



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

FACULDADE DE ARQUITETURA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Bárbara Ruschel Lorenzoni

CURVAMENTO DE MATERIAIS PLANOS RÍGIDOS POR PADRÕES DE CORTE PRODUZIDOS VIA
FABRICAÇÃO DIGITAL: ESTUDO DA APLICAÇÃO EM MDF DE DIFERENTES ESPESSURAS

Dissertação de mestrado

Porto Alegre

2021

BÁRBARA RUSCHEL LORENZONI

Curvamento de materiais planos rígidos por padrões de corte produzidos via fabricação digital: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva

Porto Alegre

2021

CIP – Catalogação na Publicação

Ruschel Lorenzoni, Bárbara

Curvamento de materiais planos rígidos por padrões de corte produzidos via fabricação digital: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras / Bárbara Ruschel Lorenzoni. -- 2021.

177 f.

Orientador: Fábio Pinto da Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. kerfing. 2. kerf-bending. 3. curvamento de painéis de madeira. 4. fabricação digital. 5. digitalização 3D. I. Pinto da Silva, Fábio, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LORENZONI, B. R. **Curvamento de materiais planos rígidos por padrões de corte produzidos via fabricação digital**: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras. 2021. 177 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Bárbara Ruschel Lorenzoni

**CURVAMENTO DE MATERIAIS PLANOS RÍGIDOS POR PADRÕES DE CORTE PRODUZIDOS VIA
FABRICAÇÃO DIGITAL: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, dezoito de junho de dois mil e vinte e um.

Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva**

Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN – UFRGS)

Prof. Dr. Yuri Walter

Laboratório de Engenharia do Produto (LEP - DETEC/CEUNES/UFES) – Examinador Externo

Prof. Dr. Felix Bressan

Instituto de Artes (IA – UFRGS) – Examinador Externo

Prof. Dr. Fabiano Vargas Scherer

Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN – UFRGS) – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Este trabalho marca o encerramento de uma importante etapa da minha trajetória profissional e uma conquista muito almejada. Cabe dizer que o presente estudo é apenas um dos aprendizados adquiridos ao longo do mestrado, cujos ensinamentos extrapolam a temática deste documento.

Além do conhecimento mais profundo dos aspectos do design, que sempre me acompanharam em especial nos projetos de arquitetura, a imersão no meio acadêmico e científico ampliou minha compreensão e crítica do funcionamento de todas as questões que nos circundam. Por isso, só tenho a agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente neste período e para a elaboração deste trabalho.

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio, incentivo e carinho constantes e incondicionais.

Um agradecimento especial ao meu orientador, professor Fábio Pinto da Silva, coordenador do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, que a cada dia amplia sua lista de conquistas e funções devido a um imenso esforço e dedicação. Obrigada pela orientação criteriosa e constante e por todo o suporte ao longo destes anos.

A toda a equipe do LDSM, pelo auxílio durante o processo e pelos aprendizados compartilhados. A oportunidade de fazer parte desse grupo fez do mestrado uma experiência muito mais rica e leve.

Ao colega e amigo Eduardo, cuja disposição em ajudar em um momento crítico foi essencial para que o estudo pudesse ter continuidade.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS pelo conhecimento transmitido nas disciplinas e, aos colegas, pela boa convivência.

Aos membros da banca examinadora, por suas valiosas contribuições.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES -Ministério da Educação do Brasil) pela concessão de bolsa de estudos.

Aos meus amigos, que me acompanham e apoiam em todas as jornadas.

