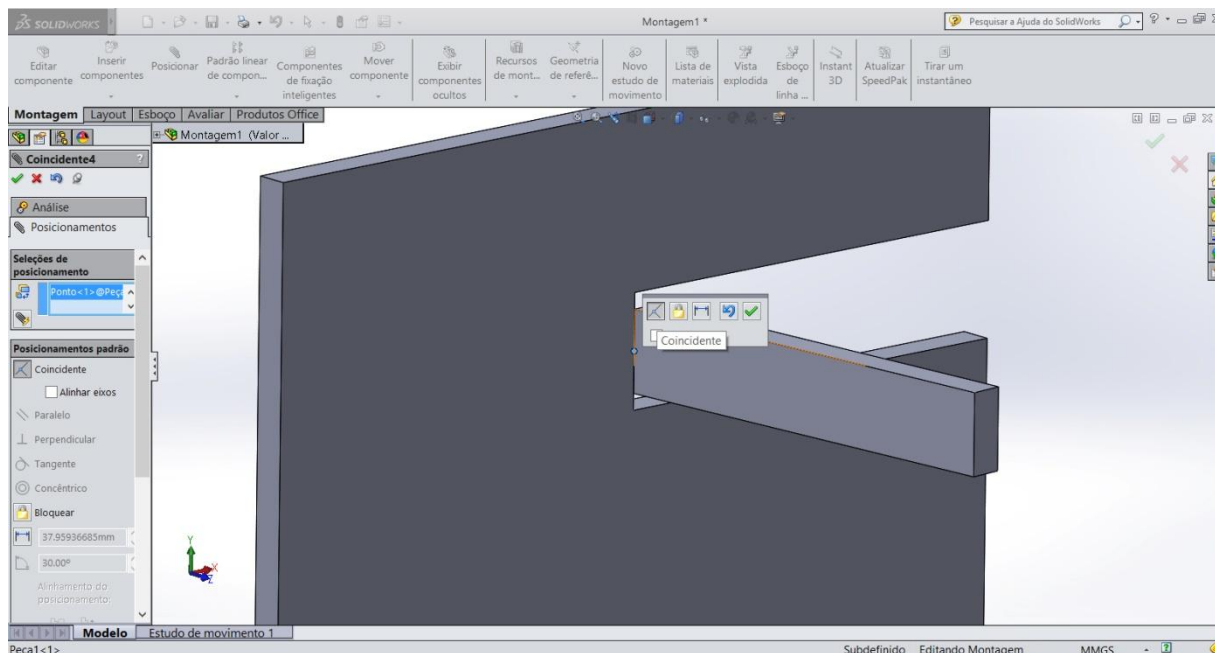
Fonte: Elaborada pela autora

Tendo-se definido as dimensões de todas as peças do modelo, procedeu-se com a modelagem tridimensional no SolidWorks de cada uma delas separadamente. Em seguida, abriu-se um novo documento que permite a montagem e organização 3D de duas ou mais peças ou montagens prévias. A partir desse momento, optou-se por trabalhar a relação entre as peças, por meio de sua geometria, a fim de atribuir a simulação do movimento de articulação. Também tomou-se o devido cuidado no posicionamento das articulações para criar o efeito de dobra vale ou de dobra montanha entre as peças.

Assim, posicionando a aresta de uma peça com a de outra de maneira que fossem coincidentes, foi possível estabelecer um movimento em torno desse eixo. No entanto, as peças se movimentavam livremente para cima e para baixo, sendo necessário acrescentar o

posicionamento coincidente também entre os pontos médios dessas arestas, fixando o movimento apenas para dentro e para fora (figura 124).

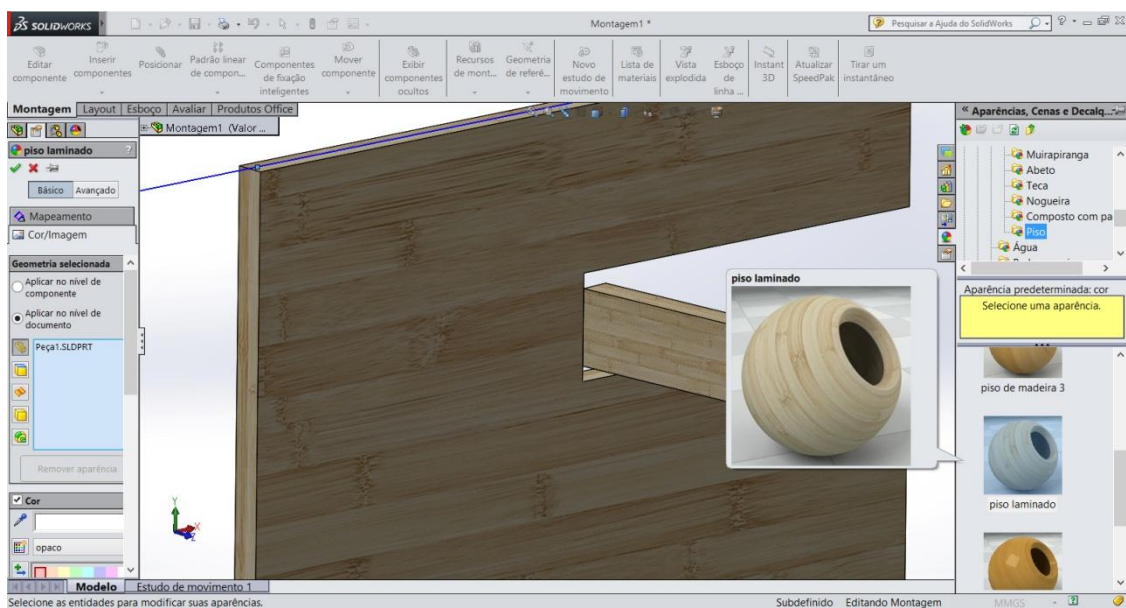
Figura 124 - Posicionamento coincidente entre as arestas de duas peças e seus pontos médios



Fonte: Elaborado pela autora

Após a resolução dessa questão principal, procedeu-se sucessivamente com o posicionamento entre as demais peças, finalizando então a montagem do modelo. Para mudar a textura visual das peças do modelo finalizado, procurou-se utilizar um material semelhante ao BLaC entre os disponibilizados pelo programa. Existem variadas opções de atribuição de aparência visual de materiais, como metais e não-metais, vidro e borracha. Entre as opções de materiais orgânicos, encontrou-se a madeira e o piso laminado, que correspondem visualmente ao BLaC (figura 125).

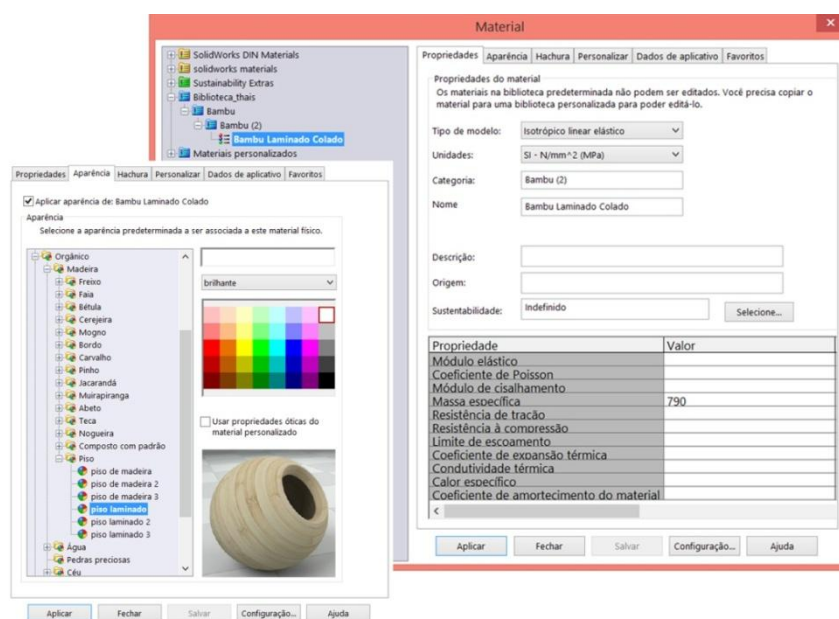
Figura 125 - Atribuição de aparência de material



Fonte: Elaborado pela autora

O SolidWorks possibilita não somente a edição e aplicação de uma aparência às peças modeladas, como também a edição de propriedades físico-mecânicas do material, atribuindo valores correspondentes de massa específica, resistências à tração e à compressão, entre outros, que possibilita efetuar testes físicos e mecânicos específicos com o modelo gerado no próprio programa com esses dados (figura 126).

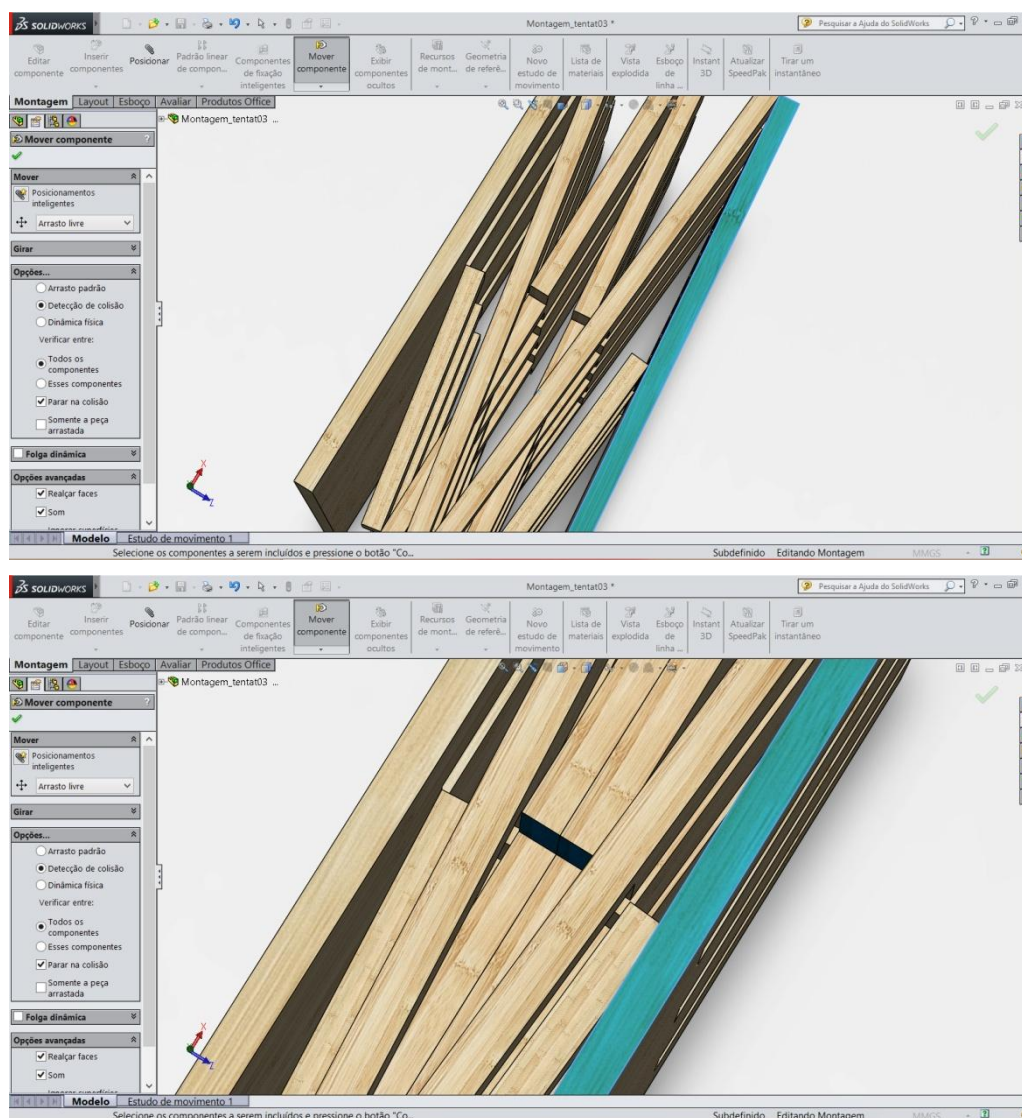
Figura 126 - Edição de propriedades do material



Fonte: Elaborado pela autora

Outro recurso muito útil do SolidWorks para a montagem do modelo foi a possibilidade de movimentar os componentes com detecção de uma possível colisão entre eles. Dessa maneira, o programa reconhece as peças como um material físico sólido, cujos limites se colidem ao movimentar o conjunto. Por meio do recurso de detecção de colisão, torna-se possível verificar o momento em que as peças do modelo se encontram, identificando visualmente o grau de fechamento máximo da estrutura (figura 127).

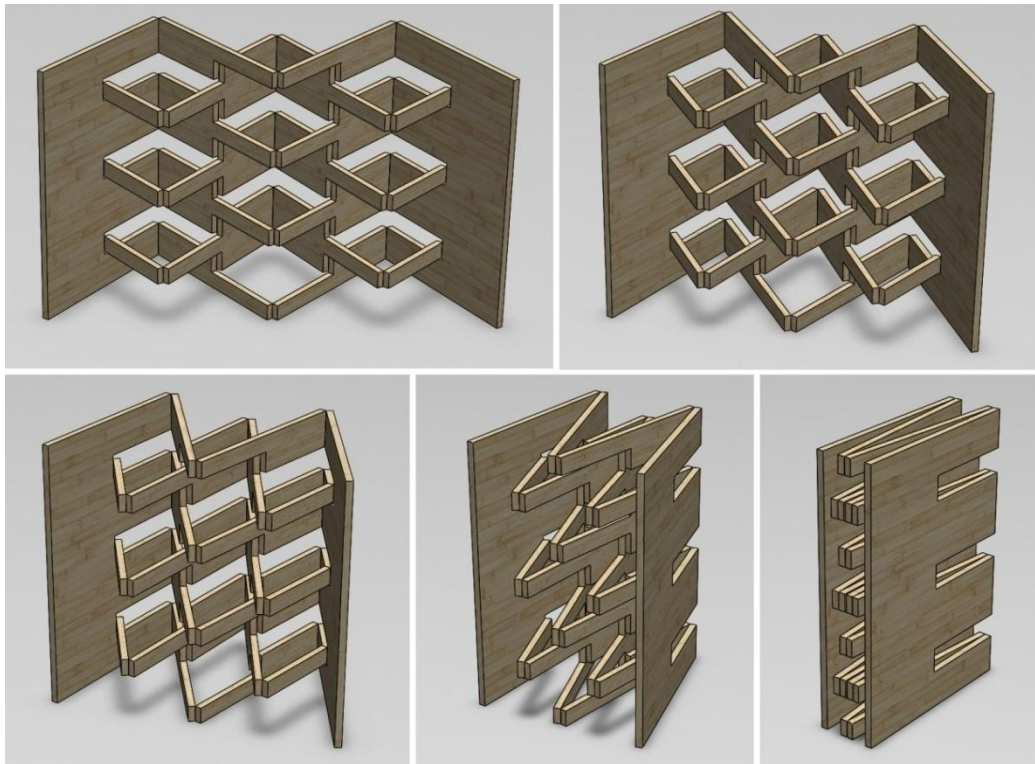
Figura 127 - Movimento dos componentes até o momento da colisão (faces realçadas em azul)



Fonte: Elaborado pela autora

Assim, tendo procedido com a montagem total das peças (componentes) e efetuado a análise de movimento com detecção de colisão, chegou-se à estrutura final, com diferentes ângulos de abertura e pontos de vistas (figuras 128 e 129).

Figura 128 - Fechamento da estrutura modelada



Fonte: Elaborado pela autora

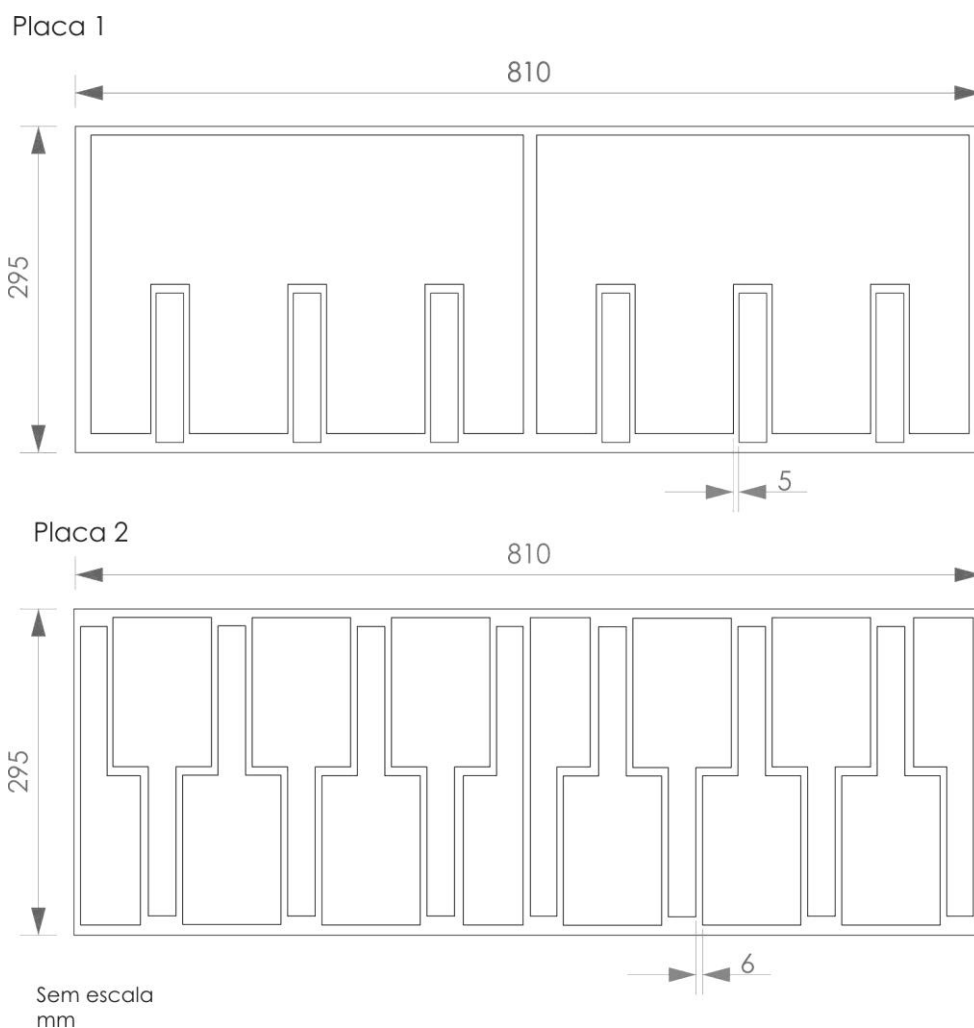
Figura 129- Observação da vista superior da estrutura montada, do seu movimento de abertura e fechamento



Fonte: Elaborado pela autora

Com o sucesso da experimentação no SolidWorks do modelo previsto, a etapa seguinte constituiu da usinagem das placas no CADEP. Para isso, efetuou-se a distribuição de todas as peças em duas placas de BLAc de 810 mm x 295 mm, adotando-se a distância mínima entre elas de 5 mm, conforme recomendação do próprio CADEP (figura 130).

Figura 130 - Distribuição das peças do modelo nas placas (dimensões em mm)



Fonte: Elaborada pela autora

Antes de iniciar a usinagem, as placas de BLaC foram fixadas na mesa com fita VHB para que as elas não se deslocassem durante o processo (figura 131). Para isso, distribuiu-se a fita em vários pontos, especialmente naqueles considerados mais críticos, ou seja, onde as menores peças seriam usinadas e separadas da peça maior ou da placa original.

Figura 131 - Fixação da fita VHB nas placas e na mesa



Fonte: Elaborado pela autora

Como não havia sido usinada nenhuma placa de BLaC na Router CNC, tomou-se a precaução de diminuir a velocidade de corte e executá-la em três etapas de profundidade, para não ocorrer quebras no material. Iniciando-se a usinagem, verificou-se que, quando a fresa passava paralela à direção das fibras do bambu, o acabamento era de melhor qualidade, mas quando ela passava transversalmente às fibras, muitos fiapos eram gerados e obtinha-se um acabamento de baixa qualidade. Como a placa era composta por duas camadas de ripas de bambu coladas em direções invertidas, o acabamento da usinagem variava também em relação às faces (figura 132). Assim, observou-se que, para usinar o bambu adequadamente, a fresa precisa ser nova. Talvez assim, ocorra uma diminuição de fiapos e melhore o acabamento.

Figura 132 - Acabamento da usinagem com fresa usada



Fonte: Elaborado pela autora

Mesmo adotando-se uma velocidade inferior e três etapas de profundidade, ocorreu o deslocamento de peças durante a usinagem, o que causou mudanças nas suas dimensões e na sua geometria, deixando algumas peças fora de esquadro, dificultando a posterior montagem. Isso pode ter ocorrido devido à pouca distância entre as peças (pois a usinagem desintegrou os meios de ligação) e pela quantidade insuficiente de fita VHB, principalmente na placa 2 (figura 130), onde havia maior quantidade de peças de menor tamanho. Esses fatores também podem ter sido os responsáveis pelo descolamento total de uma peça da mesa antes de terminar a usinagem do terceiro nível de profundidade. Além desses problemas, ocorreu o rompimento da cola entre as camadas de BLaC de apenas uma peça durante o processo, possivelmente pelo movimento da própria fresa ou pela colagem deficiente nessa área (figura 133).

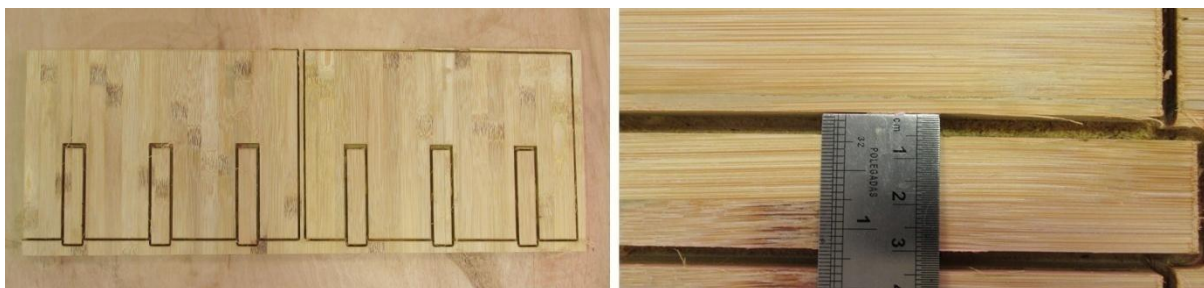
Figura 133 - Problemas ocorridos durante a usinagem



Fonte: Elaborado pela autora

De maneira geral, a primeira experiência de usinagem na Router CNC foi promissora. Os problemas que ocorreram podem ser minimizados e até mesmo eliminados com a adoção de medidas simples, melhorando ainda mais a exatidão desse método (figura 134). Mas a principal vantagem é a velocidade de processamento das peças. Adotando a velocidade de corte em 1400 rpm e a velocidade de avanço da ferramenta em 1.500 mm/s, a placa 1 foi usinada totalmente em 14 min 49 s, e a placa 2 em 22 min 59 s.

Figura 134 - Placa 1 ao final da usinagem. Detalhe da exatidão do processo



Fonte: Elaborado pela autora

Após a usinagem, todas as peças foram levadas à Oficina de Madeira da UNESP de Bauru, para a montagem do modelo físico. O primeiro passo foi corrigir os problemas ocorridos durante a usinagem para regularizar as dimensões e a geometria das peças. Feito isso, analisou-se o modelo de maneira geral antes da fixação das dobradiças (figura 135). Nesse momento, observou-se que, embora a espessura da dobradiça fosse bem fina, de cerca de 1,5 a 2 mm, essa diferença alteraria levemente as dimensões finais. Isso porque o modelo possui dois blocos que são montados simetricamente, gerando quatro blocos. Se não fosse corrigida essa diferença da dobradiça, os blocos não iriam se encaixar e nem a estrutura funcionaria conforme previsto. Assim, iniciou-se a montagem de cada bloco

separadamente, regularizando-se, posteriormente, todas as suas medidas na serra circular de bancada (figura 136).

Figura 135 - Montagem prévia do modelo antes de iniciar a fixação das dobradiças



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 136 - Fixação das dobradiças por blocos



Fonte: Elaborado pela autora

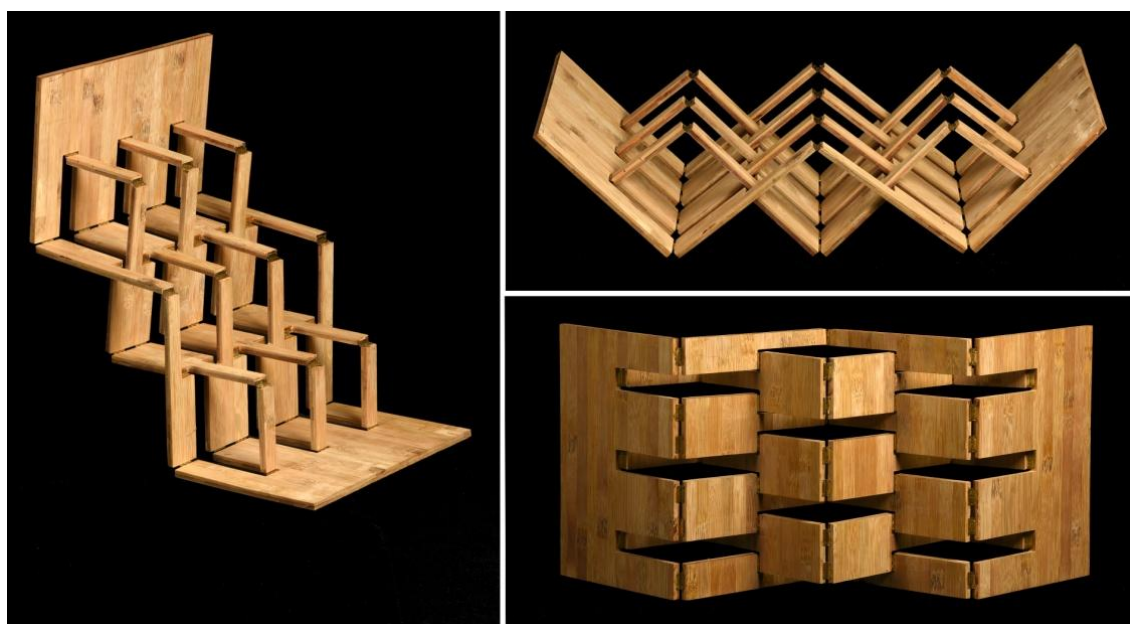
Procedendo dessa maneira, finalizou-se o modelo físico e pôde-se observar as semelhanças com o modelo virtual. Ocorreu o fechamento total de toda a estrutura conforme previsto no SolidWorks, e as peças se articularam entre si, gerando o mesmo movimento que foi obtido no modelo em papel (figuras 137 e 138).

Figura 137 - Modelo físico em BLaC



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

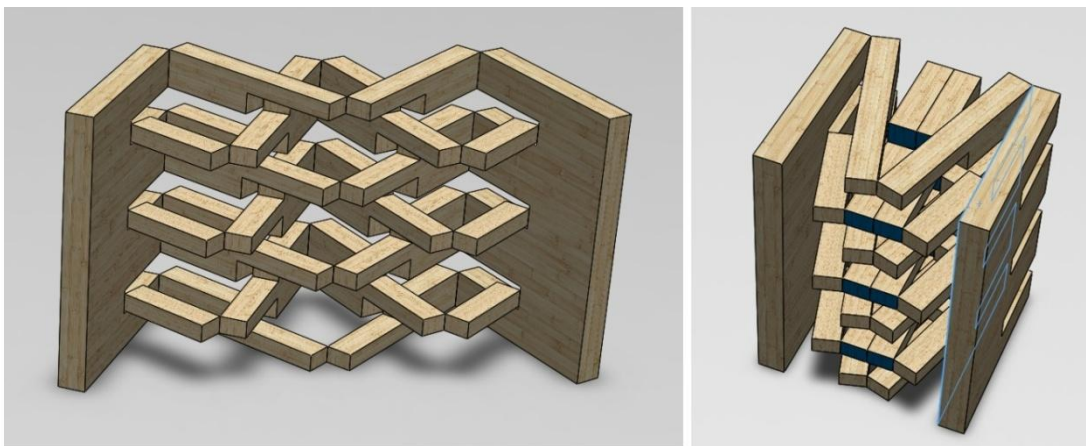
Figura 138 - Estudos de posicionamento do modelo físico



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Como o modelo físico se comportou semelhantemente ao modelo virtual com a espessura adotada, procedeu-se a um novo teste no SolidWorks adotando-se uma espessura maior no mesmo modelo, a fim de verificar se ocorreria alguma alteração por meio da modificação dessa variável. Assim, adotando-se 38 mm de espessura, a maior dentre aquelas verificadas para placas de BLaC disponíveis no mercado, e empregando-a nas peças componentes do modelo, verificou-se que a estrutura se comportou da mesma maneira, movimentando-se igualmente, e fechando-se totalmente nos mesmos pontos de colisão detectados na configuração anterior (figura 139).

Figura 139 - O mesmo modelo com 38 mm de espessura



Fonte: Elaborado pela autora

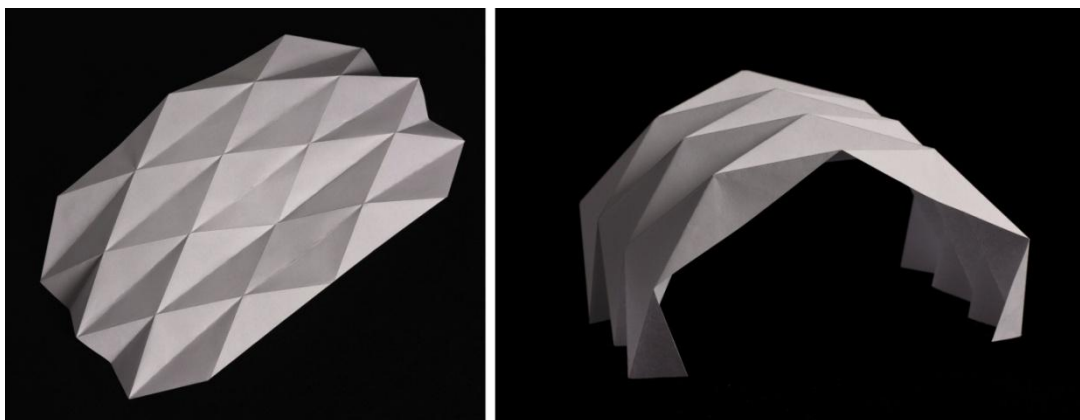
Acredita-se que para se obter um resultado mais preciso, seja necessário: prever a espessura da dobradiça para adequar todas as dimensões das peças antes da usinagem; obter-se maior precisão durante a usinagem, com uma fresa nova, com maior distância entre as peças; adotar-se maior quantidade de fita VHB para fixação ou máquinas dotadas de mesa à vácuo, que dispensariam o uso de qualquer outro tipo de fixação, ao mesmo tempo que garantiriam o pleno travamento de toda a placa, incluindo as peças usinadas (desde que esteja absolutamente plana a fim de permitir a completa ação do vácuo).

4.2. Padrão Yoshimura

O Padrão Yoshimura é constituído de um *grid* de Dobra-V, formando triângulos isósceles dispostos simetricamente, que, combinados, geram um arco totalmente dobrável em papel. O mais interessante desse padrão de dobra é que ele começa no plano bidimensional, cresce

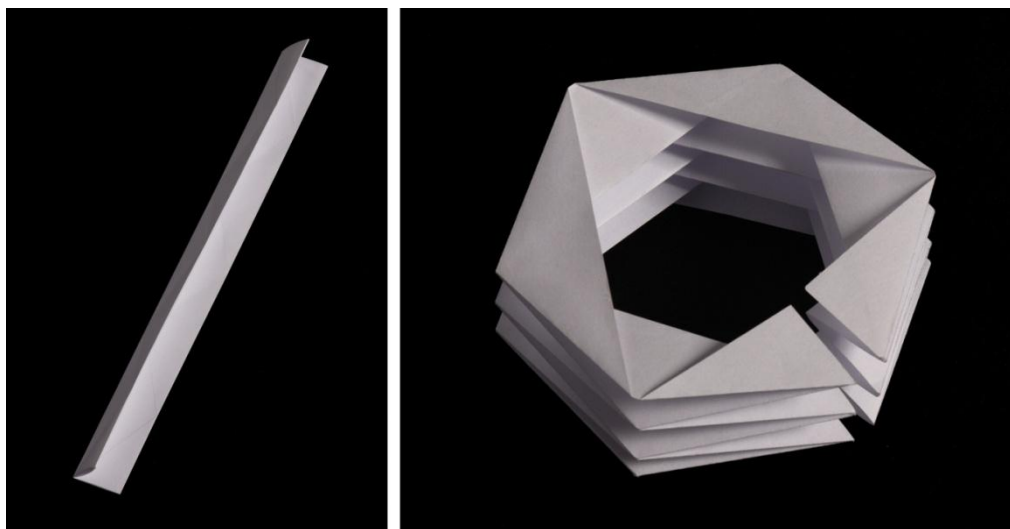
tridimensionalmente, e volta a se achatar, tanto como uma faixa fina dobrada quanto como um hexágono multifacetado (figuras 140 e 141).

Figura 140 - Padrão Yoshimura totalmente aberto e dobrado em arco



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 141 - Padrão Yoshimura em completo fechamento: tira fina retangular ou um hexágono multifacetado

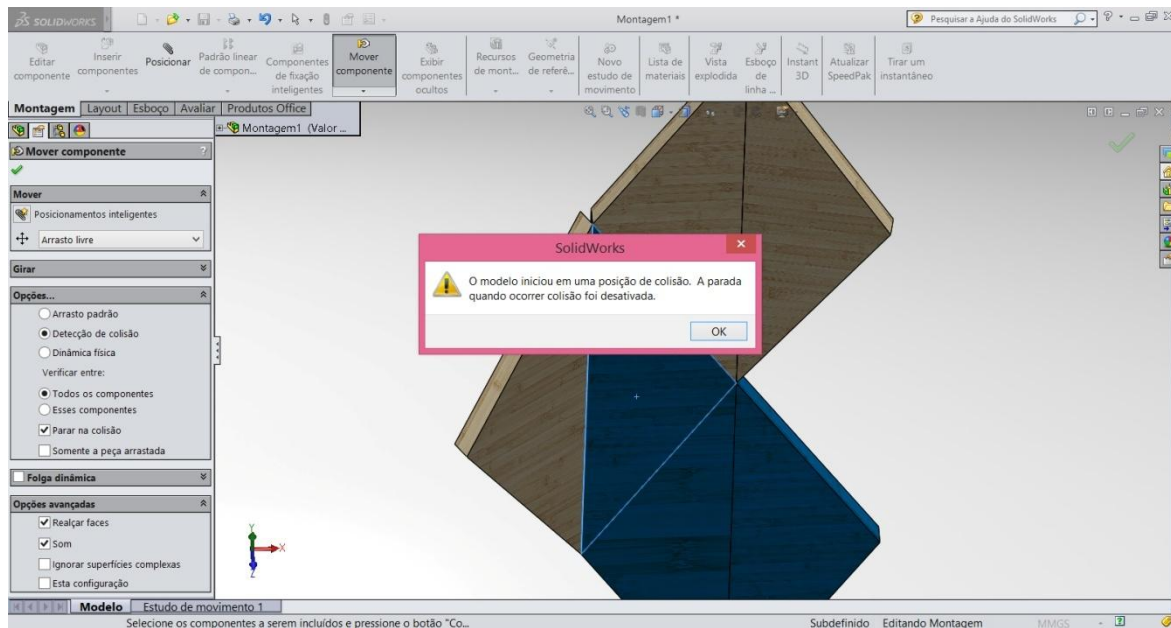


Fonte: Elaborado pela autora

Observando-se o modelo em papel, foi possível verificar detalhadamente a geometria das peças, e determinar a proporção adequada das mesmas para construir um modelo físico em BLaC ideal para a manipulação e análise da estrutura. Levou-se em consideração também as dimensões das placas selecionadas para esse modelo: uma placa de 820 mm x 295 mm e uma placa de 805 mm x 210 mm. Assim, iniciou-se a modelagem de um prisma reto de base formada por um triângulos isósceles, de medidas 25,2 mm (comprimento) x 7,28 (altura) x 10 mm (espessura). Porém, ao executar a montagem das peças componentes

da estrutura, foi detectada uma colisão que impossibilitava o movimento entre elas logo de início (figura 142). Ou seja, se as peças permanecessem com esta geometria, não haveria movimento algum entre elas.

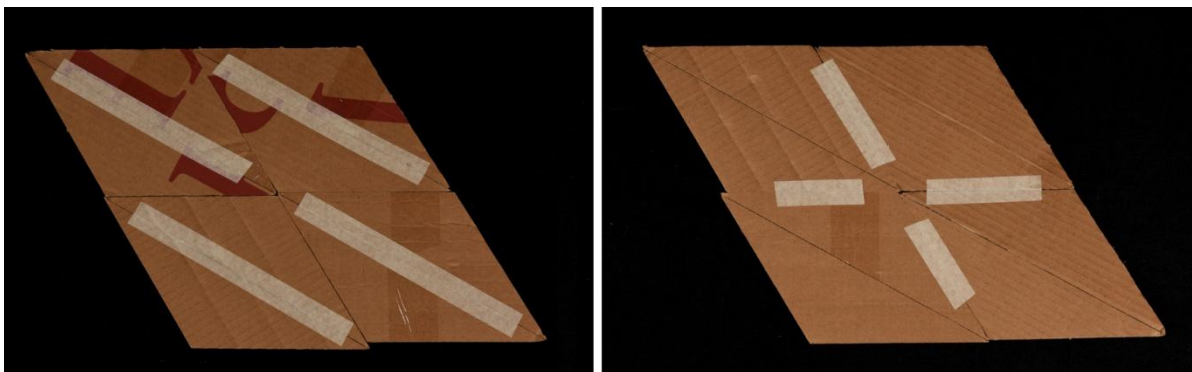
Figura 142 - Aviso de que o modelo se encontra em posição de colisão



Fonte: Elaborado pela autora

Partiu-se então para a criação de um modelo em papelão microondulado, na esperança de que sua espessura maior (3,8 mm) pudesse informar visualmente qual seria a impossibilidade apontada pelo SolidWorks. Assim, os triângulos foram cortados e fixados com fita crepe nos locais de dobra vale e de dobra montanha (figura 143).

Figura 143 - Modelo em papelão: locais de dobra vale (esq.) e montanha (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Verificou-se que o papelão se comportava exatamente como o papel, mas mostrava um importante dado durante o movimento de dobra do padrão Yoshimura. O ponto crítico era o vértice de onde partiam as várias Dobras-Vs. No papel, esse vértice é único, pois a espessura é mínima. No papelão, o vértice divide-se em seis, ou seja, a ponta de cada triângulo em torno desse ponto, deslocando-se ao fechar a estrutura, adequando-se ao deslocamento das placas e abrindo-se para um perfeito movimento (figura 144).

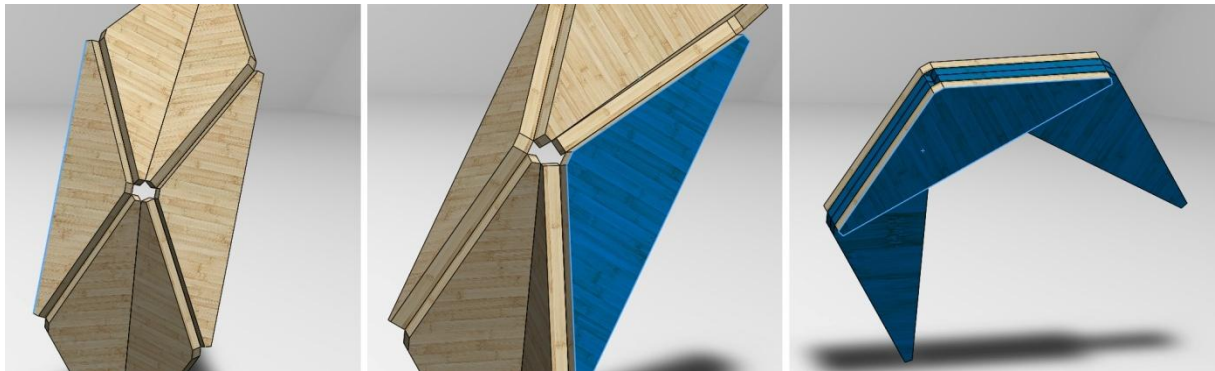
Figura 144 - Ponto crítico (em destaque) na dobra do Padrão Yoshimura durante o movimento de fechamento



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Como a estrutura possui uma espessura superior à do papel, e suas partes ficarão fixadas por dobradiças, ela nunca irá se movimentar se os vértices dos triângulos não sofrerem adequações. Assim, iniciou-se a busca por soluções para esse problema. Já que a ponta aguda se apresentava como uma barreira para a movimentação das peças, a ideia seria eliminá-la. Mas ainda havia a dúvida se seria o suficiente para uma solução definitiva. Assim, foi feito um corte em chanfro nos dois vértices da base do triângulo isósceles em questão. Combinando-se seis peças em torno de um ponto, a estrutura não se movimentou. Fazendo-se um chanfro em todos os vértices do triângulo e combinando-os novamente, o movimento foi executado perfeitamente até ocorrer o completo fechamento da estrutura, quando foi detectada a primeira colisão entre as peças componentes (figura 145).

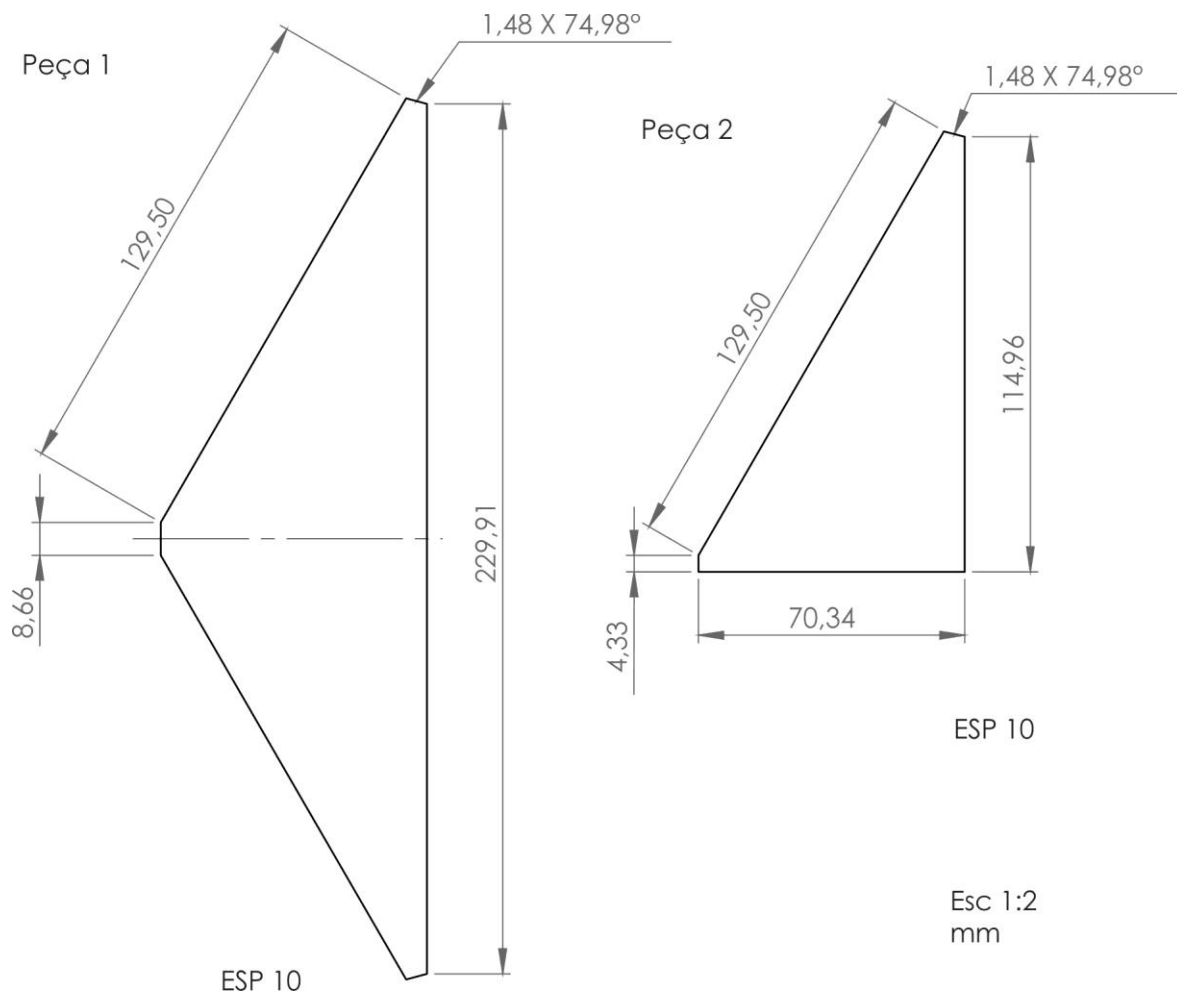
Figura 145 - Modificação na geometria e fechamento total bem sucedido



Fonte: Elaborado pela autora

A partir desse momento, foram feitos testes de dimensões mínimas para o chanfro, a fim de se chegar a um furo hexagonal mínimo na estrutura, chegando-se ao desenho técnico definitivo das peças mostrado na figura 146.

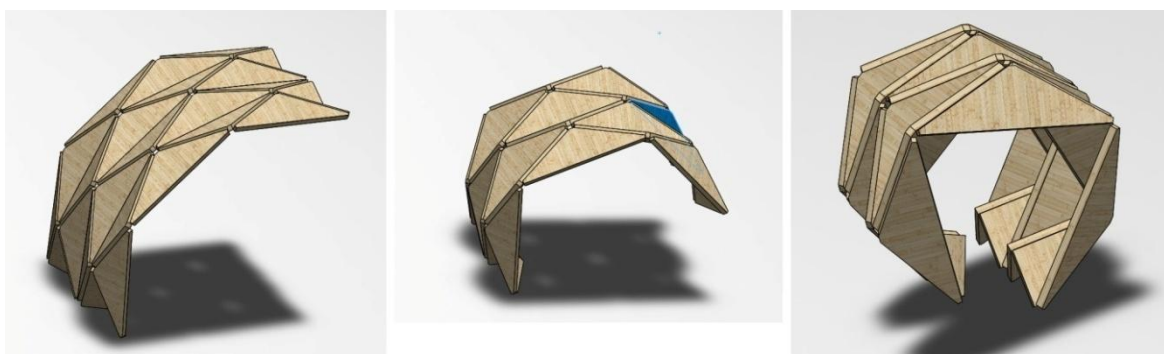
Figura 146 - Desenho técnico das peças do modelo Yoshimura



Fonte: Elaborado pela autora

Procedendo com o posicionamento das peças definitivas, a estrutura toda foi montada no SolidWorks, movendo-se perfeitamente sem colisão até ocorrer o completo fechamento ou abertura da estrutura (figura 147). Assim, a adequação da geometria da peça que se repete no padrão Yoshimura tornou possível a movimentação de um modelo com 10 mm de espessura.

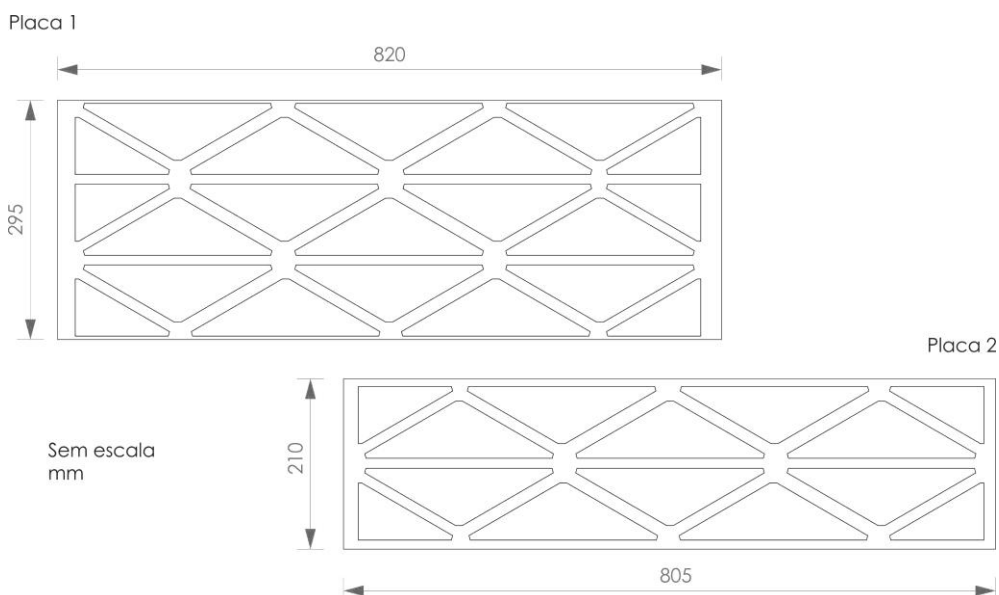
Figura 147 - Imagens em sequência do movimento do modelo no *SolidWorks*



Fonte: Elaborado pela autora

A partir do modelo virtual, as peças foram distribuídas em uma placa de 820 mm x 295 mm e em outra de 805 mm x 210 mm, mas, como no experimento anterior ocorreram problemas devido à pouca distância entre as peças, nestas placas adotou-se 12 mm como sendo medida mínima de segurança entre elas (figura 148).

Figura 148 - Distribuição das peças do modelo em duas placas (dimensões em mm)



Fonte: Elaborado pela autora

Procedendo então com a usinagem na Router CNC, todos os problemas ocorridos no experimento anterior foram superados pela adoção de medidas simples como maior uso da fita VHB, maior distância entre as peças, e o uso de uma fresa nova. Assim, o acabamento da usinagem foi muito melhor em comparação com o anterior, mesmo na direção transversal às fibras (figura 149), observando-se que nenhuma peça se deslocou ou descolou durante o processo.

Figura 149 - Usinagem com a fresa nova: melhor acabamento



Fonte: Elaborado pela autora

No entanto, durante a usinagem da placa 1, a Router CNC não fez a adequação do desenho das peças para que a fresa caminhasse dentro dos limites da placa, inviabilizando a última linha de peças (dois triângulos isósceles e dois triângulos retângulos), como pode ser visto no destaque da figura 150.

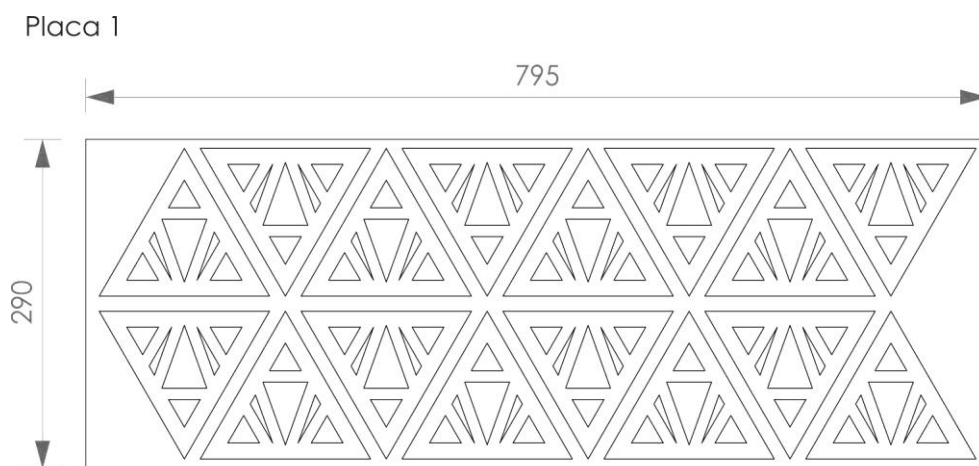
Figura 150 - Destaque da usinagem incorreta na última linha de peças



Fonte: Elaborado pela autora

Assim, foi preciso redistribuir o desenho das peças inviabilizadas em uma placa prevista para usinar outro modelo (figuras 151 e 152). Com a reorganização espacial e a preservação da distância mínima entre as peças, pôde-se inserir seis peças (das quatro perdidas) por meio da diminuição da quantidade prevista de peças do outro modelo (de 16 triângulos equiláteros para 12). O fato de os modelos trabalharem com o conceito de modularidade facilitou a otimização do espaço das placas.

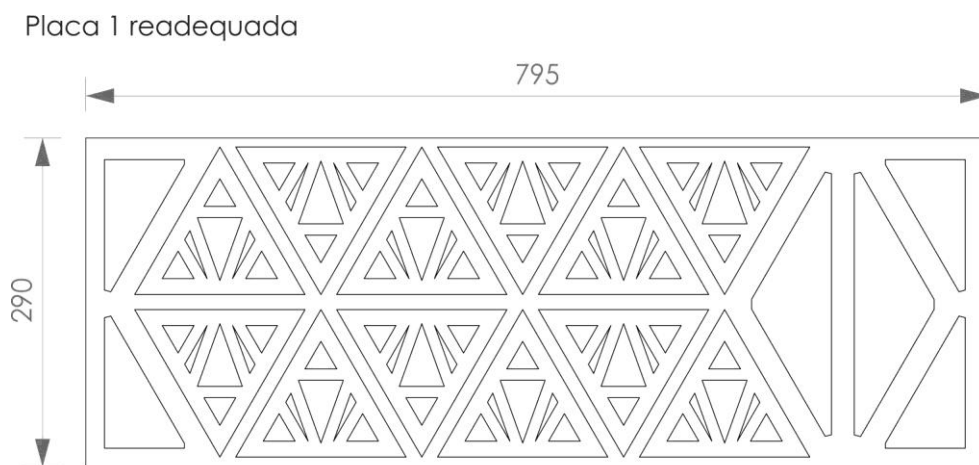
Figura 151 - Desenho da placa prevista para outro modelo (dimensões em mm)



Sem escala
mm

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 152 - Desenho da placa readequada para a reposição das peças perdidas (dimensões em mm)

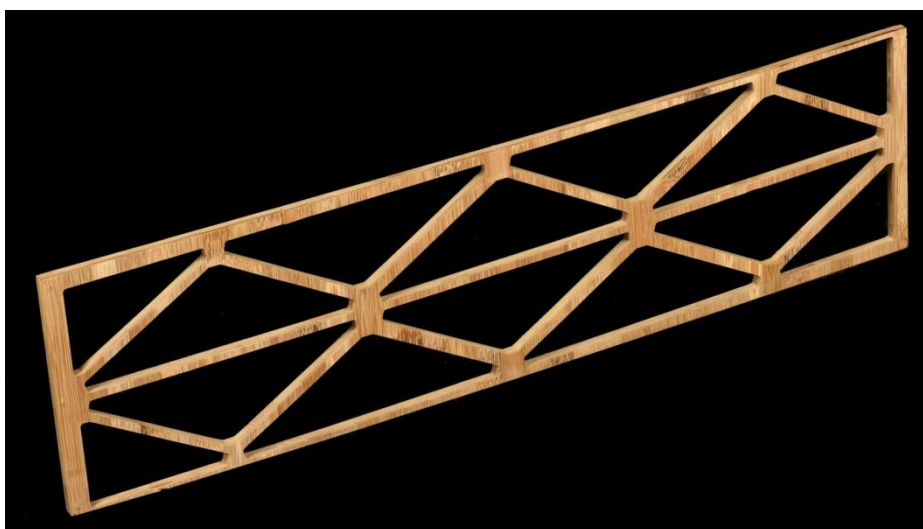


Sem escala
mm

Fonte: Elaborado pela autora

Apesar desse pequeno inconveniente, acredita-se que todos os problemas detectados anteriormente foram superados. Além disso, com a distância adotada entre as peças e a sua organização espacial, pode-se utilizar o esqueleto da usinagem da placa como uma estrutura para outros fins, chegando-se ao aproveitamento total do material, sem perdas (figura 153). Adotando-se a velocidade de corte em 1400 rpm e a velocidade de avanço da ferramenta em 1.500 mm/s, a placa 1 foi usinada completamente em cerca de 22 min, e a placa 2 em 15 min 36 s.

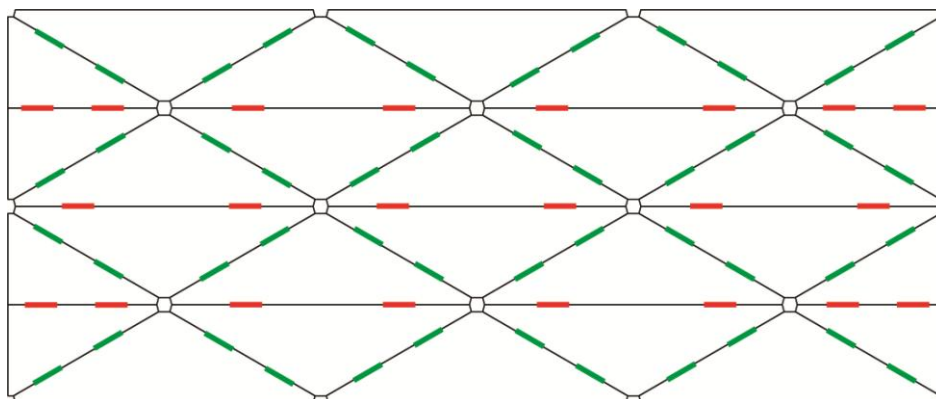
Figura 153 - Esqueleto da placa usinada



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Com as peças usinadas, procedeu-se com a montagem do modelo Yoshimura na Oficina de Madeira da UNESP. Como não houve problemas na exatidão da usinagem, uma lixa fina foi o suficiente para efetuar-se o acabamento final de todas as peças. Em relação às dobradiças, as mesmas foram fixadas pelas faces das peças e não pelo topo, como no modelo anterior, para que pudessem ficar mais firmes. A figura 154 mostra a distribuição prevista para as dobradiças no modelo, com a colocação de duas para cada aresta sendo que as dobras vale se localizam nas linhas diagonais e as dobras montanha nas linhas horizontais.

Figura 154 - Distribuição das dobradiças no modelo: vermelho para dobra vale e verde para dobra montanha



Fonte: Elaborado pela autora

Procedendo conforme previsto, o modelo físico em BLaC foi finalizado, comportando-se de maneira equivalente ao modelo virtual, como ocorrido no experimento anterior. A estrutura toda pôde se fechar formando uma tira retangular, desdobrando-se em uma placa horizontal onde foi possível observar todas as peças que a compõem. Ao deixar o plano, a estrutura se articulou formando um arco, o qual pode ser fechado em um formato hexagonal multifacetado, executando todos os movimentos obtidos no modelo em papel (figura 155).

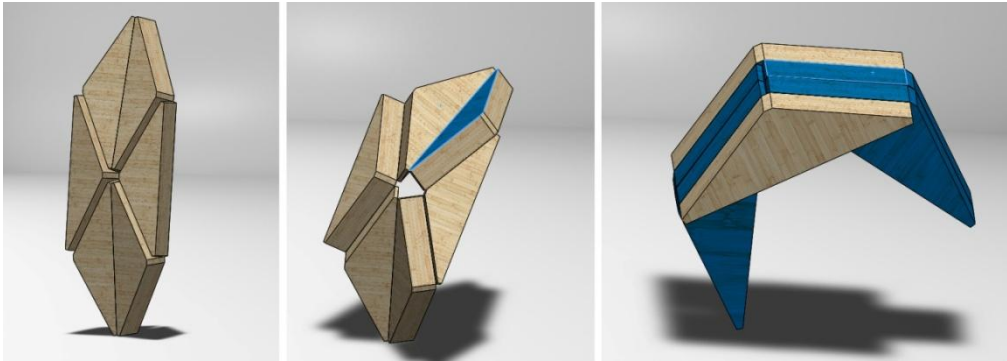
Figura 155 - A flexibilidade do modelo físico em BLaC



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Executando o teste do modelo virtual com uma espessura diferente (38 mm), notou-se que, uma vez resolvida a geometria da peça, a espessura não alterou o movimento (figura 156).

Figura 156 - Modelo virtual com 38 mm de espessura



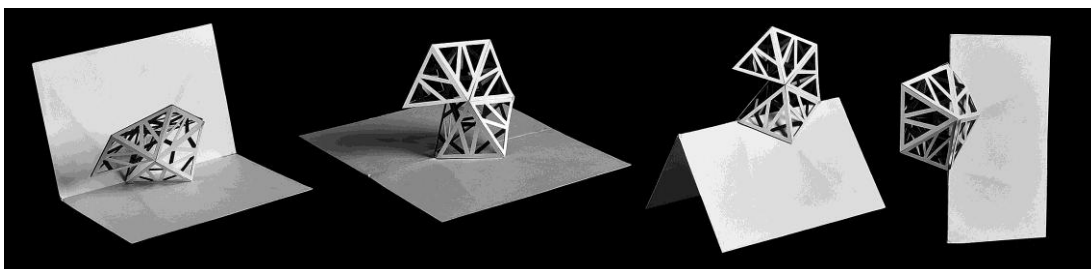
Fonte: Elaborado pela autora

Acredita-se que todas as estruturas, em BLaC ou outro material rígido e de grande espessura, que utilizam a Dobra-V e suas variações podem ser adequadas como *flat foldable* por meio da adequação da geometria de suas peças. Se for aumentada a dimensão das peças, o chanfro também deverá aumentar.

4.3. Kirigami 3D da modalidade 360° - Técnica da Caixa Diagonal

Para o terceiro experimento, escolheu-se a Técnica da Caixa Diagonal aplicada na modalidade 360° do *kirigami* 3D, porque esta pode trazer novas possibilidades e limitações ainda não vistas nas duas técnicas anteriores. Assim, analisando-se os diferentes modelos dessa categoria, selecionou-se a obra "*Pentagonal Di-Pyramid*" de Chatani (1983). Para homenagear o *kirigami* 2D (cortes vazados em folha de papel) e inserir mais um fator experimental, decidiu-se efetuar alguns cortes simétricos nas faces desse modelo (figura 157).

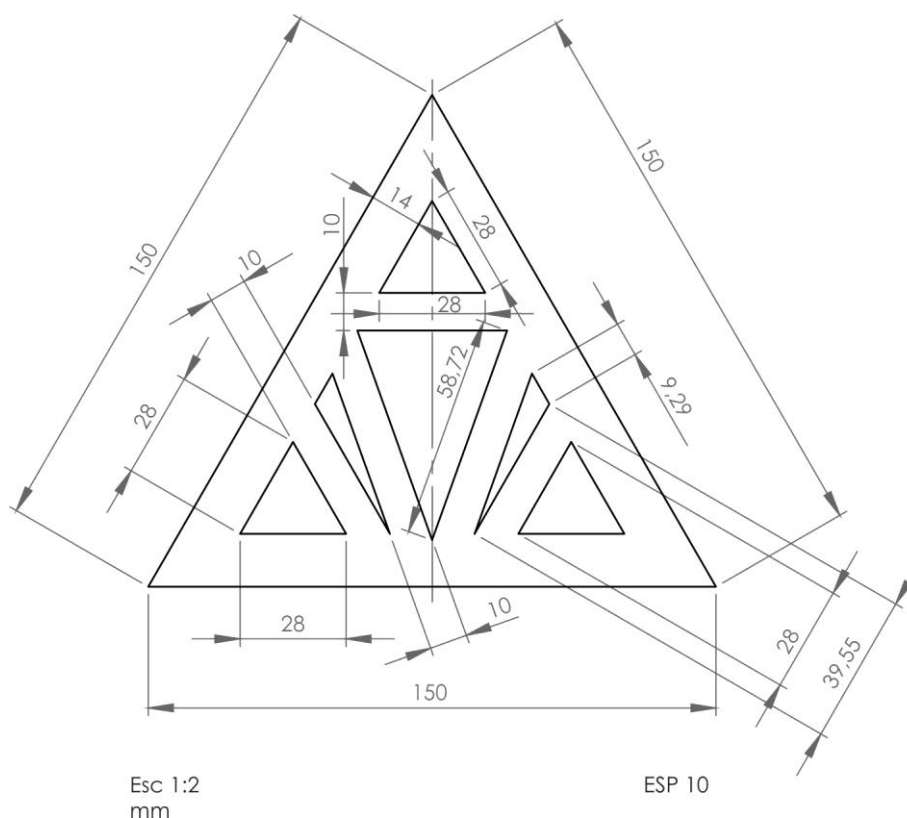
Figura 157 - Movimento de abertura em 360° do modelo escolhido



Modelo de Chatani (1983); Execução: Thaís R. Ueno Yamada; Foto: Ricardo K. Yamada

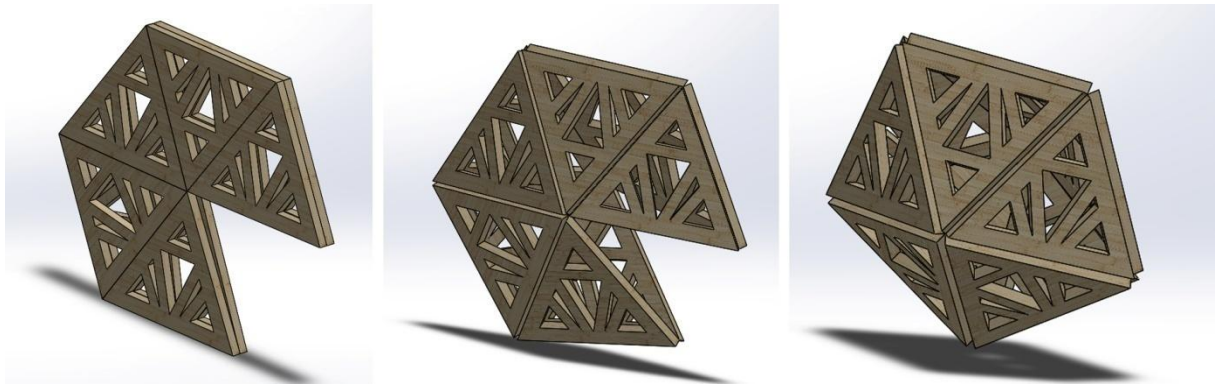
A ideia inicial era criar um modelo semelhante, em que a estrutura interna (bi-pirâmide pentagonal) ficasse fechada dentro de duas placas retangulares, as quais iriam se abrir executando um movimento de 360° em torno de uma aresta. Para que isso acontecesse, seria necessário utilizar uma dobradiça que fizesse a rotação nesse ângulo. Porém, por meio de uma busca em catálogos de dobradiças, nenhuma foi encontrada que se encaixasse dentro desse perfil. Assim, decidiu-se executar somente a estrutura poliédrica interna do modelo, que é formada pela rotação de cinco triângulos equiláteros em torno de um vértice em comum, e dispostos simetricamente com outro conjunto igual. Assim, procedeu-se com a modelagem da peça triangular no SolidWorks, cujas medidas estão informadas na figura 158.

Figura 158 - Desenho técnico da peça componente do modelo (dimensões em mm)



Fonte: Elaborado pela autora

As dez peças prismáticas triangulares seriam conectadas entre si por suas arestas por meio de dobradiças dispostas internamente, a fim de que elas não interferissem visualmente na estrutura, e para que pudessem efetuar a dobra montanha necessária. Haveria duas possibilidades de configurações: uma achatada e outra volumétrica, conforme pode ser visto na figura 159.

Figura 159 - Movimento do modelo no *SolidWorks*

Fonte: Elaborado pela autora

Não foram encontradas dificuldades na modelagem e na montagem deste modelo no SolidWorks, especialmente se comparado com as dificuldades encontradas nos modelos anteriores. Todas as peças foram dispostas em uma placa de 795 mm x 290 mm, com a distância mínima de 12 mm entre elas. Havia a previsão de aproveitar a placa toda para a usinagem de mais peças (18 unidades), as quais poderiam ser aproveitadas para montar outra estrutura poliédrica, mas com o problema ocorrido na usinagem do modelo Yoshimura, foi preciso diminuir o número de peças dessa estrutura para 12 unidades.

Assim, com o desenho modificado da placa, procedeu-se com a usinagem desse modelo, cuja maior dúvida seria quanto ao acabamento dos detalhes internos das peças. Para diminuir os riscos de deslocamento das peças, iniciou-se a usinagem somente dos detalhes internos (figura 160).

Figura 160 - Usinagem dos detalhes internos do modelo



Fonte: Elaborado pela autora

Com a velocidade de corte de 1400 rpm e a velocidade de avanço da ferramenta em 1.500 mm/s, a usinagem pela Router CNC conseguiu executar com precisão, rapidez (15 min 46 s) e bom acabamento até mesmo os menores detalhes da peça, superando as expectativas (figura 161).

Figura 161 - Placa com a primeira etapa concluída: usinagem dos detalhes internos das peças



Fonte: Elaborado pela autora

Na segunda etapa, foram usinadas as partes externas das peças juntamente com as peças do modelo anterior em 18 min 53 s. Assim, com o uso de uma fresa nova, de uma boa quantidade de fita VHB para fixação da placa na mesa de usinagem, da adoção de uma distância mínima de 12 mm entre as peças, foram solucionados todos os problemas ocorridos nas experiências anteriores, tornando o uso da Router CNC para usinagem de BLaC extremamente vantajoso, em termos de tempo, exatidão e acabamento final (figura 162).

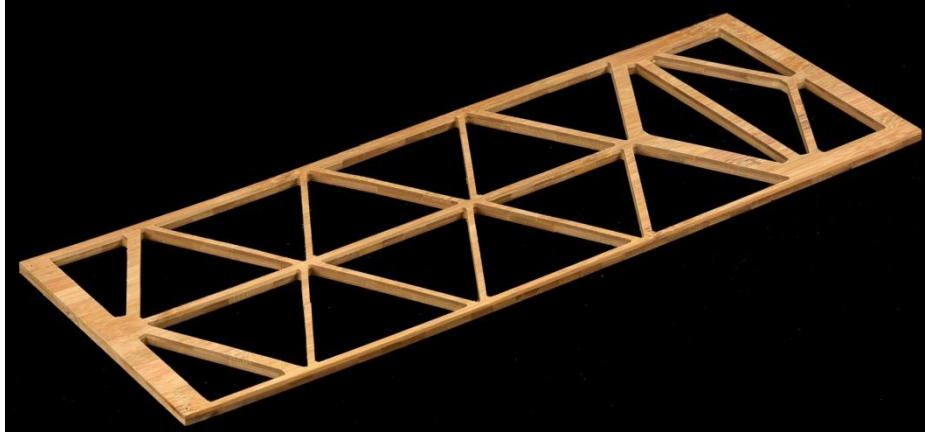
Figura 162 - Usinagem da parte externa das peças



Fonte: Elaborado pela autora

Assim como ocorrido no modelo anterior, com a distância e a organização espacial das peças, pôde-se aproveitar a sobra da placa como uma estrutura para outros fins, dependendo do tamanho das peças e da espessura da placa (objetos como porta-retrato, divisória, tampo de mesa etc.), como pode ser visto na figura 163.

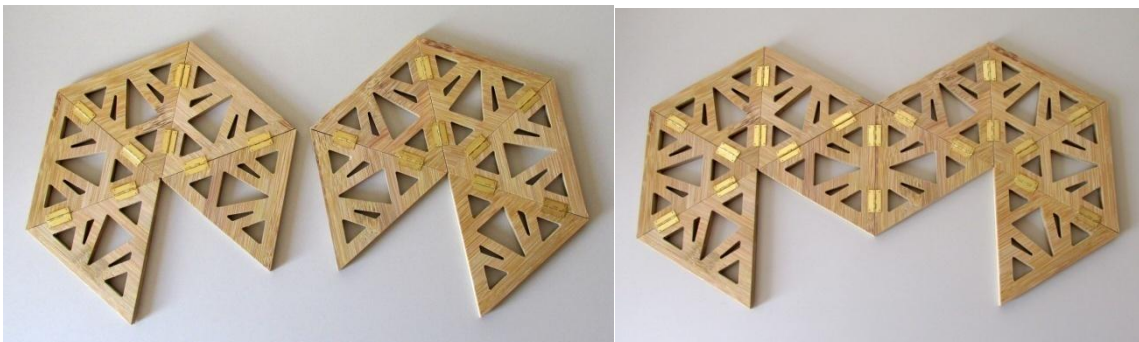
Figura 163 - Esqueleto da placa usinada



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Com as peças usinadas e lixadas, procedeu-se com a montagem do modelo físico por meio da fixação das dobradiças pelas faces das peças. Dois conjuntos de cinco unidades foram fixadas separadamente e depois unidas por um par de dobradiças (figura 164).

Figura 164 - Primeira etapa da montagem

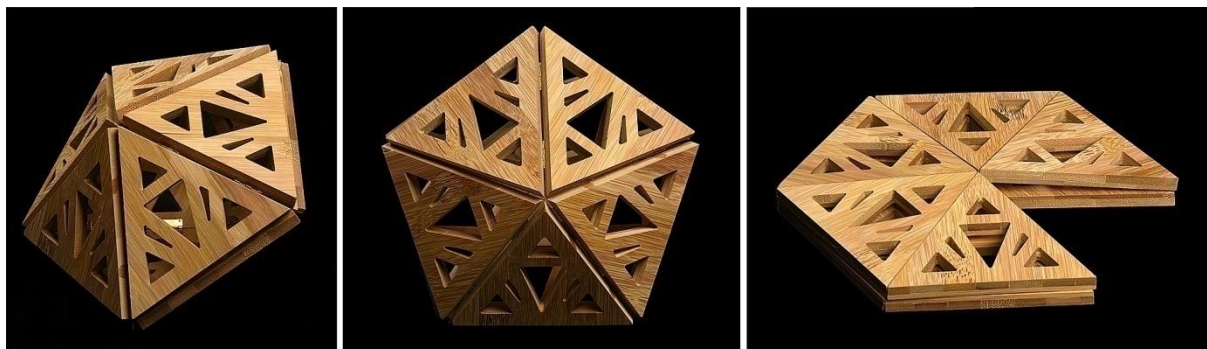


Fonte: Elaborado pela autora

Porém, a partir desse momento, ocorreu um problema para fixação das dobradiças internamente, as quais iriam possibilitar que a estrutura se comportasse como no modelo em papel. A ideia seria que ela se movimentasse como na figura 165, mas haveria uma grande dificuldade de colocar as dobradiças na estrutura articulada, especialmente a última.

Seria necessário um maquinário especial? Ainda haveria a possibilidade de fixação pelo topo e não pelas faces, mas as dobradiças ficariam muito visíveis, influenciando, dessa forma, a estética do produto.

Figura 165 - Modelo físico previsto



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Na busca por uma solução a esse novo problema, explorou-se essa dificuldade em fechar a estrutura e transformá-la em uma vantagem construtiva. Ou seja, as peças se articulariam de várias maneiras, o que possibilitaria a exploração da flexibilidade da estrutura, como uma escultura transformável, multi-formas (figura 166). Para explorar melhor essa ideia, poderiam ser estudadas outras configurações que pudessem ser adaptadas a produtos diversos, como jogos e brinquedos educativos.

Figura 166 - Diferentes configurações do modelo



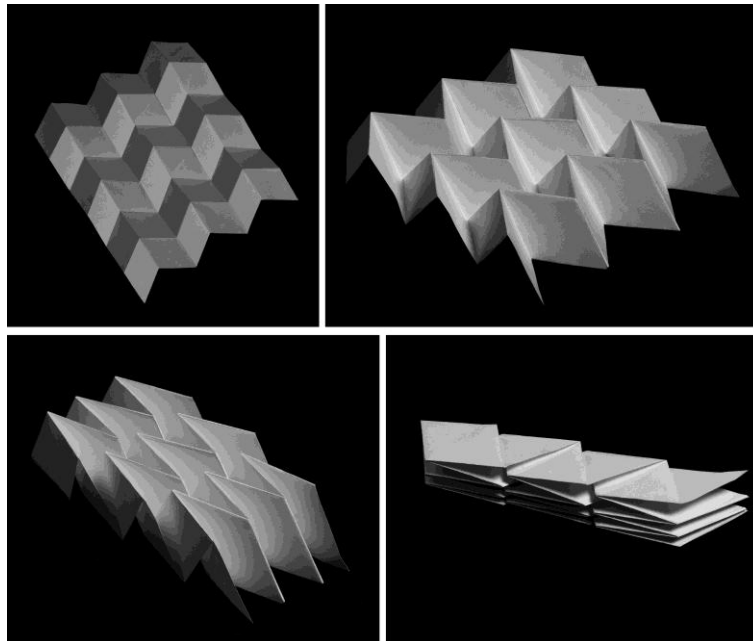
Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

4.4. Miura-Ori

Para o quarto experimento, selecionou-se o padrão de dobra denominado Miura-Ori, desenvolvido pelo cientista japonês Koryo Miura no século passado. Ele foi escolhido por apresentar múltiplas Dobras-V e achatamento diferente do que ocorre no Padrão

Yoshimura. Sua característica principal é permitir a abertura e o fechamento total aplicando força apenas pelas extremidades opostas. Como as formas geradas no Miura-Ori são paralelogramos (no Yoshimura são triângulos), ocorre sobreposição dos planos com maior intercalação entre os mesmos, criando um efeito de luz e sombra interessante (figura 167).

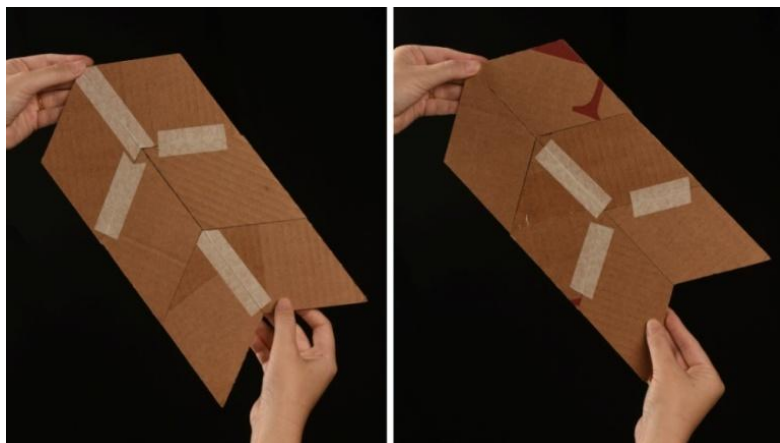
Figura 167 - Estudo do movimento entre as partes durante a abertura e o fechamento



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Antes de iniciar a modelagem do modelo virtual, foi elaborado primeiramente um modelo físico em papelão para estabelecer os locais das dobras vale e montanha em cada lado da estrutura (figura 168).

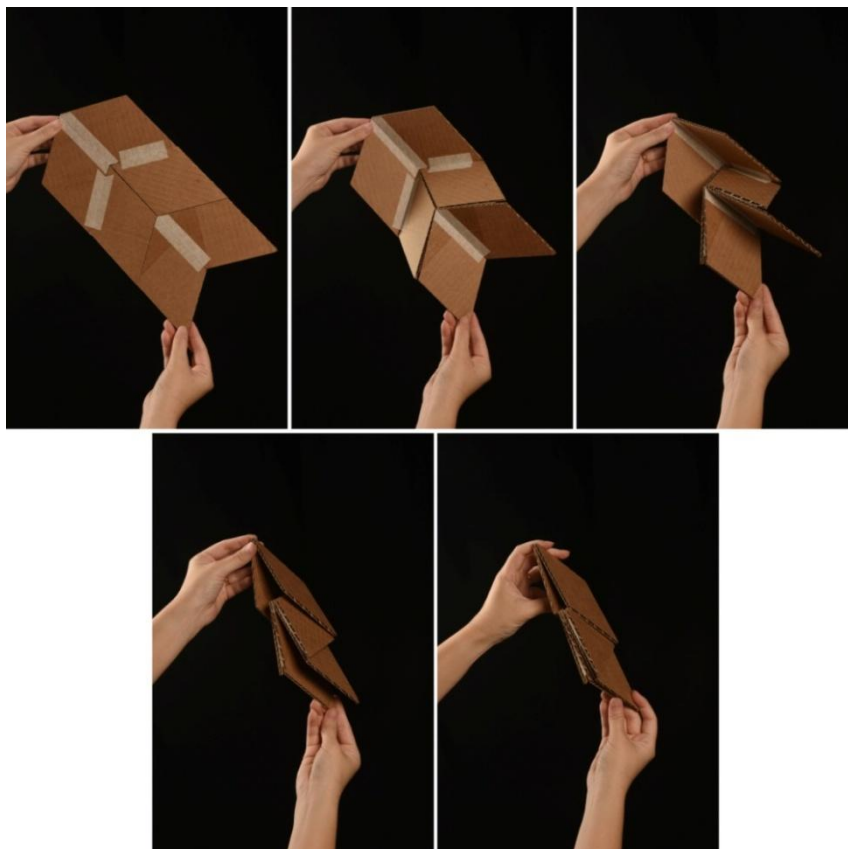
Figura 168 - Modelo em papelão: locais de dobra vale (esq.) e dobra montanha (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Em seguida, ao executar atentamente o movimento de dobra, observou-se, além do posicionamento das placas, que não ocorreu o achatamento por completo da estrutura (figura 169).

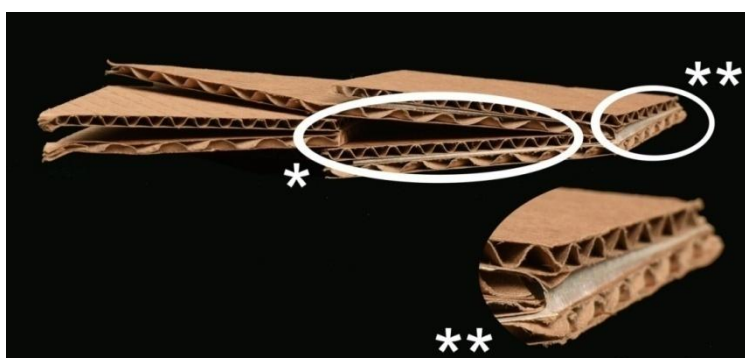
Figura 169 - Estudo do movimento no modelo em papelão



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Além do espaço vazio, também detectou-se um ponto crítico quando ocorre a sobreposição de dois pares de planos, que acabam por forçar a dobra (figura 170).

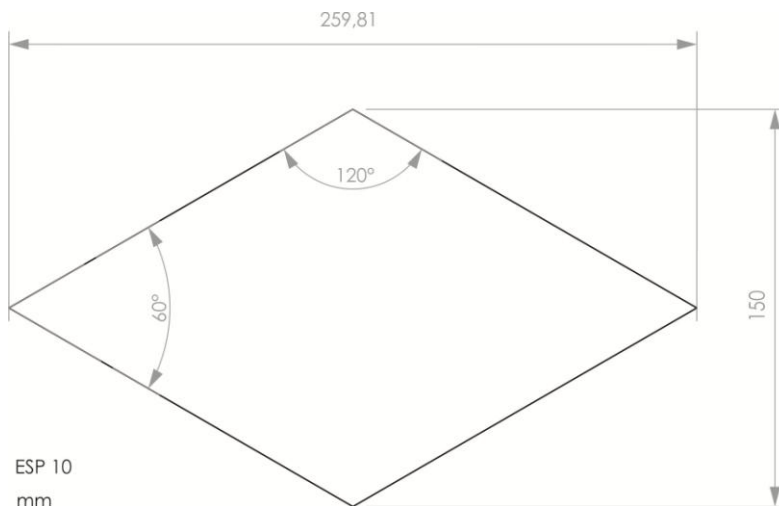
Figura 170 - Ponto crítico (em destaque) no fechamento do modelo



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Sabendo-se desses fatores, procedeu-se com a etapa seguinte de modelagem do Miura-Ori virtual. Visando ao aproveitamento máximo das placas reservadas para este modelo e o tamanho ideal para a montagem, observação e manipulação da estrutura, foram adotadas as dimensões das peças apresentadas na figura 171.

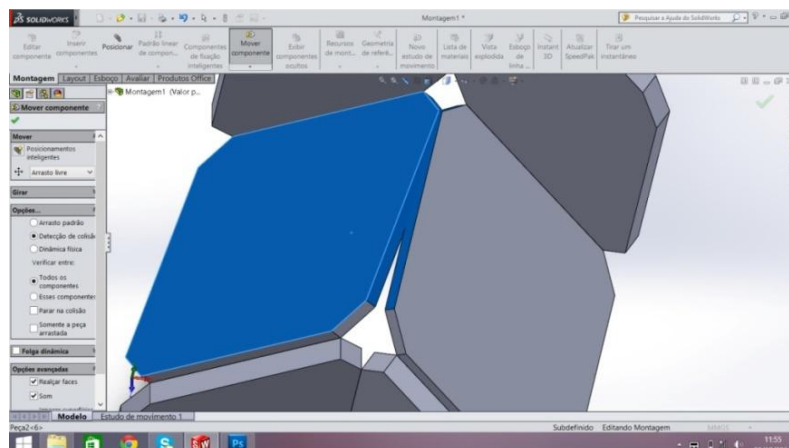
Figura 171 - Desenho técnico inicial das peças do modelo (dimensões em mm, fora de escala)



Fonte: Elaborado pela autora

Para iniciar, optou-se por montar a estrutura com apenas duas colunas de três peças cada, a fim de eliminar os problemas que surgirem neste primeiro grupo de unidades básicas. Como esta estrutura utiliza Dobra-V, foram efetuados "chanfros nos vértices" das placas, tais como no modelo Yoshimura. No entanto, os chanfros nas pontas não foram suficientes para tornar possível a dobra conforme o modelo Miura-ori, com a primeira detecção de colisão (figura 172).

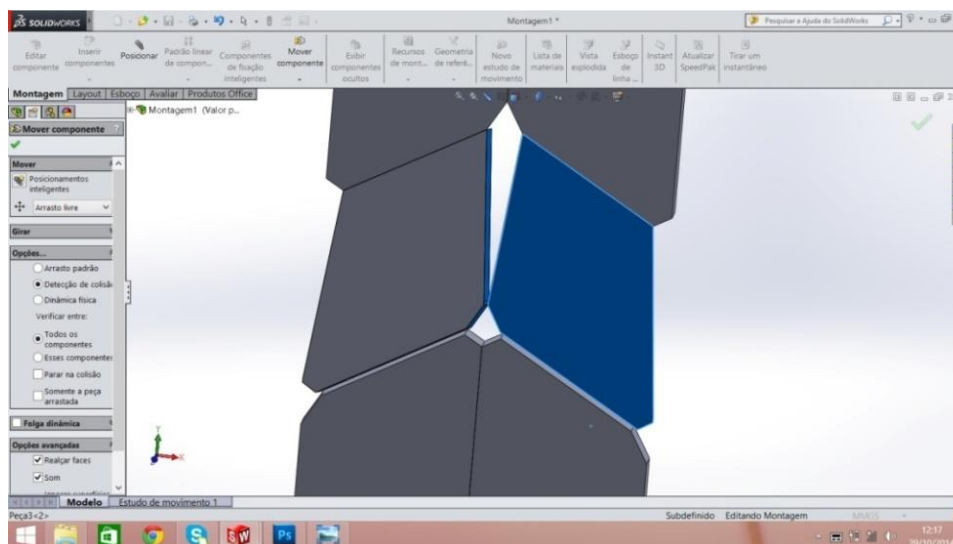
Figura 172 - Colisão 1 detectada



Fonte: Elaborado pela autora

Com a aplicação de chanfros inéditos nas laterais das placas que estavam se colidindo, surgiu um novo ponto de colisão (figura 173), sendo necessária a aplicação de outro "chanfro de topo" ou "chanfro de borda".

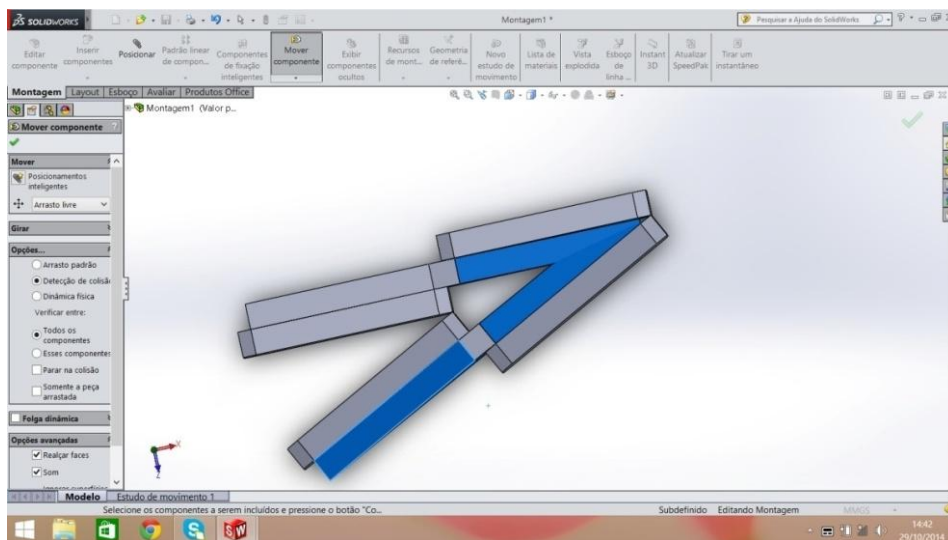
Figura 173 - Colisão 2 detectada



Fonte: Elaborado pela autora

Com as peças corrigidas pela execução de outro chanfro, efetuou-se a dobra total do modelo, até ocorrer a detecção de mais um ponto de colisão (figura 174).

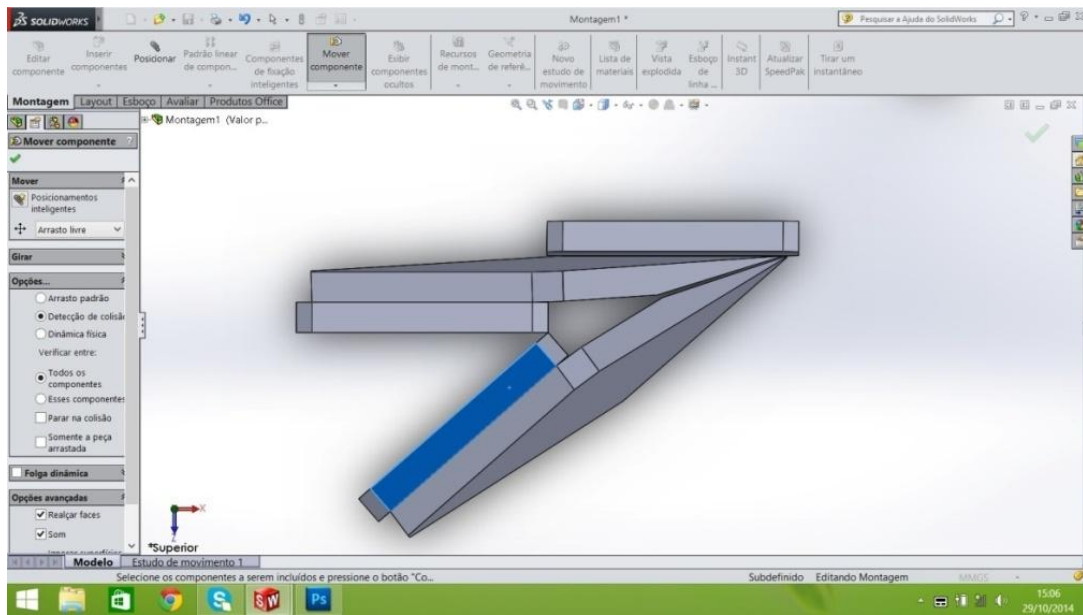
Figura 174 - Colisão 3 detectada



Fonte: Elaborado pela autora

Para eliminar essa colisão, aplicou-se outro chanfro inédito na superfície das peças correspondentes, denominado de "chanfro nas faces" (figura 175).

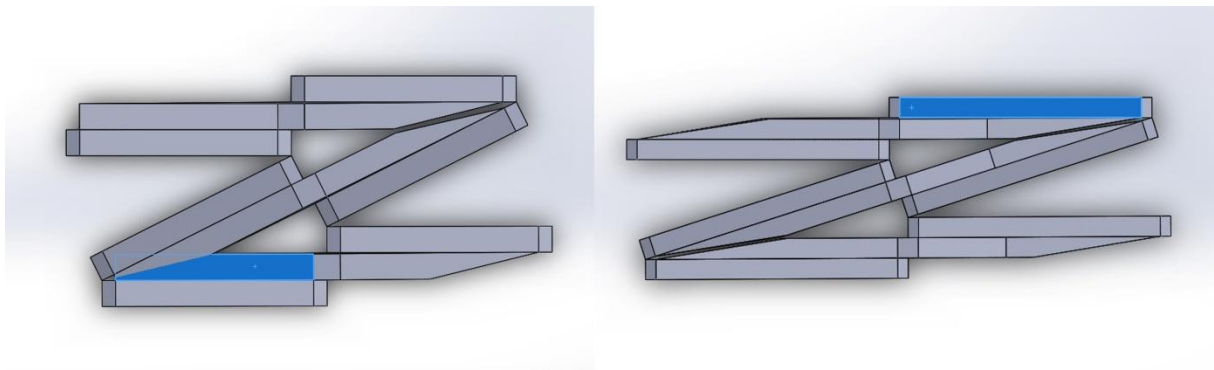
Figura 175 - Correção da colisão 3



Fonte: Elaborado pela autora

Com a montagem do primeiro grupo de unidades básicas resolvida, inseriu-se mais uma coluna de três peças, para observar o comportamento da estrutura como um todo. Com isso, apareceu mais um ponto de colisão, que foi corrigido com "chanfro na face" de mais duas placas (figura 176).

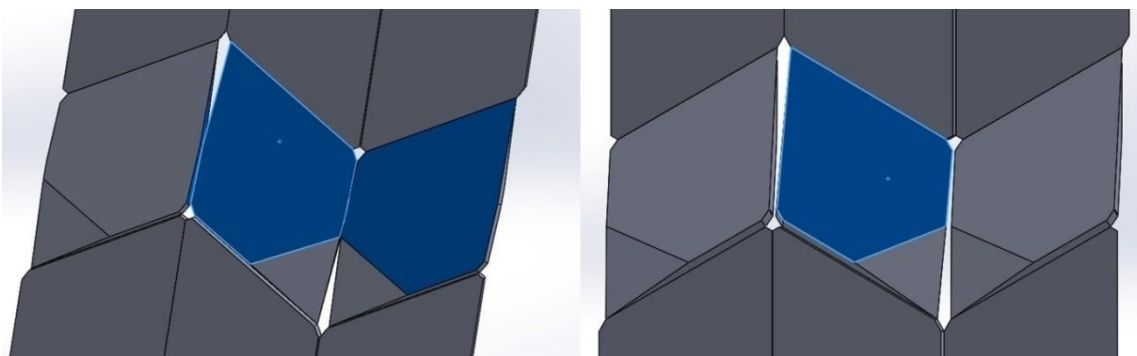
Figura 176 - Colisão 4 (esq.) e correção (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora

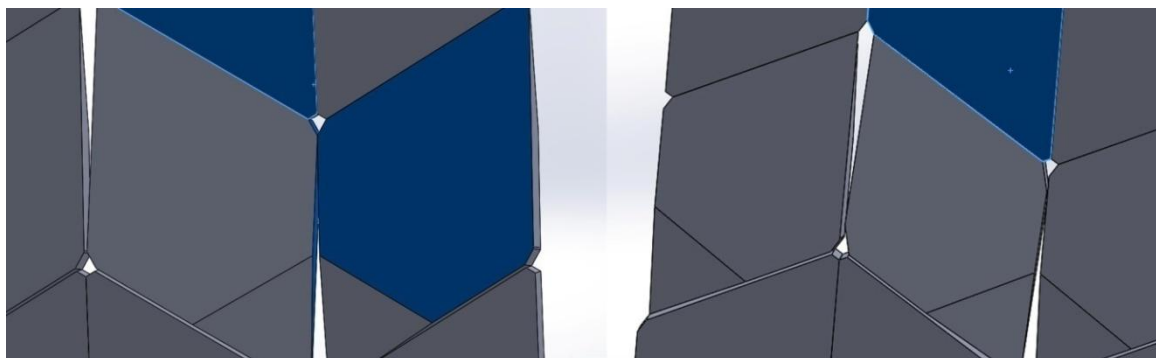
Ao abrir a estrutura, verificaram-se outros pontos de colisão que precisaram ser eliminados com outras mudanças inéditas na geometria da peça (figuras 177 e 178).

Figura 177 - Colisão 5 (vista frontal) e correção (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora

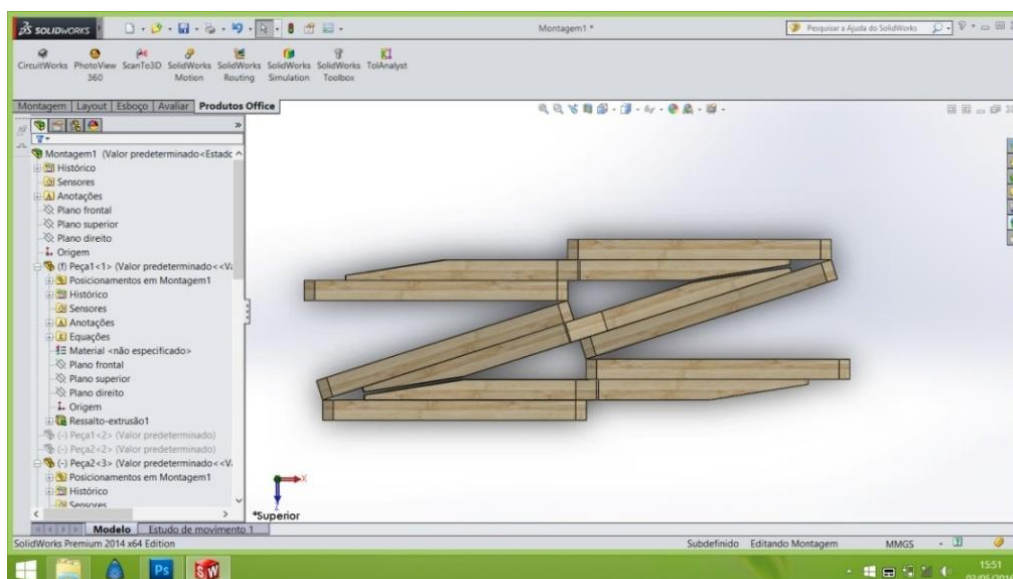
Figura 178 - Colisão 6 (vista posterior) e correção (vista frontal) à direita



Fonte: Elaborado pela autora

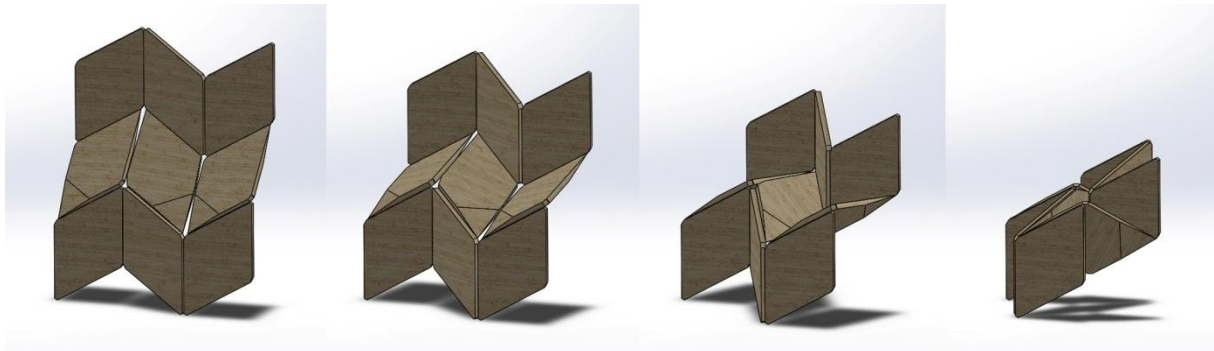
Avaliando o fechamento da estrutura após estas correções e aplicando o material nas peças, verificou-se o sucesso da modelagem virtual (figuras 179 e 180).

Figura 179 - Vista superior do fechamento máximo do modelo



Fonte: Elaborado pela autora

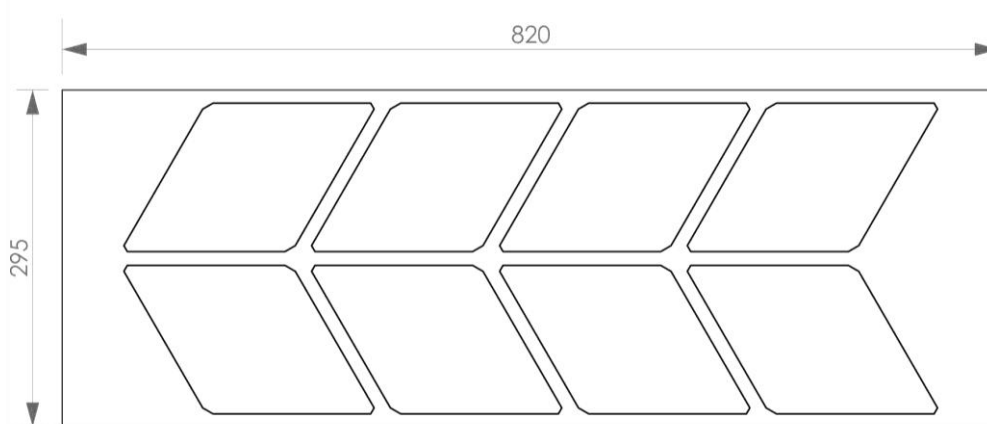
Figura 180 - Imagens em sequência do movimento do modelo no SolidWorks



Fonte: Elaborado pela autora

Com a etapa concluída de modelagem virtual da estrutura Miura-Ori, obteve-se o desenho técnico final das peças componentes do modelo. Em seguida, as peças a serem prototipadas na Router CNC, com "chanfros nos vértices" e com "chanfro no topo", foram separadas das peças que iriam ser executadas na Rolland (com "chanfros nas faces"). As da Router foram distribuídas em uma placa de 295 mm X 820 mm, seguindo as mesmas diretrizes anteriores (distância mínima entre as peças), conforme figura 181.

Figura 181 - Distribuição do primeiro grupo de peças do modelo em uma placa

Sem escala
mm

Fonte: Elaborado pela autora

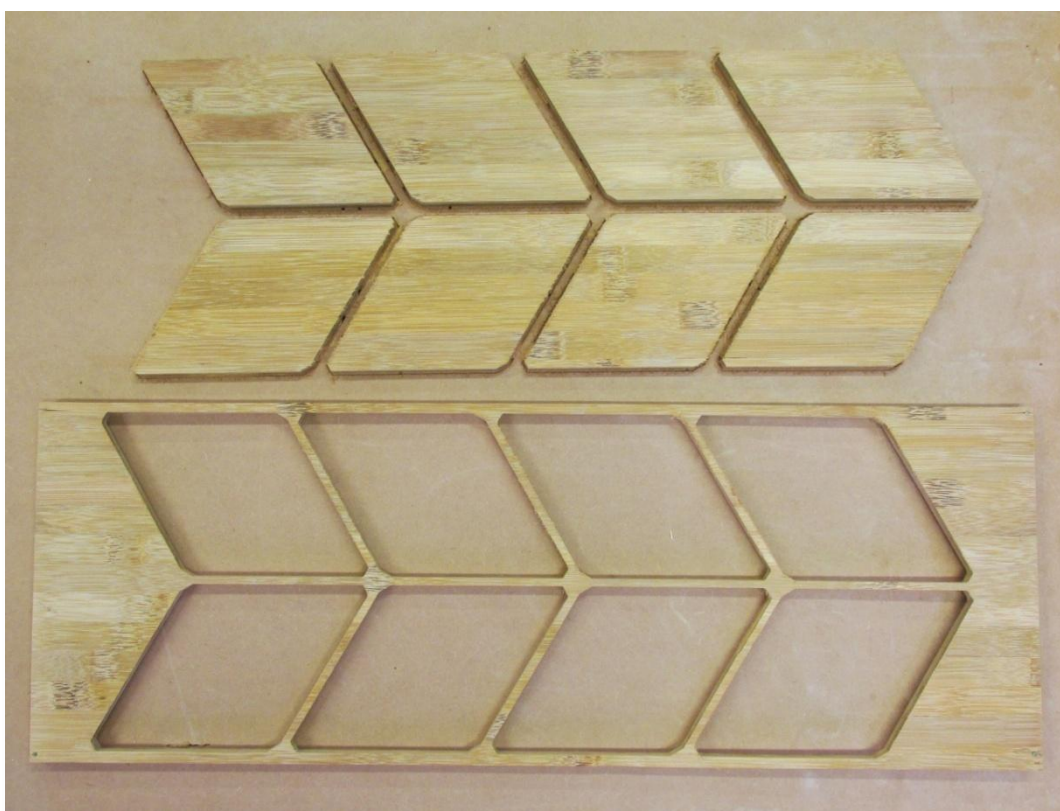
Em seguida, foi realizada a usinagem da placa na Router CNC em 14 min 51 s utilizando-se o mesmo procedimento das estruturas anteriores (fixação com fita VHB, uso de fresa nova, velocidade de corte em 1400 rpm e velocidade de avanço da ferramenta em 1.500 mm/s), conforme figuras 182 e 183.

Figura 182 - Usinagem da placa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 183 - Peças usinadas e esqueleto da placa



Fonte: Elaborado pela autora

As três peças a serem usinadas na Rolland precisaram ser prototipadas cada uma separadamente devido às características da máquina. Este tipo de máquina trabalha nos três eixos (comprimento, altura e largura), além de girar a peça (quarto eixo rotacional), enquanto se faz a usinagem ou após, para modelar o outro lado. Assim, para atender às

dimensões da máquina, foram preparadas três placas de 294 mm X 160 mm. Dessa forma, poderia ser usinada uma face da peça, e, com o tombamento, usinar a outra (figuras 184 a 187). Para que o processo fosse mais rápido com um bom acabamento, estabeleceu-se usinar com uma fresa de maior diâmetro para o desbaste, inclusive para o início do chanfro da superfície, e depois adotar uma fresa menor para o acabamento do chanfro (figura 188).

Figura 184 - Usinagem da peça com chanfro: desbaste de uma superfície



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 185 - Usinagem da superfície posterior e correção de defeitos da placa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 186 - Face 1 da peça ao final do desbaste (esq.) e detalhe do chanfro (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 187 - Face 2 da peça ao final do desbaste (esq.) e detalhe do chanfro (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora

No desbaste, os parâmetros da máquina utilizados foram: velocidade de avanço da ferramenta em 1,44 m/min; rotação do eixo: 12.000 rpm; avanço (profundidade de corte): 1,50 mm; e intervalo de passagem da ferramenta: 3,60 mm. Em uma face, o tempo para finalizar foi de 12 min 26 s, e na face posterior, foi de 13 min 57 s.

Figura 188 - Acabamento do chanfro



Fonte: Elaborado pela autora

Para o acabamento, os parâmetros foram: velocidade de avanço da ferramenta de 1,8 m/min; rotação do eixo de 12.000 rpm; avanço vertical da ferramenta: 0,25 mm; e intervalo de passagem da ferramenta: 0,25 mm. O tempo de acabamento da face 1 foi de 16 min 06 s e da face 2 foi de 13 min 52 s.

Observou-se uma quebra na extremidade da peça onde termina o chanfro, muito provavelmente pela fragilidade do material quando a espessura é muito fina. Mas isso só aconteceu em uma das extremidades, como pode ser observado na figura 189.

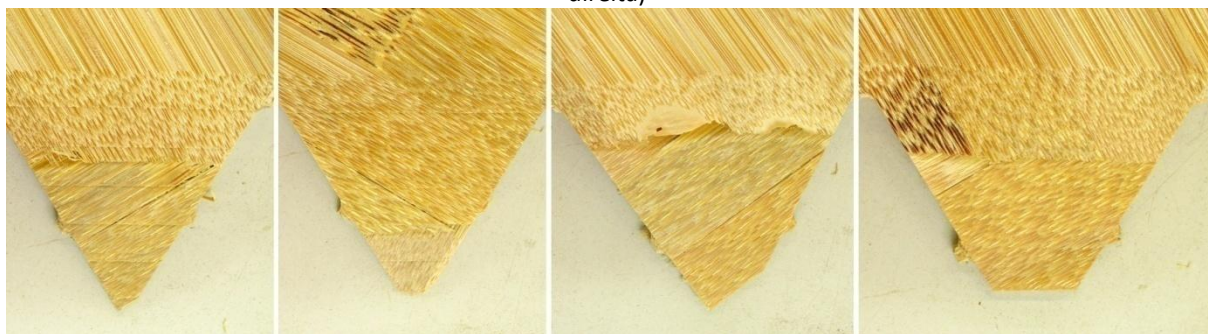
Figura 189 - Detalhe dos dois chanfros com acabamento finalizado: o da direita se quebrou durante o processo de usinagem



Fonte: Elaborado pela autora

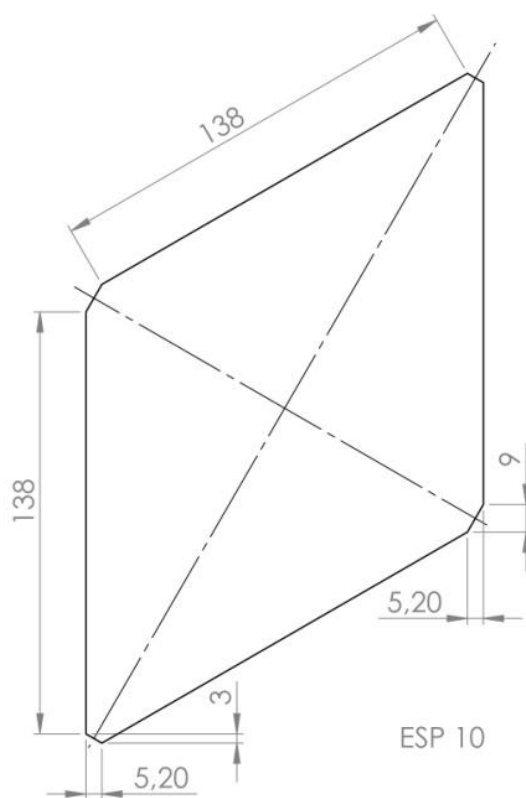
Na peça seguinte, os parâmetros de desbaste e de acabamento permaneceram idênticos, mas mudou-se a geometria da peça na parte que apresentou problema (quebra). Com um pequeno corte da ponta, o chanfro acabava em uma espessura de 1,2 mm, o que não foi o suficiente para eliminar as quebras. Assim, na terceira e última peça, aumentou-se o corte da ponta para o chanfro terminar em 2,4 mm de espessura, o que eliminou o problema de quebra. Ao final, para resolver e eliminar as diferenças, todas as três peças foram desbastadas igualmente (figura 190). Assim, o desenho técnico final das peças está apresentado nas figuras 191 a 193.

Figura 190 - Quebras ocorridas nas pontas das duas primeiras peças e corte adotado final (última figura à direita)



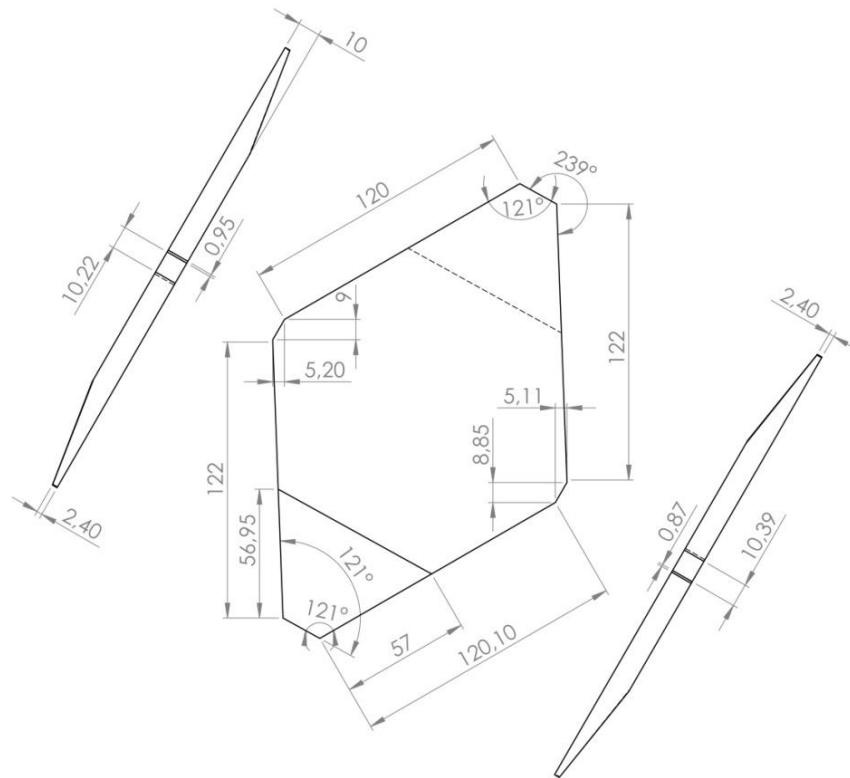
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 191 - Desenho técnico final das peças só com chanfro nos vértices (fora de escala) - medidas em mm



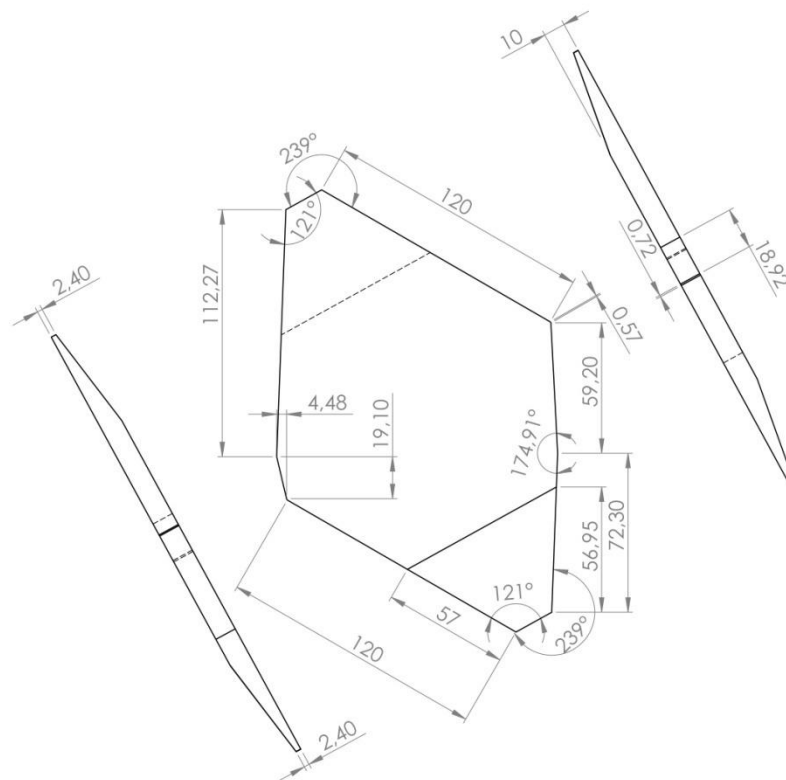
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 192 - Desenho técnico final da peça 2A com chanfro na superfície (fora de escala) - medidas em mm



Fonte: Elaborado pela autora

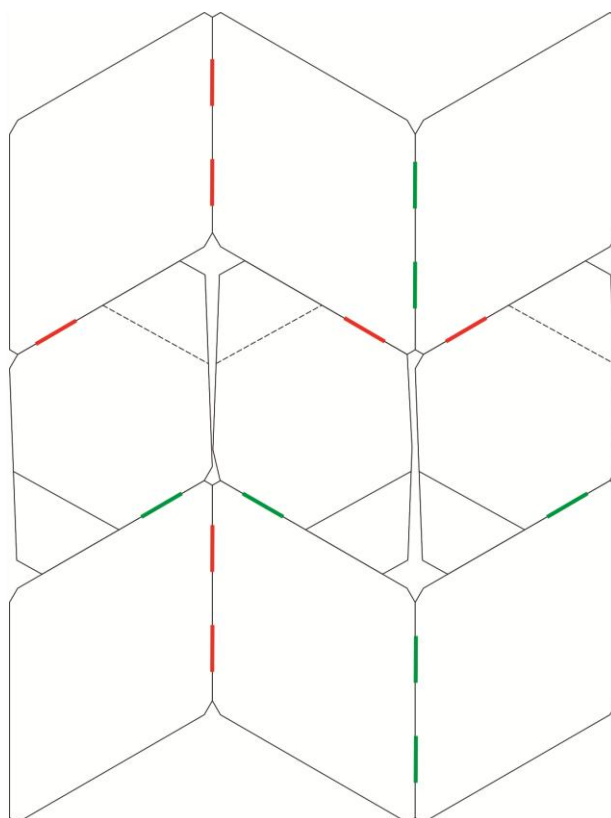
Figura 193 - Desenho técnico final da peça 2B com chanfro na superfície (fora de escala) - medidas em mm



Fonte: Elaborado pela autora

Com as peças devidamente usinadas, procedeu-se à montagem do modelo Miura-Ori na Oficina de Madeira da UNESP. Para este modelo, optou-se por empregar outra dobradiça, maior que a anterior e consequentemente mais resistente, e para fixá-la, utilizaram-se parafusos autoatarraxantes. Esta mudança de materiais empregados facilitou a montagem das peças, que foi mais rápida. A figura 194 mostra a distribuição das dobradiças no modelo.

Figura 194 - Distribuição das dobradiças no modelo Miura-Ori: vermelho (dobra vale) e verde (dobra montanha)



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme previsto, o modelo físico em BLaC finalizado comportou-se de maneira equivalente ao modelo virtual (figura 195), apresentando máximo grau de achatamento possível.

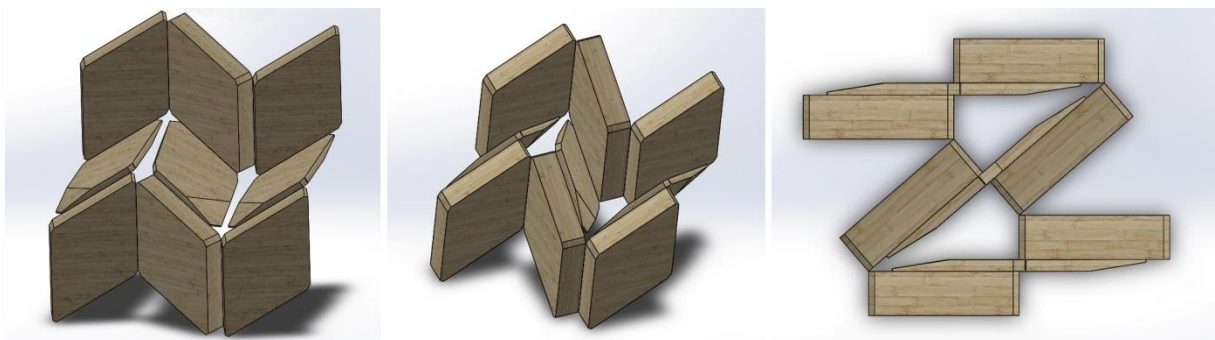
Figura 195 - Diferentes configurações do modelo criado



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Para finalizar este experimento, executou-se o teste com o modelo em espessura diferente (38 mm). Na primeira etapa, empregou-se esta espessura somente nas peças com elementos chanfrados nas bordas, pois como foi observado no modelo Yoshimura, a espessura não iria influenciar no movimento. A figura 196 comprova isso.

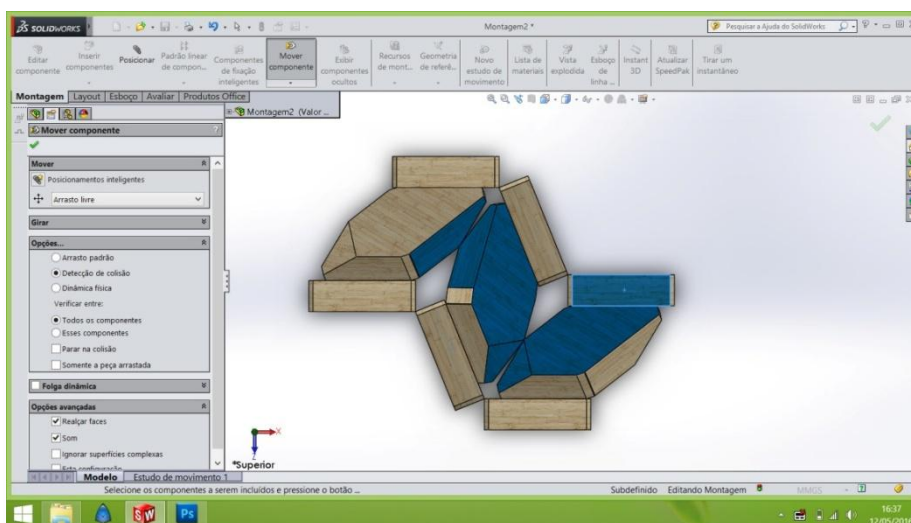
Figura 196 - Modelo virtual com 38 mm de espessura apenas nas peças sem chanfros nas superfícies



Fonte: Elaborado pela autora

Na etapa seguinte, conferiu-se a espessura de 38 mm às outras três peças que apresentavam chanfros nas faces e ocorreram as primeiras colisões ao tentar fechar a estrutura (figura 197).

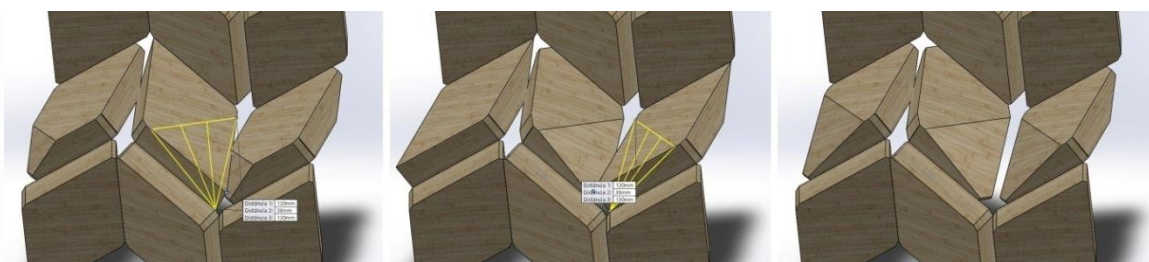
Figura 197 - Colisão 1 detectada



Fonte: Elaborado pela autora

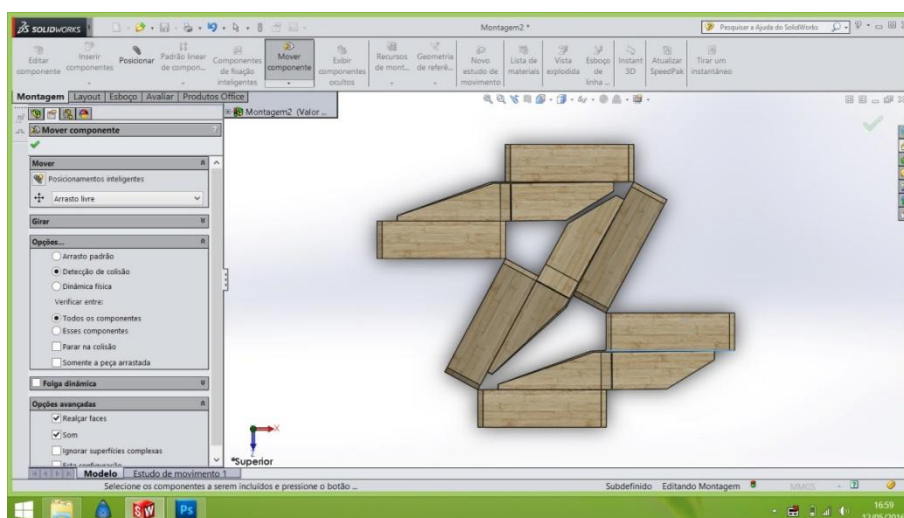
Analisando o local onde a colisão apareceu, procedeu-se com a alteração das medidas do "chanfro na face", que resolveu este problema (figuras 198 e 199).

Figura 198 - Etapas de correção da colisão 1



Fonte: Elaborado pela autora

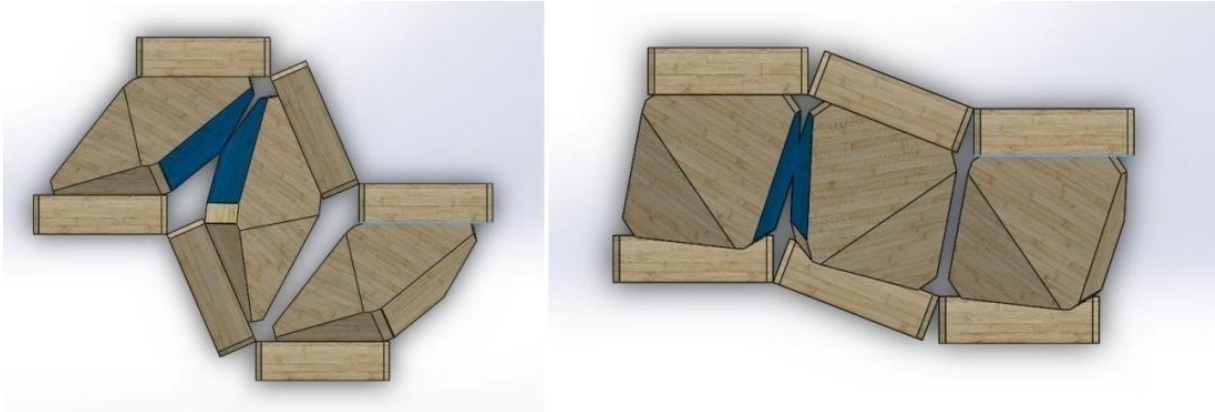
Figura 199 - Observação da correção da colisão 1



Fonte: Elaborado pela autora

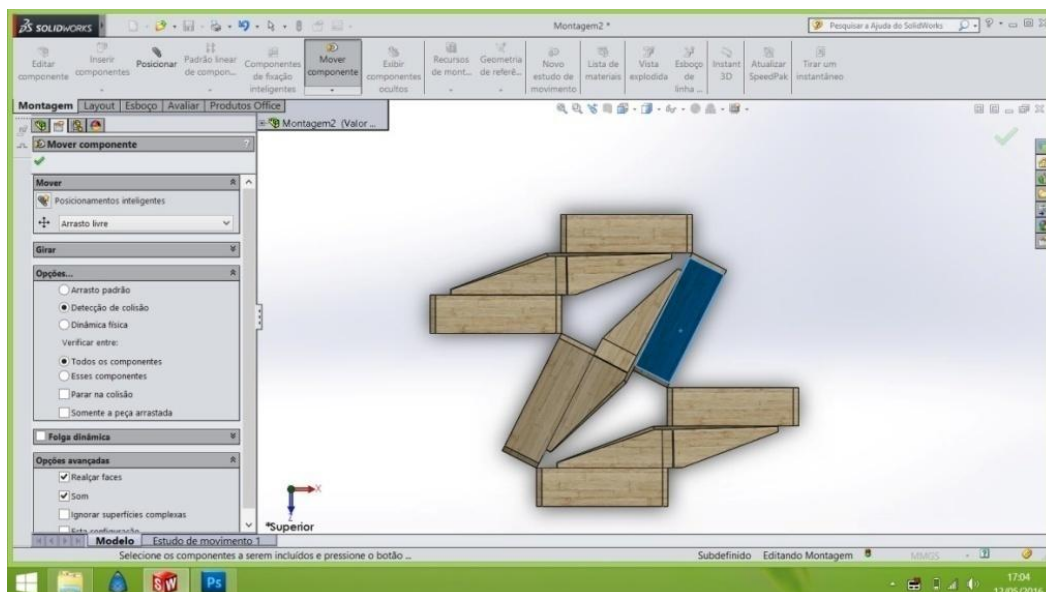
No entanto, ao voltar a abrir a estrutura, mais uma colisão foi detectada (figura 200). Para eliminá-la, foi necessário aumentar também os valores do chanfro nas faces posteriores das peças (figura 201).

Figura 200 - Colisão 2 detectada



Fonte: Elaborado pela autora

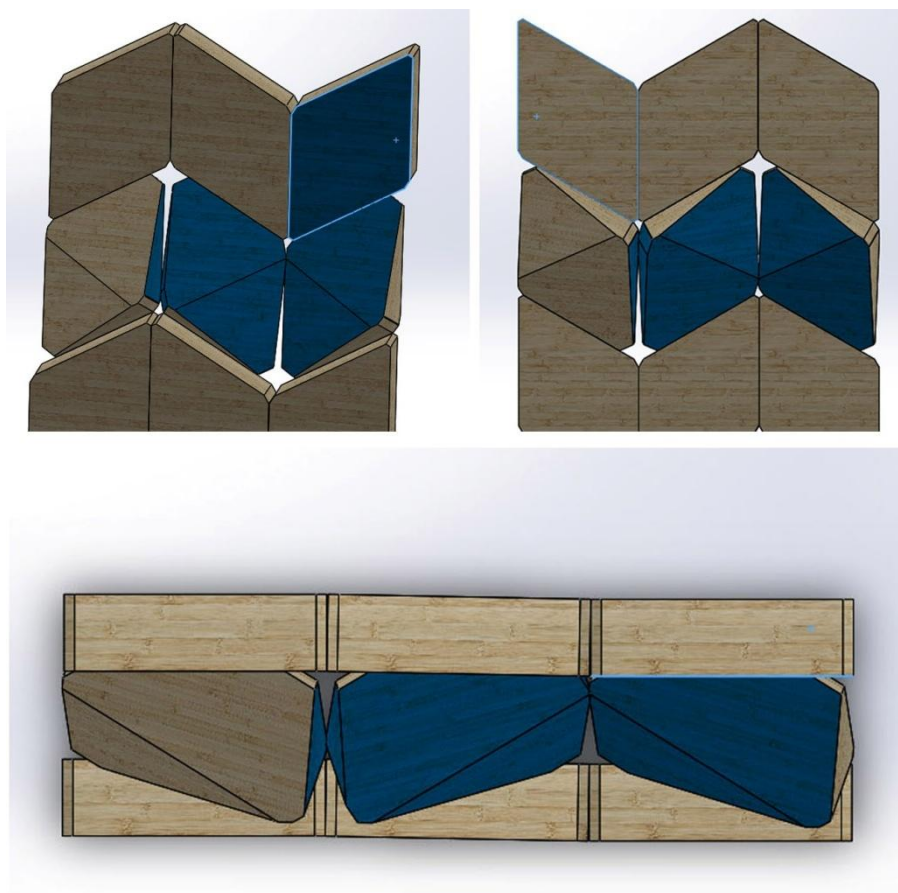
Figura 201 - Colisão 2 corrigida



Fonte: Elaborado pela autora

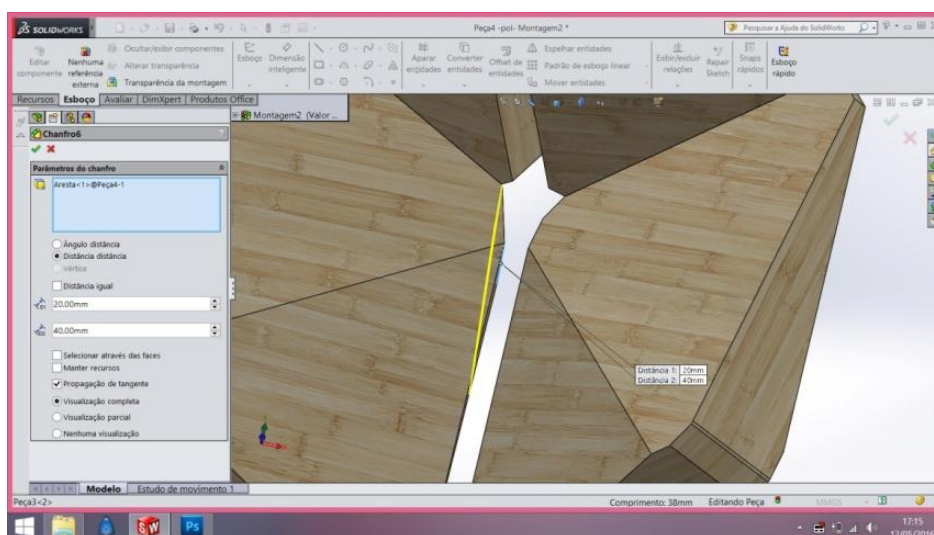
Mais uma vez, ao movimentar a estrutura, outra colisão foi detectada (figura 202). Para resolver este problema, aplicou-se mais um chanfro para eliminar as "quinas" que estavam se colidindo (figura 203).

Figura 202 - Vista frontal, posterior e superior da colisão 3



Fonte: Elaborado pela autora

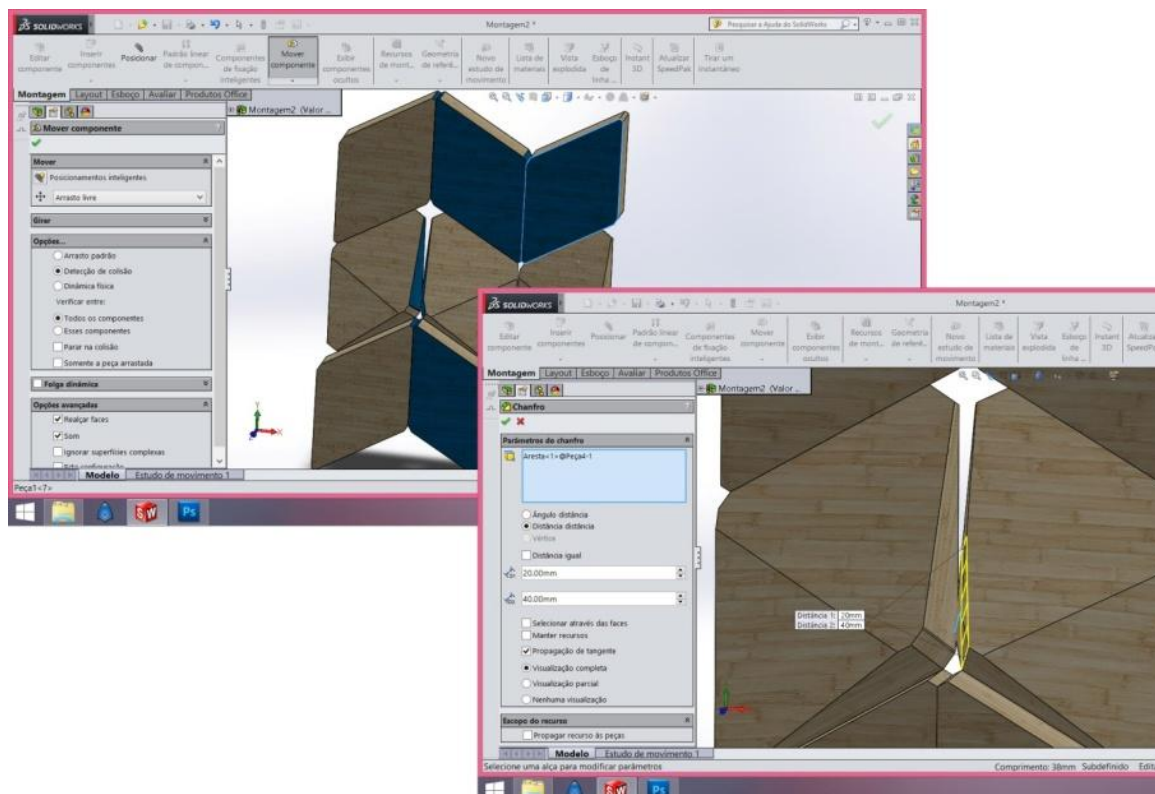
Figura 203 - Corte das "quinas" das peças que estavam se colidindo



Fonte: Elaborado pela autora

Resolvida esta parte, ocorreu mais uma colisão em outras duas peças, e que foi solucionada com a mesma estratégia da anterior (figura 204).

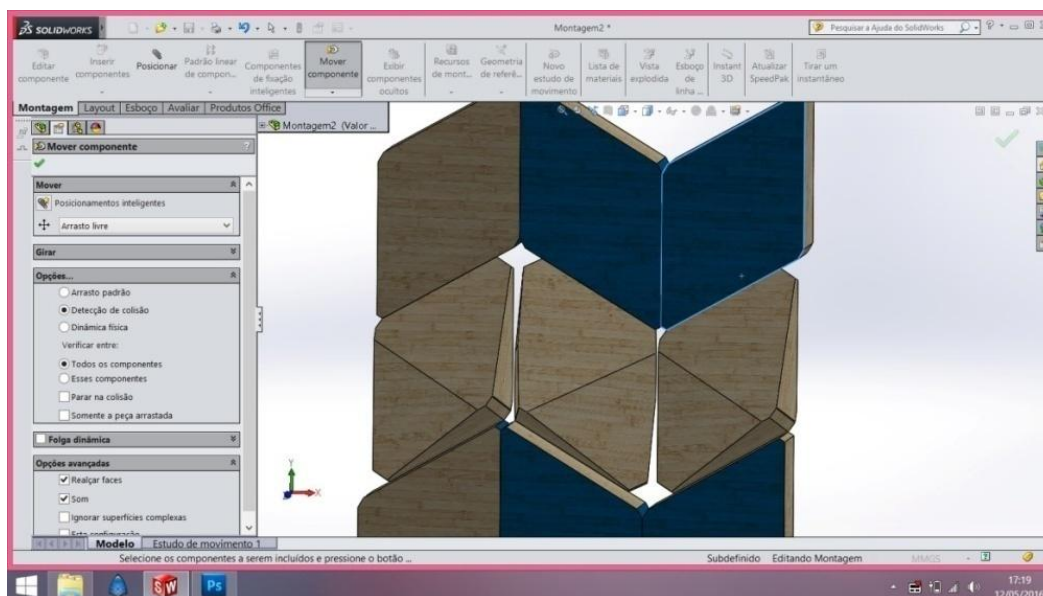
Figura 204 - Colisão 4 detectada (esq.) e correção (detalhe)



Fonte: Elaborado pela autora

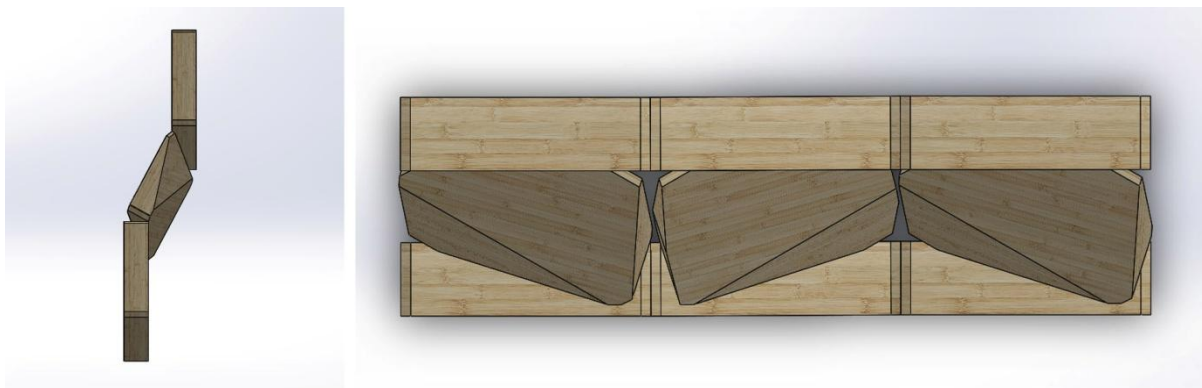
Ao final da correção das quatro colisões detectadas, observou-se a última colisão das peças, que indicou a máxima abertura possível da estrutura (figuras 205 e 206) e fechamento perfeito (figura 207).

Figura 205 - Colisão 5: máxima abertura da estrutura



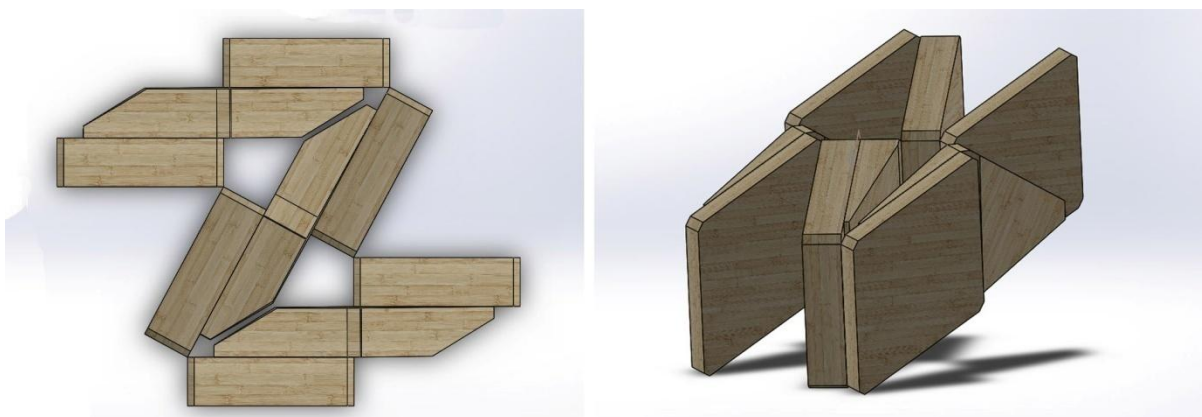
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 206 - Vista lateral e superior da estrutura com a máxima abertura



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 207 - Vista superior e em perspectiva da estrutura dobrada



Fonte: Elaborado pela autora

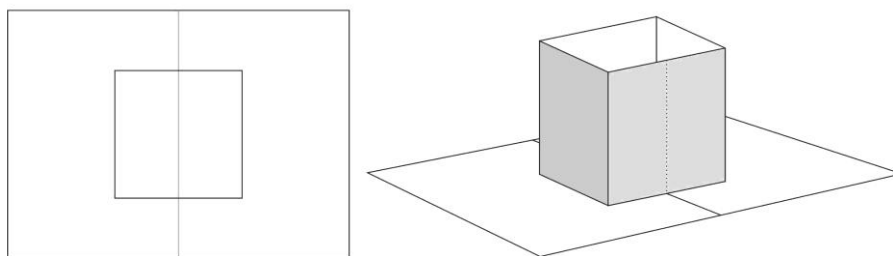
Observou-se que, ao contrário das estruturas pesquisadas anteriormente, este tipo de origami que utiliza múltiplas Dobras-Vs não se comporta do mesmo modo com espessuras maiores, sendo necessário empregar muitas modificações em sua geometria a fim de resolver as diversas colisões que forem aparecendo. Por outro lado, quanto menor for sua espessura, menos intervenções na geometria da peça podem ser necessárias. Assim, deve-se avaliar a real necessidade de utilização de determinadas espessuras superiores para este tipo de estrutura.

4.5. Técnica da Caixa Paralela

Como foi anteriormente descrito no subcapítulo que trata das técnicas de corte e de dobra, os modelos de *kirigami* 3D podem partir apenas de uma única peça (uma folha de papel) ou

da junção de múltiplas peças (várias folhas de papel). Os que partem da junção de múltiplas peças são, em sua grande maioria, os da modalidade 180° e 360° . A técnica selecionada para ser estudada nesta última seção foi a Técnica da Caixa Paralela, que consiste na montagem de uma estrutura independente a ser fixada em uma superfície de base (figura 208). O que precisa ser observado neste tipo de estrutura é que há infinitas possibilidades de criação de estruturas independentes, desde que elas sejam simétricas e fixadas exatamente na linha da dobra central da superfície de base, o que confere liberdade de criação e de aplicação.

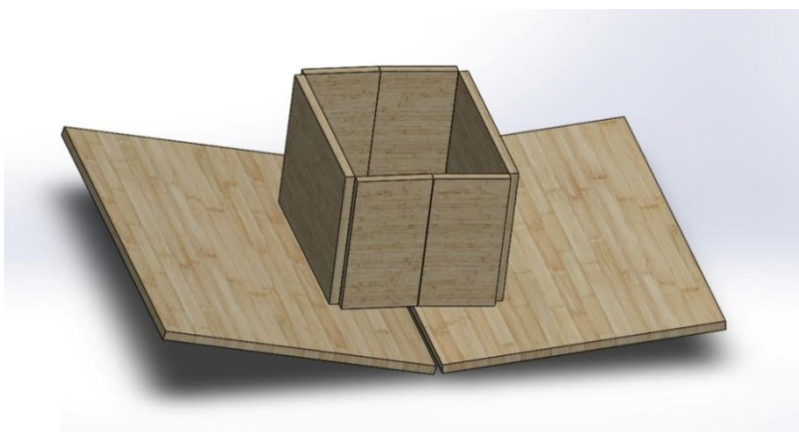
Figura 208 - Modelo base de Técnica da Caixa Paralela adotado



Fonte: Elaborado pela autora, baseada em Jackson (1993)

No caso deste modelo, passou-se diretamente para a etapa de modelagem tridimensional no SolidWorks. Ao iniciar, pensou-se primeiramente em trabalhar a estrutura conforme ela se apresenta em papel, ou seja, a base seria composta apenas por duas placas. Assim, cada placa ficaria fixada na estrutura independente (prisma) separadamente (figura 209). No entanto, esta configuração poderia exigir maior esforço das dobradiças sobre as placas da base, o que poderia acarretar em fragilidade e desgaste com o manuseio.

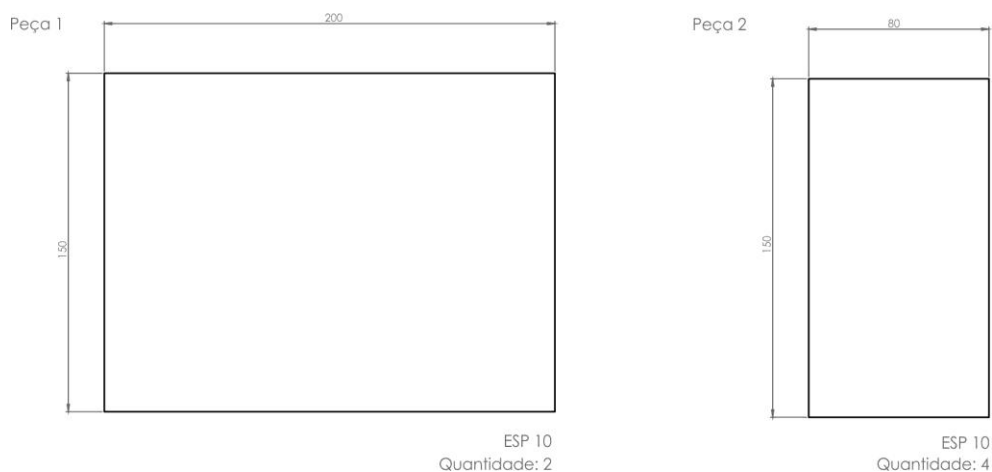
Figura 209 - Primeiro modelo com duas placas formando a base



Fonte: Elaborado pela autora

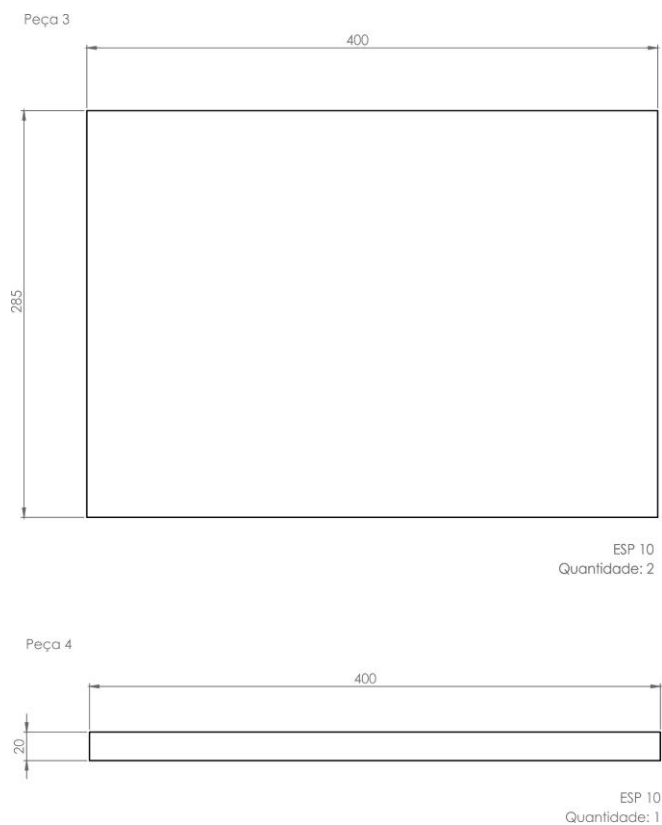
Assim, optou-se por inserir uma placa intermediária entre as duas placas da base a fim de reforçar a estrutura. Consequentemente, foram determinadas as dimensões para a estrutura independente (prisma) e para a base, visando o melhor aproveitamento das placas restantes de BLAc (figuras 210 e 211).

Figura 210 - Desenho técnico das peças do prisma (fora de escala) - medidas em mm



Fonte: Elaborado pela autora

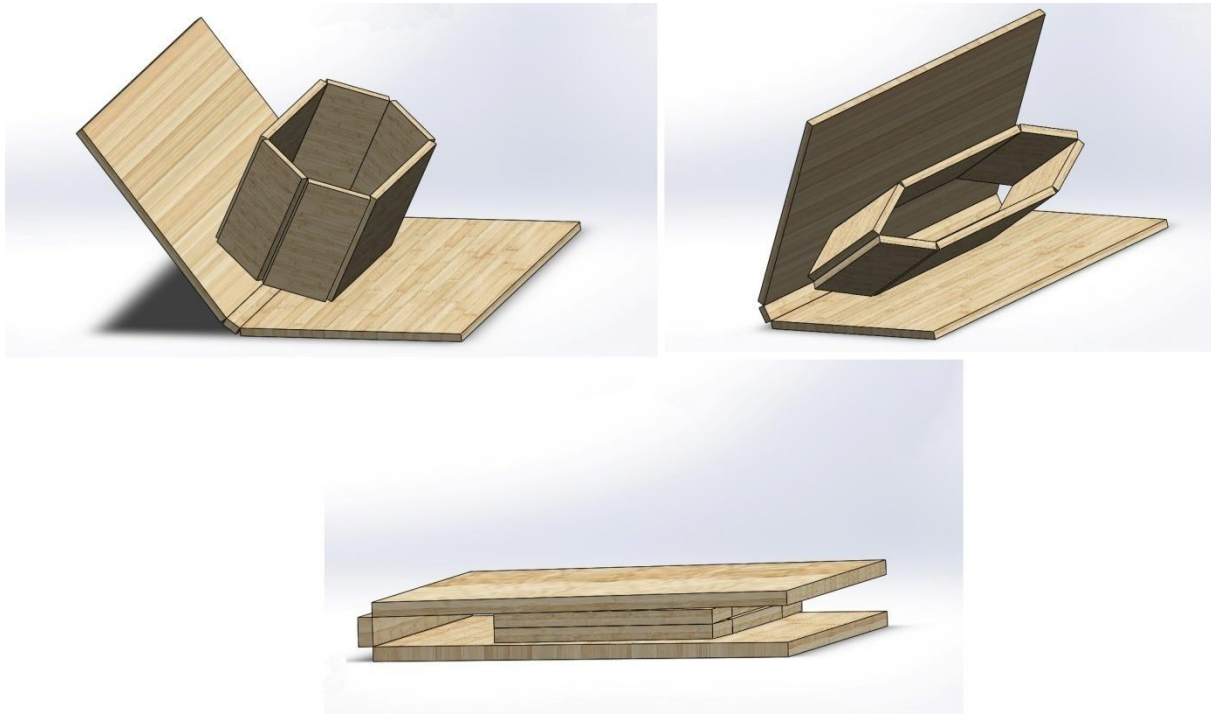
Figura 211 - Desenho técnico das peças da base (fora de escala) - medidas em mm



Fonte: Elaborado pela autora

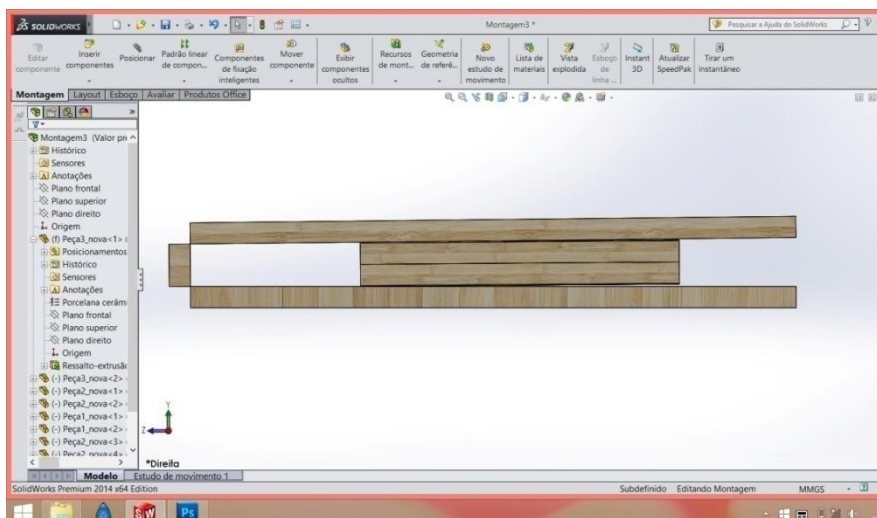
Utilizando-se recursos de posicionamento entre as peças, o conjunto foi montado sem problemas. Efetuando-se o fechamento e a abertura da estrutura, não ocorreram colisões e a placa intermediária conferiu mais segurança ao movimento (figuras 212 e 213).

Figura 212 - Estudo do movimento da estrutura montada



Fonte: Elaborado pela autora

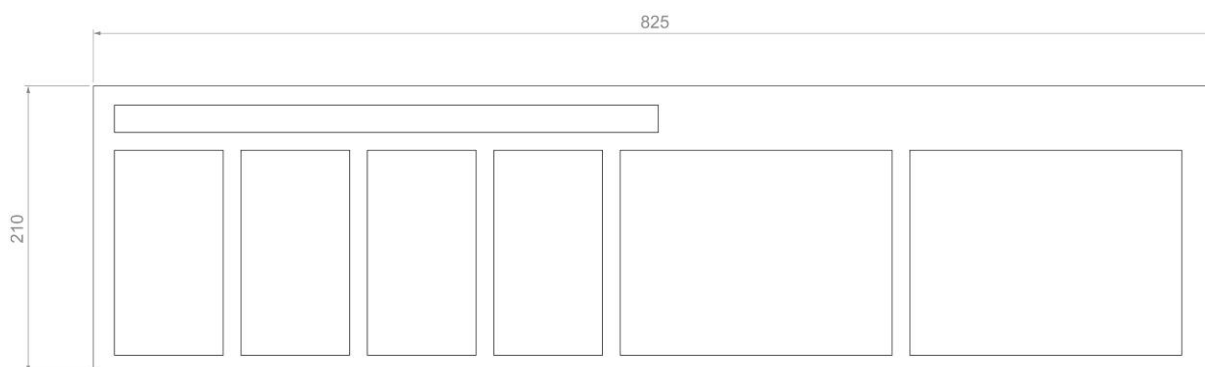
Figura 213 - Detalhe da vista lateral



Fonte: Elaborado pela autora

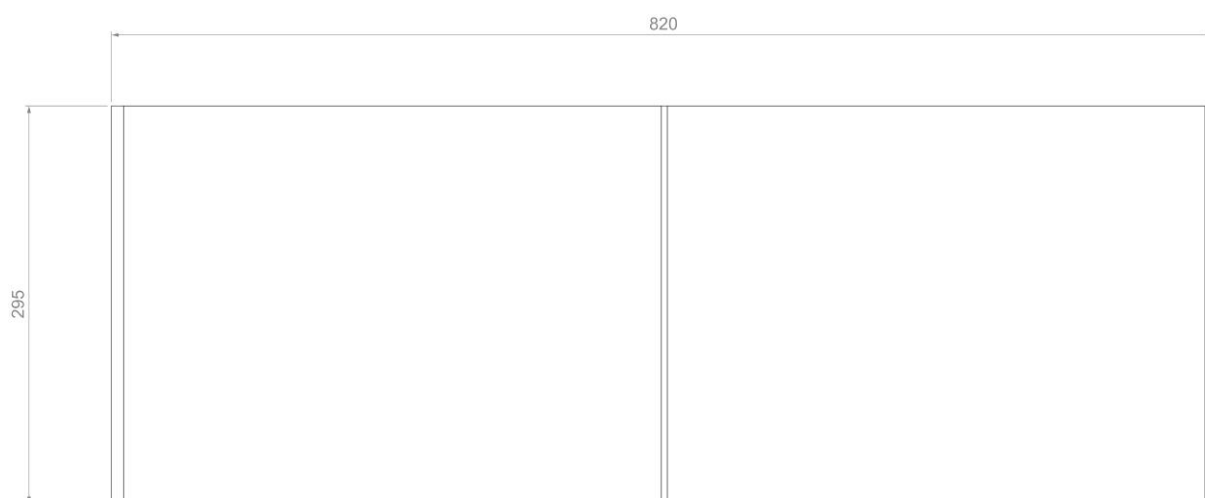
A partir da modelagem virtual concluída, organizou-se espacialmente todas as peças do modelo em uma placa de 825 mm x 210 mm e outra de 820 mm x 295 mm (figuras 214 e 215). Como elas possuíam formato retangular, todas foram cortadas em uma serra circular de bancada na Oficina de Madeira da UNESP.

Figura 214 - Distribuição das peças 1, 2 e 4 na placa de 825 mm x 210 mm



Fonte: Elaborado pela autora

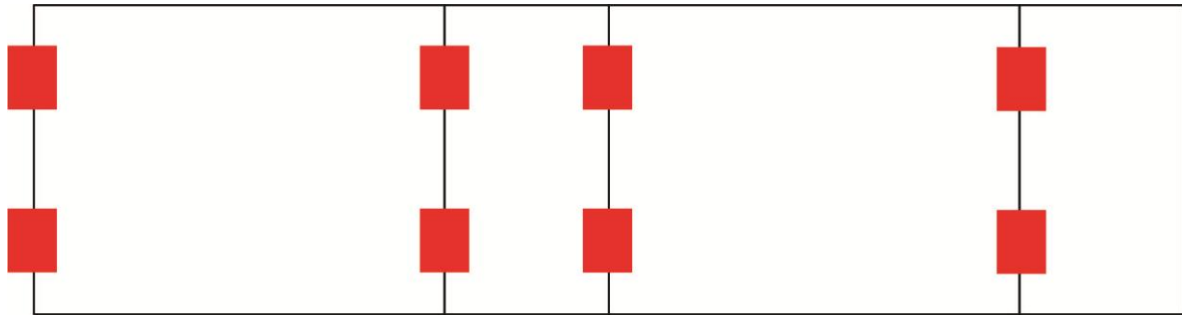
Figura 215 - Distribuição das duas peças 3 na placa de 820 mm x 295 mm



Fonte: Elaborado pela autora

Com as peças cortadas, procedeu-se à montagem do modelo. A estrutura prismática independente foi montada em primeiro lugar sem que ocorressem problemas (figura 216).

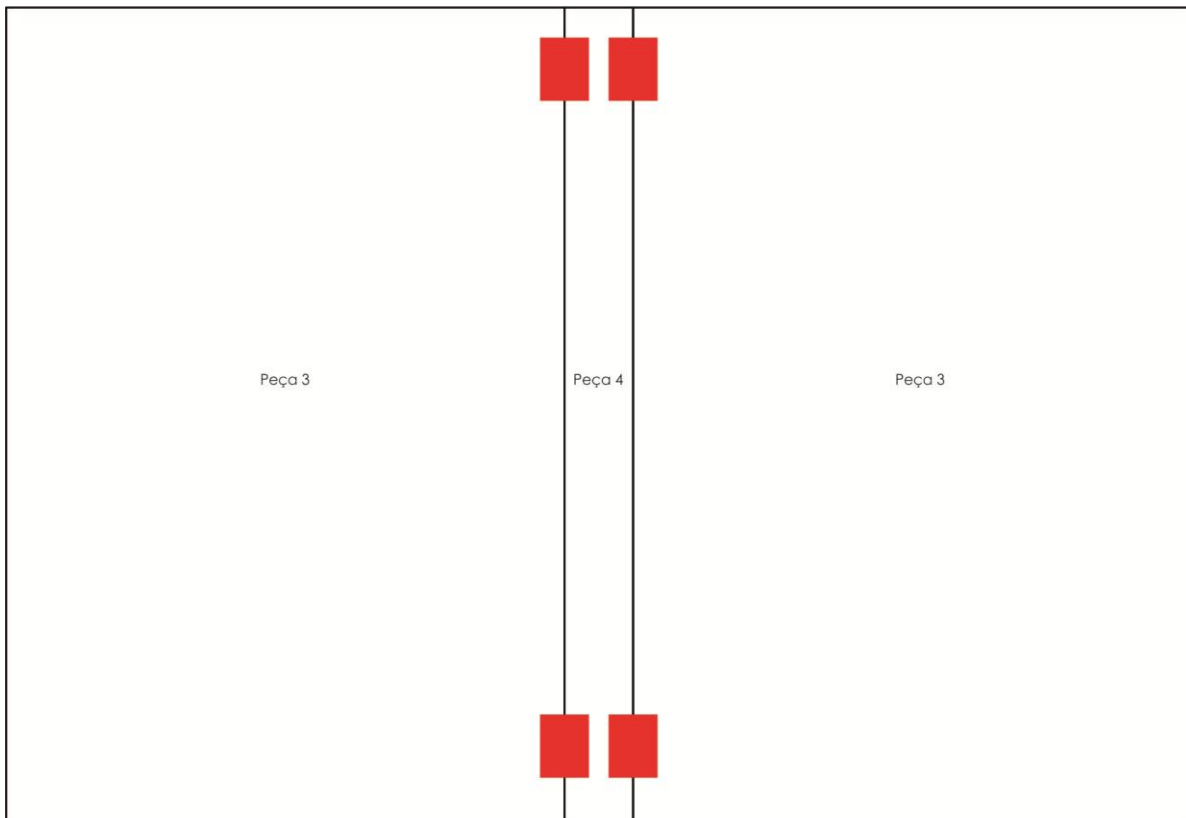
Figura 216 - Posicionamento das dobradiças na montagem do prisma



Fonte: Elaborado pela autora

No entanto, ao fechá-la, constatou-se que a largura total do prisma dobrado era de 30 mm, fato contribuído pela espessura das dobradiças quando fechadas. Deste modo, a peça 4 foi novamente cortada com largura de 35 mm para que ocorresse o fechamento perfeito da estrutura e para que pudessem ser instaladas as dobradiças. Assim, a base foi montada com a instalação de quatro dobradiças, conforme figura 217.

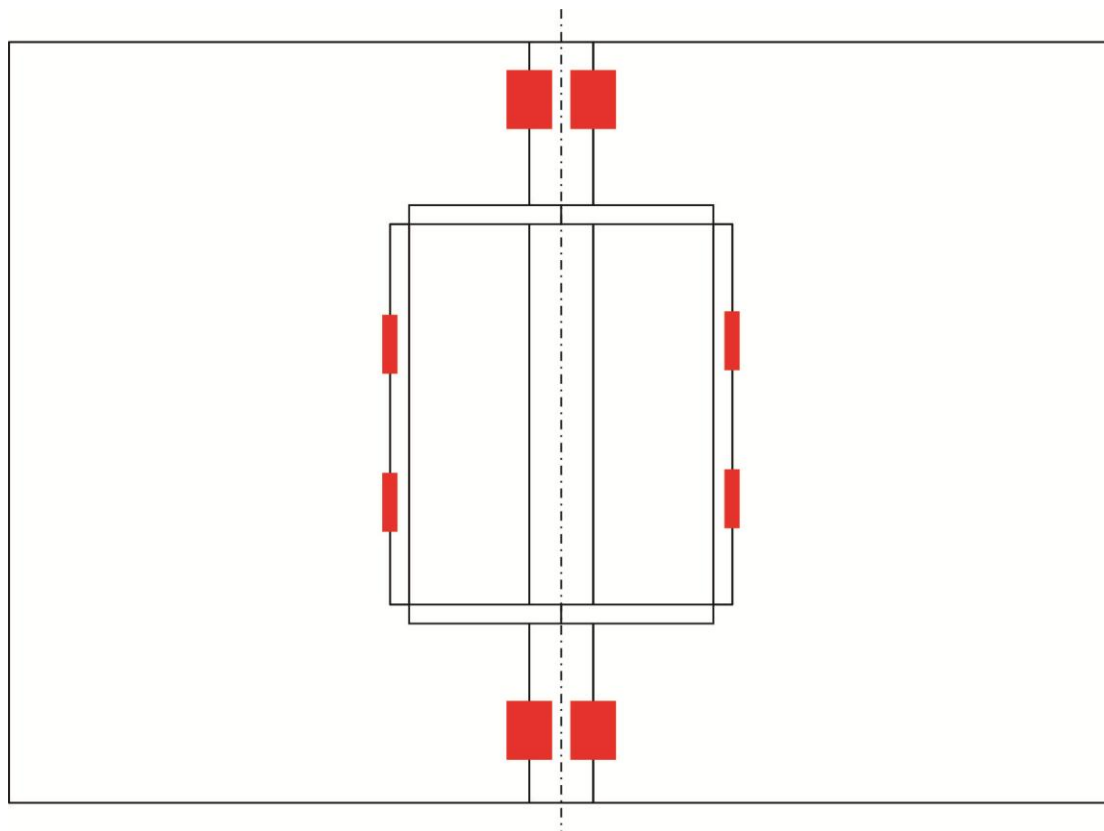
Figura 217 - Posicionamento das dobradiças na montagem da base



Fonte: Elaborado pela autora

Na montagem do prisma sobre a base, deve-se tomar o devido cuidado para que os eixos de simetria das duas estruturas coincidam, conforme Figura 218. Isso permite que a estrutura seja *flat foldable*, conforme apresentado no capítulo que trata das técnicas de corte e dobra.

Figura 218 - Posicionamento do prisma sobre a base na linha de simetria (linha traço-ponto) e localização das dobradiças (em vermelho)



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme todos os modelos anteriores, o modelo físico se comportou do mesmo modo que o modelo virtual, fechando-se e abrindo-se sem colisões (figura 219). Foi possível conferir ao modelo diferentes posicionamentos, que ampliam as possibilidades de aplicação (de bancos e mesas portáteis a arquiteturas provisórias), dependendo da escala em que projeta.

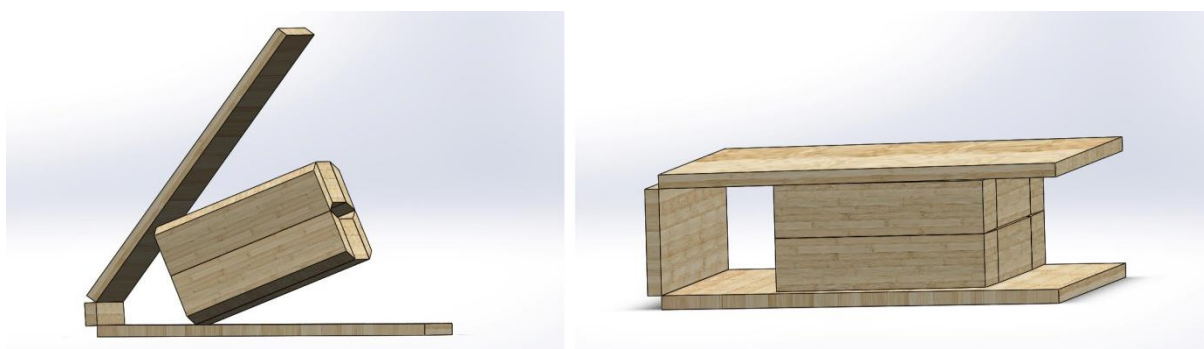
Figura 219 - Modelo final montado



Fonte: Elaborado pela autora. Foto: Ricardo K. Yamada

Para o teste do modelo virtual com espessura de 38 mm, optou-se por aplicá-la primeiramente na estrutura prismática independente. Na figura 220, notou-se que a espessura não alterou o movimento, mas foi necessário mudar a largura da peça 4 (intermediária entre as duas placas da base) levando-se em consideração a espessura do BLaC e das dobradiças a serem empregadas.

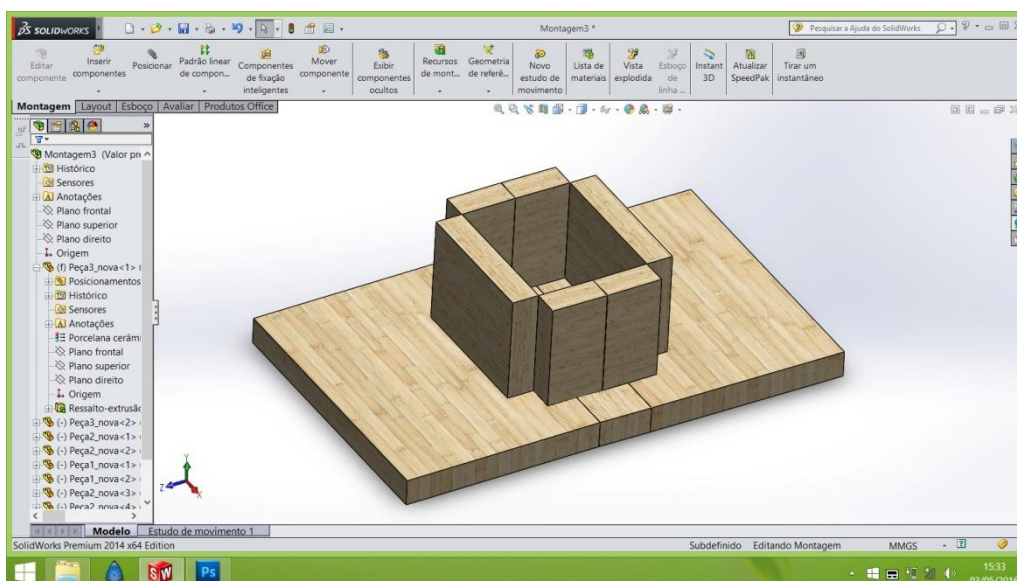
Figura 220 - Primeira etapa com espessura de 38 mm na estrutura independente. À esquerda, a peça 4 é muito pequena para ocorrer o fechamento total da estrutura. À direita, a peça 4 com a correção da medida



Fonte: Elaborado pela autora

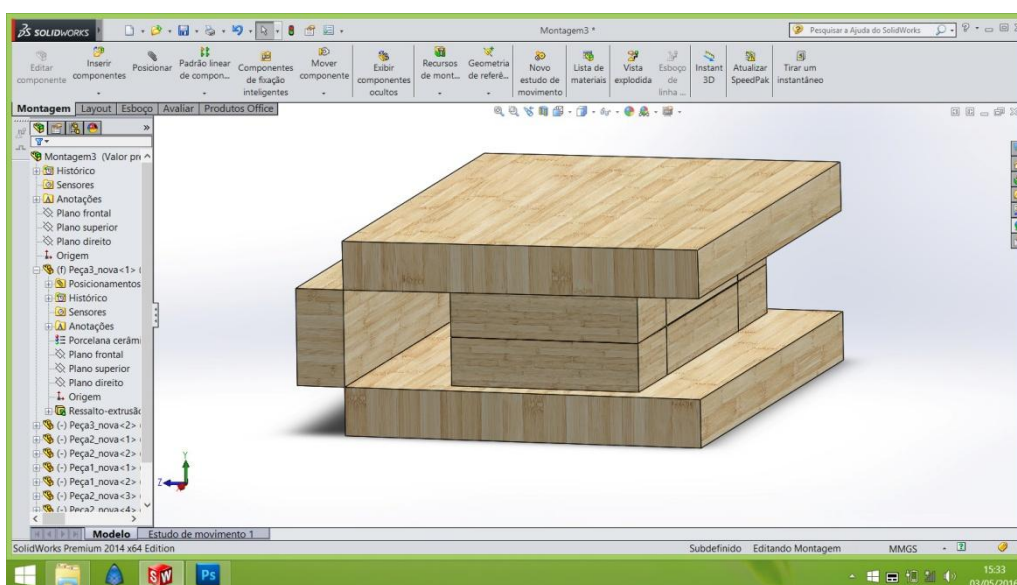
Na etapa seguinte, aplicou-se a espessura de 38 mm nas placas que fazem parte da base, o que não influenciou e nem alterou o movimento (figura 221 e 222).

Figura 221 - Vista em perspectiva do modelo aberto completo com espessura de 38 mm



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 222 - Vista em perspectiva do modelo fechado



Fonte: Elaborado pela autora

Com dobradiças maiores, obtém-se mais estabilidade na estrutura, mas sua espessura aberta e fechada podem interferir muito na montagem do modelo. Assim, sugere-se modelar virtualmente as dobradiças a serem empregadas e aplicá-las nos ensaios do modelo virtual, a fim de eliminar erros na geometria final das placas. Além disso, pode ser que a aplicação de rebaixos nas placas (como se observa em batentes de portas) diminua as alterações provocadas pelas dimensões das dobradiças.

4.6. A espessura e a relação com as colisões

Após a obtenção dos resultados com os cinco modelos selecionados para esta pesquisa, surgiu a seguinte questão: "É possível prever em quais situações podem ocorrer colisões?".

Em modelos de papel não se observa a colisão pois a espessura é mínima. Além disso, a flexibilidade deste material proporciona a possibilidade de deformação para efetuar o movimento que se deseja. No entanto, quando se insere espessura nas placas (especialmente quando são rígidas), a colisão entre elas pode ocorrer, mas apenas em alguns casos.

Analisando todo o processo, selecionou-se alguns fatores que podem influenciar a ocorrência ou não de colisões:

- Obliquidade entre as dobras
- Planificação total da estrutura
- Sobreposição de planos (dobras dentro de dobras)

No primeiro modelo pesquisado, a estrutura baseada na Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio do *Kirigami* 3D (Modalidade 90°), não ocorreu colisão entre as placas pois todas as dobras estavam localizadas paralelamente umas às outras, de modo alternado, formando uma sequência de dobras sanfonas (figura 223). Assim, pode-se afirmar que, em novos modelos que empreguem apenas dobras paralelas, não ocorrerá colisão.

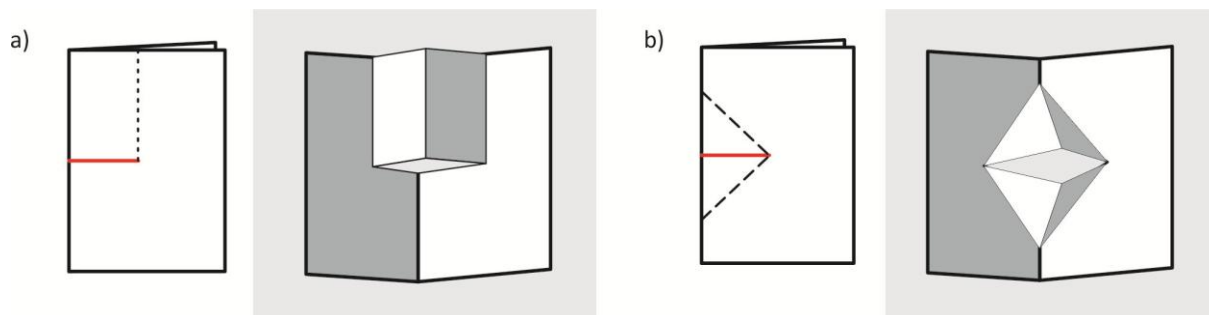
Figura 223 - Dobras paralelas umas às outras da primeira estrutura pesquisada



Fonte: Elaborado pela autora

No entanto, se o modelo for modificado de modo que as dobras fiquem oblíquas umas às outras, possivelmente ocorrerá colisão (figura 224).

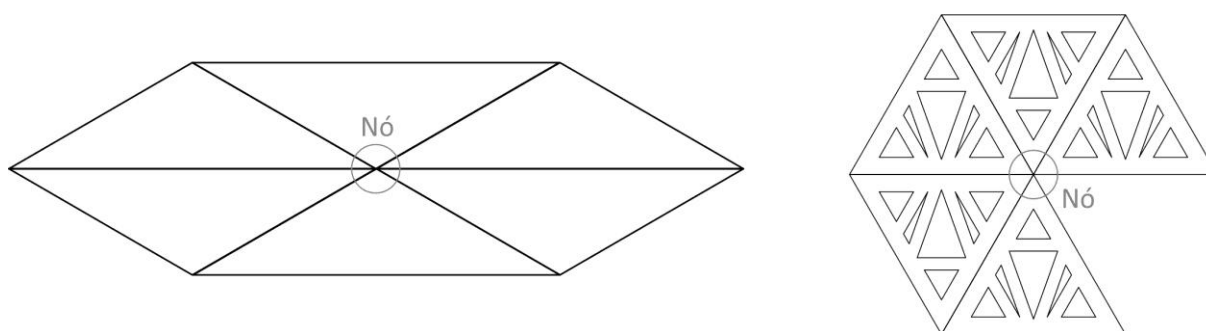
Figura 224 - a) Modelo com dobras paralelas (sem possibilidade de colisão); b) Modelo com dobras oblíquas (pode ocorrer colisão)



Fonte: Elaborado pela autora

Comparando as estruturas baseadas no Padrão Yoshimura e na Técnica da Caixa Diagonal do *Kirigami* 3D (Modalidade 360°), na primeira estrutura ocorreu colisão nos vértices das placas em torno do nó¹³ e na segunda, não. A razão principal se deve ao fato de que, no padrão Yoshimura, há uma completa pavimentação do plano com seis triângulos, formando um ângulo de 360° em torno de um nó (volta completa). Na Técnica da Caixa Diagonal analisada, são cinco triângulos equiláteros em torno de um nó, formando, portanto, 300°, ou seja, não completando a volta. Este espaço entre a primeira e a última peça imprimem liberdade de movimento ao modelo da direita da figura 225, não havendo colisão inicial. Assim, ao fechar este espaço, a estrutura se transforma automaticamente em tridimensional.

Figura 225 - Pavimentação completa do plano no modelo à esquerda em torno do nó. No modelo à direita, o nó não está completamente preenchido

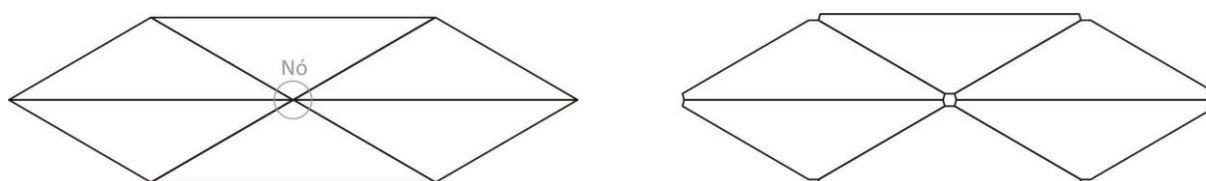


Fonte: Elaborado pela autora

¹³ Para que seja formada uma malha geométrica bidimensional, é preciso inicialmente que polígonos se conectem pelos vértices em torno de um único vértice em comum, chamado "nó", sem sobreposição, e que a soma de seus ângulos internos seja de 360°.

Quando, em torno do nó, há uma pavimentação completa, só existe a possibilidade de transformação desta malha bidimensional em uma estrutura tridimensional por meio de dobras. Para que esta transformação seja possível quando há alguma espessura significativa, é necessária a modificação da geometria das peças para a inserção de um espaço que possibilite o movimento, que ocorre com a aplicação de chanfros nos vértices (figura 226).

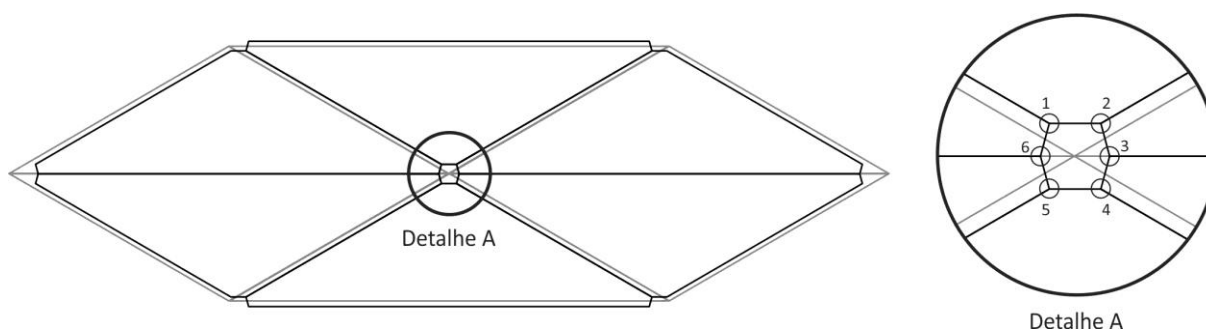
Figura 226 - Inserção do nó nos vértices dos triângulos da malha para possibilitar o movimento de dobra



Fonte: Elaborado pela autora

Os chanfros possibilitam a ocorrência de um deslocamento entre as placas, que permite o movimento de dobra. Na figura 227, em cinza, tem-se a malha inicial dos triângulos originais, e, em preto, a malha da estrutura final com o emprego dos chanfros. Percebe-se que, com a inserção de chanfros, o vértice único inicial se transforma em seis vértices, que atuam simultaneamente possibilitando o movimento de dobra requerido.

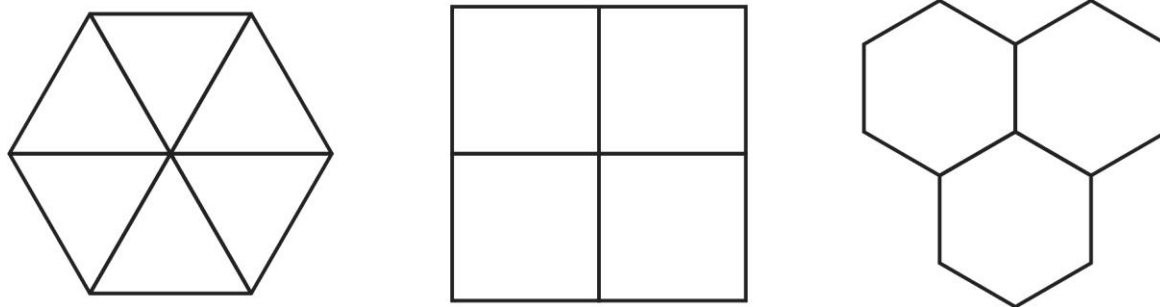
Figura 227 - Comparação da malha original de triângulos e a estrutura que possibilitou o movimento de dobra do Padrão Yoshimura. No detalhe A, observam-se os seis vértices gerados com o chanfro



Fonte: Elaborado pela autora

Existem apenas três possibilidades de serem obtidas malhas regulares bidimensionais: com triângulos equiláteros, quadrados ou hexágonos regulares (figura 228). Se puderem ser realizadas dobras a partir destas malhas, em todas as estruturas ocorrerá colisão.

Figura 228 - Malhas regulares



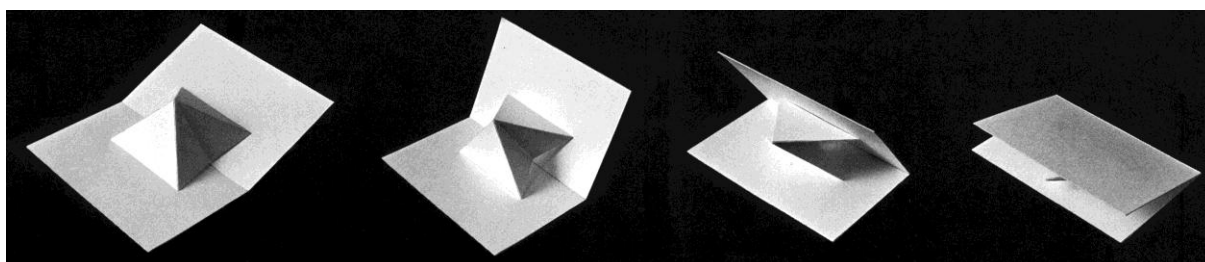
Fonte: Elaborado pela autora

No entanto, existem muitas outras malhas semirregulares e irregulares bidimensionais, que ampliam as possibilidades de geração de estruturas dobráveis, sendo algumas delas *flat foldable*. Pode-se prever que em todas elas ocorrerá colisão.

No modelo baseado na Técnica da Caixa Paralela do *Kirigami* 3D (Modalidade 180°) não ocorreu colisão pois se planificada a estrutura prismática, os nós não são completamente preenchidos e as dobras são todas paralelas umas às outras.

Indagando-se se ocorreria colisão no vértice de uma forma geométrica tridimensional que se achata conforme modelo da figura 229, efetuou-se um teste final com esta pirâmide de base quadrada.

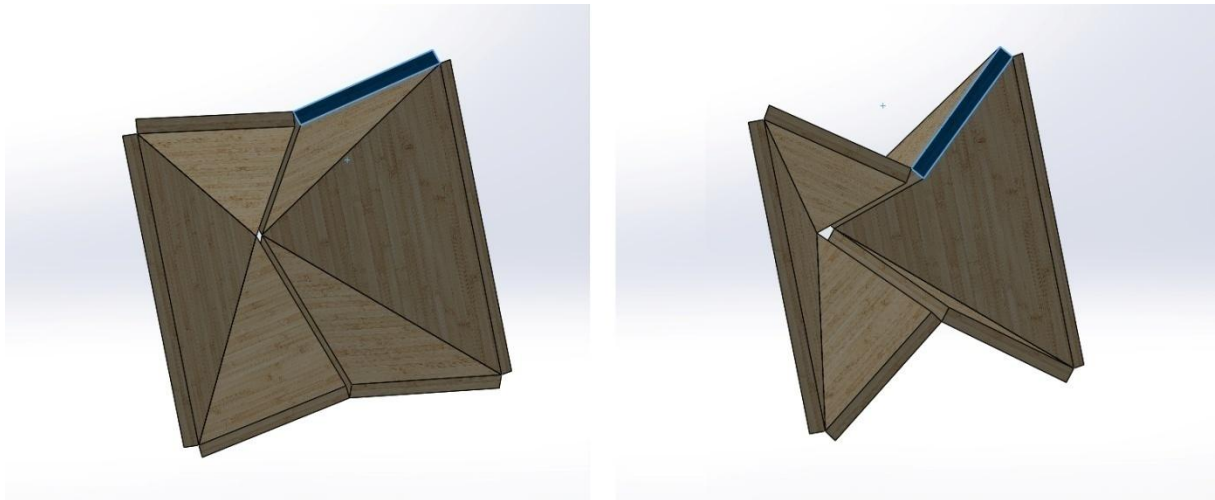
Figura 229 - Modelo com a Técnica da Caixa Paralela em formato de pirâmide



Fonte: CHATANI (1983)

Efetuando-se a modelagem virtual e montagem do modelo de teste, observa-se que, em sua movimentação, não ocorre colisão no vértice da pirâmide (figura 230).

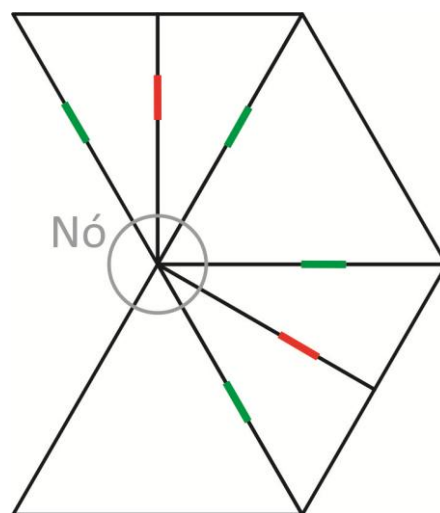
Figura 230 - Movimento da pirâmide



Fonte: Elaborado pela autora

Isso é possível porque, ao planificar a pirâmide, o nó não é totalmente preenchido pelas faces (figura 231). Assim, o vértice único de uma pirâmide com espessura de um papel se divide automaticamente em mais vértices quando suas faces tem espessura maior (figura 232).

Figura 231 - Planificação da pirâmide, podendo-se verificar que em torno do nó não há uma completa pavimentação



Fonte: Elaborado pela autora

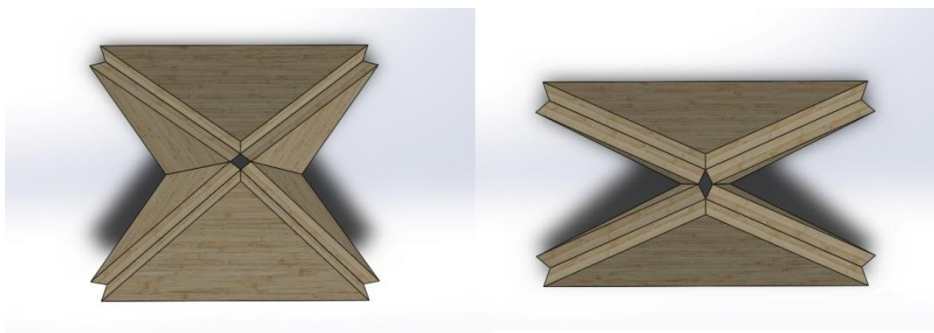
Figura 232 - Vista superior dos vários vértices da pirâmide e detalhe à direita



Fonte: Elaborado pela autora

Ao efetuar o movimento, os múltiplos vértices se movimentam sem colidir e sem a necessidade do chanfro observado nas malhas bidimensionais (figura 233).

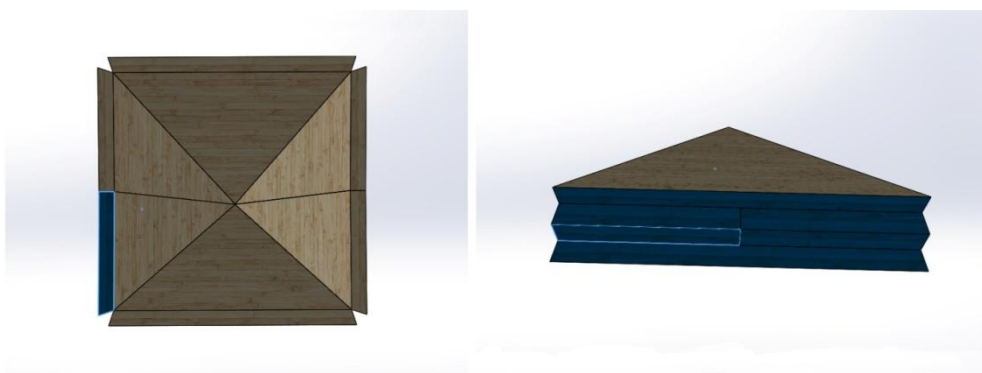
Figura 233 - Vista superior do movimento de fechamento da pirâmide



Fonte: Elaborado pela autora

As únicas colisões detectadas são: a que fixa a pirâmide em sua máxima abertura, e aquela que indica o fechamento total da estrutura (figura 234).

Figura 234 - Máxima abertura da pirâmide (à esq.) e fechamento total (à dir.)



Fonte: Elaborado pela autora

O último fator detectado que influencia na ocorrência de colisões é a presença de dobras dentro de dobras, ocasionando sobreposição de planos. Um bom exemplo disso é o que acontece no Miura-Ori quando se efetua o movimento de fechamento. Cada par de planos ligados por uma dobra vale envolve ou é envolvido (abraçado) por outro par de planos também ligados por dobra vale, o que é completamente inexistente no Padrão Yoshimura (figura 235).

Figura 235 - Comparativo do posicionamento de cada par de planos: Miura-Ori (acima) e Padrão Yoshimura (abaixo)



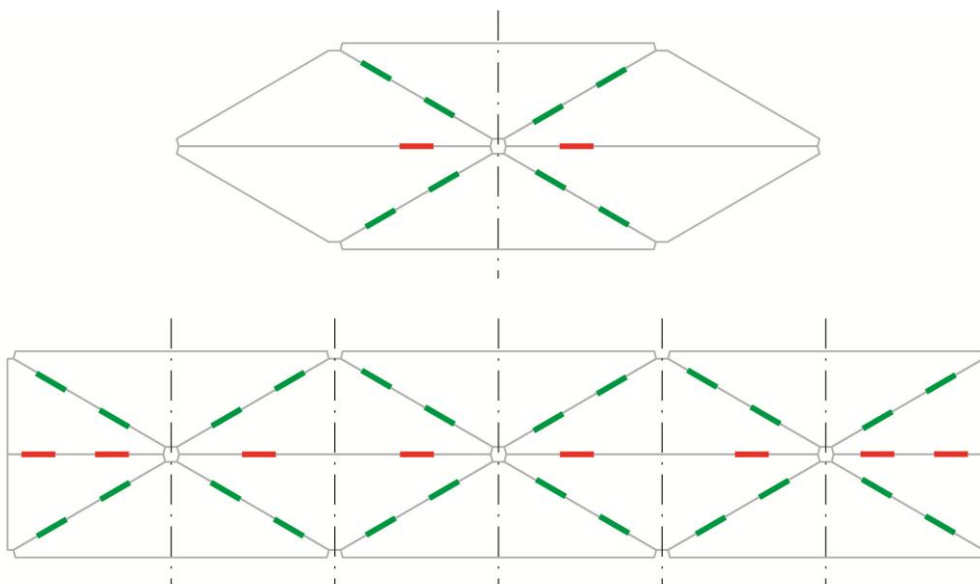
Fonte: Elaborado pela autora

Esta sobreposição de planos, presente no Miura-Ori, pode ocorrer devido ao formato dos planos (quadriláteros), diferentes do formato dos planos no Padrão Yoshimura (triangulares). No entanto, não é possível ainda afirmar se este é realmente um fator importante. Sabe-se apenas que ocorrerá colisão em modelos de origami e *kirigami* que apresentam sobreposição de planos, como em muitos casos de origami *tesselation*.

Outra observação que diferencia o Padrão Yoshimura do Miura-Ori é a relação simetria/assimetria entre o tipo de dobra em torno do nó. No primeiro, a sequência de

dobras montanha/vale/montanha se repete simetricamente (do tipo bilateral ou espelhada) em torno do nó. Posteriormente, ocorre a simetria (de translação) entre este agrupamento inicial que gera um conjunto linear (figura 236).

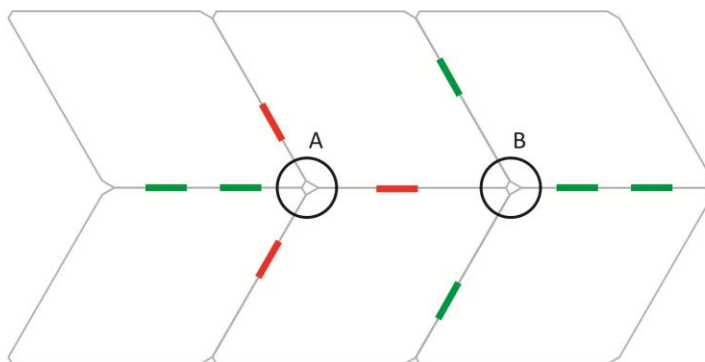
Figura 236 - Simetrias de tipos de dobra presentes no Padrão Yoshimura



Fonte: Elaborado pela autora

No Miura-Ori, não há simetria entre os tipos de dobra em torno do nó, como pode ser verificado na figura 237. Em volta do nó A, existe uma sequência assimétrica de três dobras vale e uma montanha. No nó B, ocorre o contrário: três dobras montanha e uma vale, podendo ser o fator que gera a sobreposição entre planos.

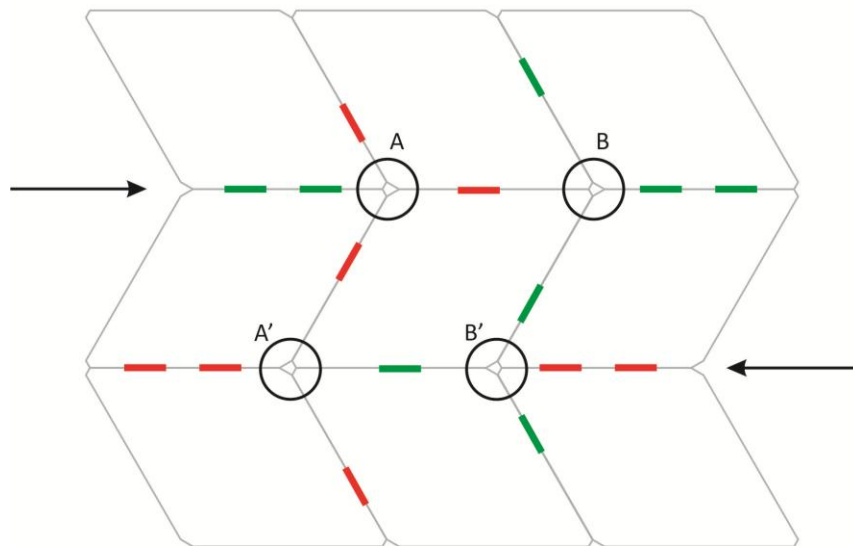
Figura 237 - Assimetria entre tipos de dobra em torno dos nós A e B do modelo Miura-Ori



Fonte: Elaborado pela autora

Seguindo a análise da simetria deste modelo, observa-se que os conjuntos lineares se repetem por simetria de translação, mas em direções contrárias, conforme ilustrado na figura 238.

Figura 238 - Simetria de translação invertida por conjuntos lineares



Fonte: Elaborado pela autora

Organizando-se os tipos de colisão que ocorreram nos experimentos, observaram-se três tipos diferentes:

- Colisão pelos vértices (Padrão Yoshimura e Miura-Ori)
- Colisão pelas bordas (Miura-Ori) e
- Colisão pelas faces (Miura-Ori).

A colisão pelos vértices ocorreu no Padrão Yoshimura e no Miura-Ori porque os dois modelos utilizavam dobras oblíquas umas às outras, e em torno dos nós havia o completo preenchimento por planos, formando um ângulo total de 360° .

A colisão pelas bordas e pelas faces ocorreu apenas no Miura-Ori, provavelmente devido à assimetria de tipos de dobras e ao formato dos planos, que acarretou em sobreposição dos mesmos.

5. Conclusões

Esta pesquisa iniciou-se motivada pela seguinte questão: como conferir novas funcionalidades ao BLaC para ampliar suas possibilidades de uso? Na busca por uma resposta à este questionamento, encontrou-se uma tendência recente mundial de inovação de produtos por meio da aplicação de técnicas de dobra e corte baseadas no origami e no *kirigami*, que, além de apresentar soluções práticas para problemas comuns da sociedade moderna, também possui funções estéticas e simbólicas que fazem com que o usuário se identifique e se conecte com o produto de modo afetivo.

Organizou-se, então, uma metodologia que alia a criação de modelos físicos em papel, a modelagem virtual das estruturas (com testes de montagem e movimento semelhantes ao real), prototipagem rápida e criação de modelos físicos com as placas de BLaC utilizando marcenaria. Definiu-se também algumas variáveis para delimitar a pesquisa: cinco tipos de dobra e corte; duas espessuras de placas (10 mm e 38 mm); um tipo de colagem das ripas em relação a sua direção; dois tipos de dobradiça pequena; um software de modelagem virtual; dois maquinários de prototipagem rápida. Cada etapa da metodologia dos procedimentos experimentais forneceu informações importantes para o desenvolvimento das estruturas, para análise das possibilidades e dos limites da aplicabilidade de técnicas do origami e do *kirigami* em BLaC.

Assim, de modo geral, os modelos físicos em papel possibilitaram:

- Visualização do movimento entre as partes;
- Definição da geometria e da proporção entre as partes;
- Detecção de pontos críticos antes da modelagem.

O software escolhido possibilitou:

- Modelagem rápida das peças;
- Montagem do conjunto de modo simples, utilizando-se conceitos de geometria de posição;
- Oferta de recursos úteis nesta pesquisa (detecção de colisão, atribuição de aparência visual de materiais e de aplicação de propriedades para testes mecânicos virtuais).

Em relação à prototipagem na Router CNC, pode-se concluir que:

- O emprego de fita VHB em pontos estratégicos e a adoção de distância mínima entre as peças contribui para maior aproveitamento da placa e aderência durante o processo, ou ainda, o uso de máquinas dotadas de mesa à vácuo, que dispensariam o uso de qualquer outro tipo de fixação, ao mesmo tempo que garantem o pleno travamento de toda a placa, incluindo as peças usinadas (desde que esteja absolutamente plana a fim de permitir a completa ação do vácuo);
- O emprego de fresas novas contribui na minimização da quantidade de fiapos durante a usinagem;
- Deve-se atentar à velocidade adotada na usinagem, para uma melhor prototipagem;
- O processo é mais rápido que o processo manual, especialmente para formas de peças mais detalhadas e complexas;
- Há a preservação e a fidelidade da geometria das peças.

Quanto à prototipagem na Rolland, pode-se concluir que:

- Permitiu a usinagem de chanfros em faces;
- Permitiu a preservação e a fidelidade da geometria das peças;
- A adoção de medida mínima da placa para usinagem de cada peça causa relativa perda de material;
- Deve-se atentar à velocidade adotada na usinagem e às fresas corretas para desbaste e acabamento, para a otimização do processo;
- Assim como na Router CNC, o processo na Rolland é mais rápido que o processo manual, especialmente para formas de peças mais detalhadas e complexas;
- Há a ocorrência de quebras em BLaC com espessuras finas.

Em relação à espessura da placa, os testes virtuais com espessura maior demonstraram que:

- Uma vez que a geometria das peças foi adequada à espessura de 10 mm, sua alteração não influenciou na capacidade de achatamento das estruturas (*flat foldability*) em quatro das cinco técnicas pesquisadas;
- A espessura é um fator correlacionado às dobradiças, devendo-se selecionar a mais adequada para cada caso.

Outra conclusão importante desta pesquisa é que todas as estruturas físicas em BLaC se comportaram como o modelo em papel e o modelo virtual. No entanto, existem algumas particularidades que merecem ser ressaltadas para cada técnica de dobra e corte selecionadas.

No primeiro experimento realizado, com a Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio da Modalidade 90° do *Kirigami* 3D, notou-se uma diferença significativa entre o modelo físico em papel e o modelo estabelecido para a etapa de prototipagem rápida. Embora o primeiro aproveitasse todo a área do material, com cortes precisos e finos realizados por estilete, o corte nas placas de BLaC necessitou de um espaço maior que o previsto entre as peças, devido à espessura da fresa e ao possível deslocamento das partes durante a prototipagem.

Dessa maneira, em relação às dobradiças, conclui-se que:

- Há a necessidade da modelagem virtual da dobradiça a ser adotada, a fim de se obter a geometria final mais adequada para a montagem do modelo físico;
- Há, ainda, a necessidade de empregar rebaixos para a fixação das dobradiças, aproveitando o recurso da CNC, a fim de melhor acomodá-las, diminuir a altura ocupada por elas, e minimizar o impacto de sua espessura.

A segunda estrutura em BLaC, baseada no Padrão Yoshimura, ao ser modelada virtualmente, necessitou do emprego de chanfros nos vértices, necessário devido à espessura das placas. Ao resolver esta questão, o modelo se comportou do mesmo modo que o modelo em papel, apresentando a mesma flexibilidade de movimentos e configurações.

A geração da terceira estrutura, com a Técnica da Caixa Diagonal da modalidade 360° do *Kirigami* 3D, esbarrou na limitação da disponibilidade no mercado de dobradiças com giro total nesta angulação. Se utilizada outra estratégia de dobra (tecido, pinos etc.), este modelo pode ser possível de ser adaptado em placas rígidas. Outra limitação neste modelo foi a instalação de dobradiças internamente à estrutura, que impossibilitou a conclusão conforme previsto. Se instaladas de outro modo, a estrutura pode funcionar, mas as dobradiças estarão bem visíveis, fato que deve ser analisado para algumas aplicações, especialmente em termos estéticos.

A Dobra Miura-Ori se mostrou a mais complexa em termos de transposição do modelo em papel para uma estrutura em BLaC em diferentes espessuras. À medida que se aumentava a espessura, era necessária uma adaptação da geometria da peça inicial, a fim de não ocorrer colisões (de vértice, de borda e de face). Aliás, o modelo com esta técnica foi o único que necessitou de modificações quando alterada a espessura da placa.

Também para a sua prototipagem, foi necessário outro maquinário, a Rolland, para execução dos chanfros adotados em algumas peças. Além disso, o BLaC se rompeu em alguns pontos (mais finos e frágeis) durante o processo de usinagem, que necessitaram de uma correção na geometria. Para a montagem do modelo físico, adotou-se outra dobradiça, um pouco maior e mais resistente que a adotada nos modelos anteriores, que resultou em uma estrutura mais estável.

A modelagem e a montagem do modelo da Técnica da Caixa Paralela foram as mais rápidas de todos, devido à simplicidade da estrutura, se comparada com as dos anteriores, e à facilidade de execução pelos dados obtidos nos experimentos que o antecederam. Isso comprova que a metodologia é eficiente e os dados obtidos geraram informações importantes para o desenvolvimento de novos projetos.

As estruturas geradas apresentam qualidade plástica próxima aos conceitos básicos do origami e do *kirigami*: unidade, totalidade, simplicidade, flexibilidade e modularidade. Esta última, particularmente, facilitou:

- A modelagem virtual de peças;
- A montagem virtual das estruturas;
- A realização do teste virtual;
- O aproveitamento de material;
- A montagem dos modelos físicos;
- O transporte;
- A flexibilidade de configurações e de uso.

Constatou-se maior facilidade de construção dos modelos gerados/baseados no *kirigami* 3D do que nas técnicas de dobra do origami escolhidas. Por isso, existem mais possibilidades de criação de novos designs a partir dos modelos baseados em *kirigami* 3D, e consequente aplicabilidade no Design, na Arquitetura e na Engenharia. A aplicação da

técnica do origami pode ser mais limitada, devido às especificidades e complexidade de dobras, no caso específico de uso em materiais rígidos. Em materiais mais flexíveis e deformáveis, essa limitação pode não ser significativa.

A investigação de um processo de construção de estruturas *flat foldable* articuladas em BLaC baseados nos princípios do origami e do *kirigami* validou importantes estratégias para a sua aplicação e determinou possibilidades e limites. Estabeleceu-se uma metodologia de projeto utilizando as estratégias de dobra e corte para o design de novos produtos, explicitando possíveis caminhos, etapas de execução, técnicas de dobra e de corte existentes e suas particularidades (com possibilidades de variação) e tecnologias de prototipagem testadas com BLaC.

Os resultados apresentados comprovam a hipótese de que a aplicação das técnicas de corte e de dobra do origami e do *kirigami* ao BLaC, especialmente da qualidade *flat foldability*, pode promover transformações técnicas e estéticas, novas funcionalidades e aplicações que viabilizam e ampliam as possibilidades de novas estruturas com esse tipo de material.

6. Desdobramentos da pesquisa

Neste último capítulo, são levantados possíveis desdobramentos desta pesquisa, tanto em relação às possibilidades de aplicação dos resultados em produtos diversos como aprofundamento em algumas questões que não estavam no escopo deste projeto mas que merecem atenção.

O sucesso com o experimento aplicando a Técnica dos Múltiplos Cortes com Desvio da Modalidade 90° do *Kirigami* 3D demonstra que a mesma pode ser explorada em múltiplas variações, possibilitando novas funcionalidades e aplicações, como divisórias de ambientes, mobiliário dobrável, displays e acabamento em ambientes com necessidades específicas (conforto térmico e acústico em cenários de teatro, rádio e televisão) entre outras.

A forma da estrutura gerada pelo Padrão Yoshimura apresenta um potencial uso em arquiteturas temporárias, como abrigos, showrooms ou *stands* de exposição. No entanto, como as peças possuem chanfros nos vértices, quando compõem o conjunto, surgem pequenos orifícios distribuídos ao longo da estrutura. Este fator deve ser considerado quando se aplicar esta técnica em alguns tipos de projetos, como coberturas em ambientes abertos, pois não há uma completa vedação da estrutura.

Variações da Técnica da Caixa Diagonal da modalidade 360° do *Kirigami* 3D podem ser empregadas no desenvolvimento de luminárias dobráveis, jogos e brinquedos educativos, entre outras possibilidades. O modelo gerado da Técnica da Caixa Paralela podem ser modificado e complementado para ser empregado como um novo mobiliário dobrável ou como construções temporárias dobráveis, pois apresentam facilidade construtiva e de transporte.

Por fim, a estrutura baseada no Miura-Ori, apresenta um potencial para ser pesquisada como painel acústico dobrável de ambientes. Como ele se abre e se fecha, possui diferentes configurações que, se bem exploradas, podem influenciar padrões de som específicos. Assim como a primeira estrutura gerada, pode ser explorada como acabamento em ambientes com necessidades específicas (conforto térmico e acústico em cenários de teatro, rádio e televisão).

Em relação ao BLaC, seria importante que as placas fossem analisadas quanto ao seu comportamento mecânico a fim de se obter uma real compreensão das possibilidades de

uso. Para isso, podem ser realizados testes de comportamento mecânico para cada placa e para as diferentes estruturas, dependendo da aplicação prática (Design, Arquitetura ou Engenharia).

Além disso, existem muitas variedades de dobradiças no mercado, próprias para uso em diversas situações. Analisá-las quanto aos esforços que podem admitir ao serem solicitadas em cada tipo de estrutura e quanto à fadiga também são possibilidades de estudos futuros. Dependendo da aplicação a que se destinarão as estruturas, as dobradiças devem ser analisadas em testes de resistência específicos.

Outros possíveis desdobramentos a partir desta pesquisa são variações de estratégias de articulações, como tecidos e pinos, em técnicas de corte e dobra, além de verificar se ocorrem e quais seriam as influências de diferentes espessuras. Seria importante verificar as variações geométricas que podem ocorrer, por aumento das dimensões da dobradiça e/ou da espessura da placa, em função dos diferentes tipos de articulações/estruturas, considerando-se afastamento entre as placas, limites das dobras, desbastes etc.

Com o design *orikiri*, é possível obter produtos com maior significado, inovador e inteligente. Com mais pesquisas dentro desta linha, potencializa-se a criação de objetos com funcionalidade prática, estética e simbólica, e diversas possibilidades de variação, aplicação e modificação, inclusive com outros materiais rígidos como placas de madeira, metal, entre outros. Abre-se aqui um novo caminho de exploração e descobertas do que uma técnica milenar em papel pode ajudar a resolver problemas da sociedade moderna.

7. Referências bibliográficas

3SIXØ ARCHITECTURE. **STIX Commercial Project**. Providence, Rhode Island, 2009. Disponível em: <<http://3six0.com/portfolio-item/stix/>>. Acesso em: 10 dez 2014.

ADI. Associazione per il Disegno Industriale. **XXIII Compasso d'Oro 2014: I vincitori**. 2015. Disponível em: <<http://www.adi-design.org/xxiii-compasso-d-oro-adi-i-vincitori.html>>. Acesso em: 5 fev 2015.

ARTEMIDE. **In-Ei Issey Miyake**. 2014. Disponível em: <<http://www.artemide.com/prodotti/prodotti.action?data.catalogId=0>>. Acesso em: 5 fev 2015.

ASCHENBACH, M. H. C. V.; FAZENDA, I. C. A.; ELIAS, M. D. C. **A arte-magia das dobraduras**. São Paulo: Scipione, 1992.

ADLER, E. D. **"A new unit" – The Arte and Pedagogy of Josef Albers**. 2004. 108p. Dissertação (Mestrado) – University of Maryland, Maryland, EUA, 2004.

ALVARADO, P. **Bamboo chairs, retractable tables by Union Elemental**. Treehugger, 2009. Disponível em: <http://www.treehugger.com/sustainable-product-design/bamboo-chairs-retractable-tables-by-union-elemental.html>. Acesso em: 10 dez 2014.

AZZINI, A.; BERALDO, A. L. **Métodos práticos de tratamento do bambu**. Campinas, SP: Gráfica da Unicamp, 2001.

BARELLI, B. G. P.; PEREIRA, M. A. R.; LANDIM, P. C. A tecnologia na confecção de protótipos de bambu laminado colado desenvolvida na UNESP-Bauru. In: **Design, arte e tecnologia**. São Paulo: Rosari, Universidade Anhembi Morumbi, PUC-Rio e UNESP-Bauru, 2008.

BATEMAN, A. **TESS: origami tessellation software**. Paper Mosaics. 2013. Disponível em: <http://www.papermosaics.co.uk/software.html>. Acesso em: 10 jan 2015.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.

BRASIL. Lei nº 12.484, de 08 de setembro de 2011. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 set. 2011. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12484.htm>. Acesso em: 31 jan 2015.

BURI, H. U. **Origami – Folded Plate Structures**. 2010. 275p. Tese (Doutorado) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suíça, 2010.

BURI, H. U.; WEINAND, Y. ORIGAMI-folded plate structures, architecture. In: Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan. **Anais eletrônicos...** Japan: p.2-5, 2008. Disponível em: http://www.ewpa.com/Archive/2008/june/Paper_286.pdf. Acesso em: 10 dez 2014.

CAMPOS, A. de; PLAZA, J. **Poemóviles**. 2 ed. Brasiliense, 1984.

CHATANI, M. **Origamic architecture of Masahiro Chatani**. Tokyo, Japan: Shokokusha Publishing Company Ltd., 1983.

_____. **Key to origamic architecture**. Tokyo, Japan: Shokokusha Publishing Company Ltd., 1985.

CHATANI, M.; NAKAZAWA, K. **Origamic Architecture**. Japan: Ondori, 1994.

CHEONG, C. M.; ZAINODIN, H.; SUZUKI, H. Origamic architecture in the cartesian coordinate system. **Origami4 – International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education**, 4., 2006, Pasadena, California. Ed. 2009. Roberto J. Lang (ed), p. 335 – 347.

CIPRA, B. A. In the fold: Origami meets mathematics. **SIAM News**: v. 34, n. 8, p. 1-4, 2001. Disponível em: <<http://siam.org/pdf/news/579.pdf>>. Acesso em: 12 jan 2015.

COLLA, W. A. **Efeito do tratamento térmico nas características físicas e mecânicas do bambu (*Dendrocalamus giganteus Munro*)**. 2010. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas - SP, 2010.

DEBOER, D. Bamboo architecture and the possibilities. In: **Pacif Northwest Bamboo Agro-Forestry Workshop**. Port Townsend, Washington, USA, jun 1997.

DEMAINE, E. D.; DEMAINE, M. L.; KOSCHITZ, D. Reconstructing David Huffman's Legacy in Curved-Crease Folding. In: **Origami⁵**: Proceedings of the 5th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education, OSME 2010, Singapore, 13-17 julho, 2010, p. 39-52, A K Peters. Disponível em: <<http://erikdemaine.org/curved/history/>>. Acesso em: 15 ago 2014.

DONDIS, D. A. **Sintaxe da Linguagem Visual**. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

ECORI. **Pisos e revestimentos ecológicos**. Disponível em: <<http://www.ecori.com.br/>>. Acesso em: 21 jan 2015.

ENVIRONMENTAL BAMBOO FOUNDATION. Vertical soak diffusion for bamboo preservation. 2005. Disponível em <<http://www.bamboocentral.org/index1.htm>>. Acesso em: 19 jan 2015.

ERNST GISELBRECHT + PARTNER. **Showroom Kiefer technic**. Fertigstellun, Áustria, 2007. Disponível em: <<http://www.giselbrecht.at/>>. Acesso em: 10 dez 2013.

FARRELY, D. **The book of bamboo**. San Francisco, EUA: Sierra Club Books, 1984.

FEI, L. J.; SUJAN, D. Origami Theory and its Applications: A Literature Review. **World Academy of Science, Engineering and Technology**: n.73, p. 1131-1135, jan 2013.

FERREIRA, L. M. C. **Design de móveis e bambu laminado colado: consideração ao tratamento térmico e às características físicas e mecânicas com vistas ao projeto de produtos.** 2014. 180p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília - UnB, Brasília-DF, 2014.

FILGUEIRAS, T.S.; SANTOS-GONÇALVES, A.P. A checklist of the basal grasses and bamboos in Brazil. **Bamboo Science & Cultura**. Albany: American Bamboo Society, v. 8, p.7-18, 2004.

_____. Bambus nativos no Brasil: oportunidades e desafios para seu conhecimento. I Seminário Nacional do Bambu: Estruturação da Rede de Pesquisa e Desenvolvimento, 1, 2006, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: CPAB, Universidade de Brasília, 2011, p.33-42.

FOREIGN OFFICE ARCHITECTS. **Carabanchel Housing**. 30 maio 2008. In: ArchDaily. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/1580/caranbachel-housing-foreign-office-architects/>>. Acesso em: 10 dez 2014.

FÜSSLER, U. **Design by tool design**. 2012. Disponível em: <<http://scripts.crida.net/gh/wp-content/uploads/2012/07/Designbytool design.pdf>>. Acesso em: 13 ago 2013.

GARIBI, I. **Garibi origami**. 2011-2014. Disponível em: <<http://www.garibiorigami.com/>>. Acesso em: 12 dez 2014.

GARDINER, M. A brief history of oribotics. In: LANG, Robert J. **Origami⁴: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education**. Natick, EUA: A. K. Peters, 2009. Cap. 6, p. 51-60.

GARRIDO, M. V. **Homepage**. 2012. Disponível em: <http://marivi_10.tripod.com/myhomenew.html>. Acesso em: 31 jan 2015.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GJERDE, E. **Origami tessellations: awe-inspiring geometric designs**. Wellesley, Massachusetts: AK Peters Ltd, 2009.

GLOBAL VILLAGE SHELTERS. **Homepage**. Connecticut, 2013. Disponível em: <http://www.globalvillageshelters.com/>. Acesso em: 20 fev 2016.

HAGIWARA, I. From origami to origamics. **Japan Journal, Science and Technology**: jul, 2008. Disponível em: <http://www.japanjournal.jp/tije/show_art.php?INDyear=08&INDmon=07&artid=e5861311b3ad5867ae67641f43638f53> Acesso em: 16 jul 2014.

HAN, J.; YAMAZAKI, K.; NISHIYAMA, S. Optimization of the crushing characteristics of triangulated aluminum beverage cans. **Structural and Multidisciplinary Optimization**: v. 28, n1, p. 47-54, ago 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00158-004-0418-8>>. Acesso em: 26 mar 2013.

HARA, T.; SUGIHARA, K. Computer Aided Design of Pop-up Books with Two-dimensional V-

fold Structures. In: JAPAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL GEOMETRY AND GRAPHS, 7., 2009, Kanazawara, Japão. **Anais eletrônicos...** Kanazawara, Japan, 2009. Disponível em: <http://www.jaist.ac.jp/~uehara/JCCGG09/short/paper_69.pdf> Acesso em: 16 jun 2013.

HIDALGO-LÓPEZ, O. **Bamboo: the gift of the gods**. Bogotá, Colombia: D'vinni Ltda, 2003. 553p.

HONDA, I. **The world of origami**. Tokyo: Japan Publications, 1969.

IBUKU. **Luxury bamboo design**. Disponível em: <<http://ibuku.com/>>. Acesso em: 20 jan 2015.

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Apostila ambiental: analista ambiental**. Editora Dias, 2001.

IZUKA, S.; ENDO, Y.; MITANI, J.; KANAMORI, Y.; FUKUI, Y. An interactive design system for pop-up cards with a physical simulation. **Visual Comput**, 27, 20 abr 2011, p.605-612. Disponível em: < <http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/paper/popup2011.pdf>> . Acesso em: 10 dez 2014.

JACKSON, P. **Folding techniques for designers: from sheet to form**. London, UK: Laurence King Publishing, 2011.

_____. **The Pop-up Book**. London, UK: Anness Publishing Ltd, 1993.

JOISEL, E. **Eric Joisel Homepage**. 2012. Disponível em: <<http://www.ericjoisel.com/>>. Acesso em: 22 dez 2014.

KIMPARA, P. T. C. **Orimachi: dobrando mobiliários urbanos**. 2008. 122p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Bauru, 2008.

KOBAYASHI, H.; KRESLING, B.; VINCENT, J. F. The Geometry of Unfolding Tree Leaves. In: **Proceedings of The Royal Society: B Biological Science**: v. 265, n. 1391, p. 147-154, 22 jan 1998. Disponível em: <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/265/1391/147.full.pdf+html>. Acesso em: 8 ago 2013.

KODA, Y. **Origami**. Traduzido por Akiko Kuniyama Watanabe e revisado por Rafael Almir Marcial Tramm. São Paulo: Aliança Cultural Brasil-Japão, 1986. (Caderno de Cultura Japonesa).

KODANSHA. **Encyclopedia of Japan**. Tokyo, Japan: Kodansha Ltd., 1983. V.6.; p. 16-17.

KRAVCHENKO, G. A.; FERREIRA, E. de M.; PASQUALETTO, A. Eficiência de diferentes adesivos para a confecção de painéis de bambu laminado colado. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM Santa Maria, Revista Eletrônica em Gestão, Educação e**

Tecnologia Ambiental: v. 19, n. 1, p. 212-219, jan-abr 2015. Disponível em: <http://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/14903>. Acesso em: 19 maio 2016.

KURIBAYASHI, K.; TSUCHIYA, K.; YOU, Z.; TOMUS, D.; UMEMOTO, M.; ITO, T.; SASAKI, M. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. **Material Science and Engineering: A**, v. 419, n. 1-2, p. 131-137, 15 mar 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305014930>>. Acesso em: 26 mar 2013.

LANG, R. J. (Org) **Origami⁴ – Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education**. Massachusetts: AK Peters Ltd, 2009.

LANG, R. **Robert J. Lang Origami**. 2004-2015. Disponível em: <<http://www.langorigami.com/>>. Acesso em: 01 fev 2015.

LI, X.; SHEN, C.; HUANG, S.; JU, T.; HU, S. Popup: Automatic Paper Architectures From 3D Models. **ACM Trans. Graph.**, 29, 4, Article 111, Jul 2010, 9 p. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1778765.1778848>>. Acesso em: 10 dez 2014.

LOBACH, B **Design industrial: Bases para a configuração dos produtos industriais**. São Paulo: Editora Blucher, 2001.

LOCAL ARCHITECTURE; BURI, H. U.; WEINAND, Y. **Chapelle Provisoire de Saint-Loup**. Lausanne, Suíça, 2008. Disponível em: http://www.localarchitecture.ch/?menu=projets&projet_id=3. Acesso em: 10 dez 2013.

MAHADEVAN, L.; RICA, S. Self-organized origami. **Science**: v. 307, n. 5716, p. 1740, 18 mar 2005. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/307/5716/1740.full>. Acesso em: 8 ago 2013.

MAKE ARCHITECTS. **Canary Wharf Kiosk**. 2015. Londres, Beijing, Hong Kong. Disponível em: <<http://www.makearchitects.com/projects/canary-wharf-kiosk/>>. Acesso em: 5 fev 2014.

MANUAL DE OSLO: **Proposta de Diretrizes para Coleta e Interpretação de Dados sobre Inovação Tecnológica**. 1997. Disponível em: <http://download.finep.gov.br/imprensa/manual_de_oslo.pdf>. Acesso em: 2 fev 2015.

MANZINI, E. **Design in changing world: in the age of networks and sustainability**. In: P&D - CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 11., 2014, Gramado. **Anais eletrônicos...** Gramado, RS, 2014. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ped2014/php/index.php>>. Acesso em: 15 out 2014.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Edição Especial ENTECA, p. 35-45, 2009. Disponível em: <http://eduem.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/viewFile/8714/5169>. Acesso em: 19 maio 2016.

MITANI, J.; SUZUKI, H. Computer aided design for Origamic Architecture models with polygonal representation. In: COMPUTER GRAPHICS INTERNATIONAL, 2004, p.93-99. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://mitani.cs.tsukuba.ac.jp/dl/mitani_2004_cgi_oapoly.pdf>. Acesso em 4 jun 2014.

MITCHELL, D. **Origami Heaven**. [s.d.] Disponível em: <<http://freespace.virgin.net/dave.mitchell/designstylesoverview.html>>. Acesso em: 22 dez 2014.

MIURA, K. The science of Miura-ori: a review. In: LANG, Robert J. **Origami⁴: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education**. Natick, EUA: A. K. Peters, 2009. Cap. 9, p. 87-99.

MOIZÉS, F. A. **Painéis de bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design de Bauru, São Paulo**. 2007. 113p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Bauru, 2007.

MUNARI, B. **Design e Comunicação Visual**. São Paulo: Martins Fontes, 1968.

_____. **Das coisas nascem coisas**. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

MURAKAMI, C. H. G. Bambu: matéria-prima do futuro. In **Boletim Florestal: Informativo do Norte Pioneiro**, ed. 6, ano 1, dez. 2007.

NAVES, R. **A forma difícil: ensaios sobre arte brasileira**. São Paulo: Ática, 1997.

NEOBAMBU. **Revestimentos ecológicos**. Disponível em: <<http://www.neobambu.eco.br/>>. Acesso em: 20 mai 2016.

NOLAN, J. C. **Creating origami**. USA: Alexander Blace, 1995.

NOGUEIRA, C. de L. **Painel de bambu laminado colado estrutural**. 2008. 92p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba - SP, 2008.

NORDIM, K.; WAHAB, R.; JAMALUDIN, M. A.; BAHARI, S. A.; ZAKARIA, M. N. Strength properties of glued laminated bamboo (*Gigantochloa scortechinnii*) strips or furniture. In: XXII IUFRO, **Proceedings of Scientific Session 90**, Brisbane, Australia, p. 83-85, 2005.

ORIGAMI RESOURCE CENTER. **List of origami**. 2014. Disponível em: <<http://www.origami-resource-center.com/origami-classification.html>>. Acesso em: 22 dez 2014.

PADOVAN, R. B. **O bambu na arquitetura: design de conexões estruturais**. 2010. 183p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Bauru, 2010.

PAPANEK, V. **Design for the real world. Human ecology and Social Change**. Chicago: Academy Chicago Publishers, 1992.

PAPANÉK, V. **Arquitetura e Design, Ecologia e Ética**. Portugal, Lisboa: Edições 70, 1995.

PARALELOS: arte brasileira da segunda metade do século XX em contexto: Colección Cisneros. Apresentação de Milú Villela. Textos de Ariel Jiménez e Mari Carmen Ramírez. São Paulo: MAM, 2002. 240p. 153il. textos Português/inglês. Exposição realizada na Museu de Arte Moderna de São Paulo, de 23 de março a 16 de junho de 2002.

PEREIRA, M. A. dos R. **Projeto Bambu**: manejo e produção do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) cultivado na Unesp/Campus de Bauru e determinação de suas características físicas e de resistência mecânica. Relatório Fapesp (2003/04323-7), 2006.

PEREIRA, M. A. dos R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru, SP: Canal6, 2008.

POPE, G.G. Bamboo and Human Evolution. **Natural History**. 1989.

RAMOS, B. P. F. **Metodologia de curvatura de bambu laminado colado (BLaC) para fabricação de mobiliário - diretrizes para o design**. 2014. 114p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Bauru, 2014.

REDE BRASILEIRA DO BAMBU. 2013. Disponível em: <<http://www.redebrasileiradobambu.com.br/>>. Acesso em: 4 jan 2015.

REMY, T; VEENHUIZEN, R. **Bamboo chair**. 2007. Disponível em: <<http://www.remyveenhuizen.nl/work/furniture/bamboo-chair>>. Acesso em: 20 jan 2015.

RICH, C. **The history of paper cutting**. 2000. Disponível em: <<http://www.fascinatingfolds.com/paperarts/papercuttinghistory.htm>>. Acesso em: 09 dez 2000.

RUYSSER, T. D. **Wearable metal origami?** The design and manufacture of metallised folding textiles. 2009. 225p. Thesis (Doctor of Philosophy) – Royal College of Art, London, UK, 2009.

SALEME, J. A. M. S.; COMOGLIO, S. Teaching architecture with bamboo. Bamboo for Sustainable Development. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop. San José, Costa Rica, 2-6 nov 1998. INBAR **Proceedings**, n 7. Ed. Arun Kumar, I.V. Ramanuja Rao and Cherla Sastry. Netherlands: VSP, 2002. p. 739-748.

SHINZATO, E. T. **Origami arquitetônico**: uma mídia alternativa. 1998. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Desenho Industrial) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Bauru, 1998.

SHUMAKOV, K; SHUMAKOV, Y. **Origami - Way of development of psychomotor, intellectual and creative abilities**. 1999-2001. Disponível em: <http://library.thinkquest.org/27152/towns/oriville/oriver/library/read_02.htm?tqskip=1>. Acesso em: 11 jul 2013.

SILIAKUS, I. **Paper architect/artist**. 2013. Disponível em: < <http://ingrid-siliakus.exto.org/>>. Acesso em: 11 jul 2013.

SORGUÇ, A. G.; HAGIWARA, I.; SELÇUK, S. A. Origamics in architecture: a medium of inquiry for design in architecture. **Journal of the Faculty of Architecture: METU JFA - Middle East Technical University, Ankara, Turkey**, v. 26, n. 2, p. 235-247. doi: 104305, 2009. Disponível em: <http://ifa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2009/cilt26/sayi_2/235-247.pdf>. Acesso em: 10 ago 2013.

STEWART, I. Some assembly needed. **Nature: News and Views**, v. 448, p.419, 26 jul 2007.

TAKE CREATE HAGI CORPORATION. 2010. Disponível em: <<http://www.hagi-take.co.jp/pro/english/>>. Acesso em: 21 jan 2015.

TACHI, T. Geometric considerations for the design of rigid origami structures. In: **Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium**, 8 a 12 nov 2010, Shanghai, China. Disponível em: http://www.tsg.ne.jp/TT/cg/DesignOfRigidOrigamiStructures_tachi_IASS2010.pdf. Acesso em: 30 jan 2013.

TAHARA, A. **Abrigo-Origami-Contêiner**. Prêmio Opera Prima 2005, IAB, 2005. Disponível em: <http://www.projetandocompvc.com.br/OPERA_PRIMA/2005/premio327.asp>. Acesso em: 23 mar 2013.

TAMA SOFTWARE. **Pop-up Card Designer**. Versão 2.1.1, 2007. Disponível em: http://www.tamasoft.co.jp/craft/popupcard_en/. Acesso em: 15 ago 2013.

_____. **Pop-up Card Designer PRO**. Versão 3.2.2, 2008. Disponível em: <http://www.tamasoft.co.jp/craft/popupcard-pro_en/>. Acesso em: 01 fev 2015.

TANG & YANG ARCHITECTS. **Folded Bamboo House**. 2009. Disponível em: <http://ming3d.com/tyarchitect/new/>. Acesso em: 10 dez 2013.

TOR, S. B.; MAK, K. W.; LEE, Y. T. A study on the boundary conditions of 90° paper pop-up structures. **Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST)**, 2004. Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/3921>>. Acesso em: 24 maio 2014.

THÜN, G.; VELIKOV, K.; RIPLEY, C.; SAUVÉ, L.; MCGEE, W. Soundsphers: resonant chambers. **Leonardo**, v. 54, n. 4, p. 348-357, ago 2012. Disponível em: http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/LEON_a_00409?journalCode=leon. Acesso em: 10 dez 2013.

UENO, T. R. **Do origami tradicional ao origami arquitetônico: uma trajetória histórica e técnica do artesanato oriental em papel e suas aplicações no design contemporâneo**. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Bauru, 2003.

_____. Diretrizes construtivas para origami arquitetônico de 90 graus. In: GRAPHICA 2011 - XX Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico e IX International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design, 2011, Rio de Janeiro, Expressão Gráfica: Conexões entre Ciência, Arte e Tecnologia. **Anais...**Rio de Janeiro: UFRJ, Escola de Belas Artes, 2011. v.1. p.1 - 12

VAN EMBRICQS, R. **Robert Van Embricqs: combining functionality with art.** 2015. Disponível em: <<http://www.robertvanembricqs.com/>>. Acesso em: 31 jan 2015.

YIGIT, N. **Industrial Product Design by Using Two-Dimensional Material in the Context of Origamic Structure and Integrity.** 118p. Dissertação (Master of Industrial Design) - Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey, 2004. Disponível em: <<http://library.iyte.edu.tr/tezler/master/endustriurunleritasarimi/T000457.pdf>>. Acesso em: 20 abr 2013.

YONGYU, T. The current status and development trend of bamboo processing in China. In: **Proceedings** n. 6. Sustainable Development of the Bamboo and Rattan Sector in Tropical China. China Forestry Publishing House, 2001, p. 99-109.

YOU, Z.; KURIBAYASHI, K. Expandable tubes with negative poisson's ratio and their application in medicine. In: LANG, R. J. **Origami⁴: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education.** Natick, EUA: A. K. Peters, 2009. Cap. 8, p. 117-127.

WATANABE, N; KAWAGUCHI, K. The method for judging rigid foldability. In: LANG, Robert J. **Origami⁴: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education.** Natick, EUA: A. K. Peters, 2009. Cap. 15, p. 165-174.

WONG, W. **Princípios de forma e desenho.** São Paulo: Martins Fontes, 2001.

WOOLDRIDGE, M. Booming bamboo: the next super-material? **BBC News Magazine**, 3 abr 2012. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/news/magazine-17568088>. Acesso em: 15 nov 2013.