RESUMO

LORENZONI, B. R. **Curvamento de materiais planos rígidos por padrões de corte produzidos via fabricação digital: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras.** 2021. 177 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Em projetos de arquitetura e design baseados em fabricação digital a execução de formas curvas é limitada pelos materiais aplicáveis a esses processos, comumente planos e rígidos. Nesse contexto, este trabalho investiga a técnica de *kerfing*, que consiste no curvamento de materiais rígidos por cortes padronizados, e os efeitos da mudança de espessura do material na curva resultante, visando aumentar a confiança na prototipagem da técnica em escala reduzida. Propõe-se um método de corte e avaliação da curvatura, baseado em: simulação da geometria-alvo e planificação por software paramétrico, fabricação de protótipos, curvamento em arco, digitalização 3D e análise geométrica digital. Foram feitos experimentos com variação dos parâmetros geométricos dos cortes em MDF de 3 mm para seleção daqueles ideais para ampliação da escala em MDF de 6, 9 e 18 mm. A variação de parâmetros geométricos indicou que a flexibilidade é reduzida com a subdivisão dos cortes e ampliada com a sobreposição desses. Peças muito rígidas formaram arcos deformados, elípticos; peças mais flexíveis porém rígidas para a obtenção precisa da geometria-alvo projetaram-se para fora dessa; peças suficientemente flexíveis coincidiram com a geometria-alvo, contendo pontos de maior deformação. O *kerfing* causou deformações superficiais na geometria (alteração dos vazios de corte e projeção das laterais dos segmentos em torção para fora da geometria), acentuadas em peças mais rígidas. Constatou-se que o aumento da espessura acarreta em maior rigidez das peças pela maior dificuldade de torção e flexão de seus segmentos, entretanto essa rigidez é amenizada pela diferença nas propriedades intrínsecas do MDF (como Módulo de Young e de cisalhamento), que tornam a peça mais flexível. Concluiu-se que o modelo em escala reduzida pode servir de referência para um projeto com *kerfing*, porém podem ser necessários ajustes nos parâmetros geométricos para adequar os resultados à diferença de material.

Palavras-chave: *Kerfing*. *Kerf-bending*. Corte a laser. Usinagem CNC. Curvamento de painéis de madeira.

ABSTRACT

LORENZONI, B. R. **Curvamento de materiais planos rígidos por padrões de corte produzidos via fabricação digital: estudo da aplicação em MDF de diferentes espessuras.** 2021. 177 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

In architecture and design projects based on digital fabrication, the production of curved geometries is limited by the commonly flat and rigid materials applicable to it. In this context, this work investigates the *kerfing* technique, which consists in bending rigid materials by the application of cut patterns, and the effects of material thickness change on the resulting curve, aiming to increase confidence in the prototyping of the technique on a small scale. A method of cutting and evaluating curvature was proposed, based on: target geometry simulation and parametric software planification, prototype fabrication, bending, 3D scanning and digital geometric analysis. Experiments were carried out with variation of the geometric parameters of the 3 mm MDF cuts to select those ideal for expanding the scale to 6, 9 and 18 mm MDF. The variation of geometric parameters indicated that the flexibility is reduced with the subdivision of the cuts and increased with the overlapping of these. Very rigid samples formed deformed, elliptical arcs; more flexible yet rigid samples for the precise obtainment of the target geometry protruded out of it; sufficiently flexible parts coincided with the target geometry and contained points of greater deformation. *Kerfing* caused superficial deformations in the geometry (alteration of the cut voids and projection of the sides of the segments in torsion out of the geometry), accentuated in more rigid samples. It was found that the increase in thickness leads to greater stiffness of the set due to the greater difficulty of torsion and bending of its segments, however this stiffness is mitigated by the difference in the intrinsic properties of MDF (such as Young and Shear Modulus), which make the piece more flexible. It was concluded that the reduced scale model can serve as a reference for a project with *kerfing*, however adjustments in the geometric parameters may be necessary to adapt the results to the material difference.

Palavras-chave: *Kerfing. Kerf-bending. Laser cutting. CNC machining. Wood panel curving.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de relação entre estrutura, processamento, propriedades e produto.	20
Figura 2 - Esquema de relação entre produto, processamento, propriedades e estrutura no caso das técnicas baseadas em alterações geométricas.	21
Figura 3 - Esquema dos tipos de superfície baseados nas suas curvaturas principais.	22
Figura 4 - Imagens de experimento utilizando técnica de corte padronizados para curvar madeira.	23
Figura 5 - Esquema dos produtos de madeira maciça (anisotrópicos) e produtos à base de madeira (isotrópicos).....	29
Figura 6 - Esforços mecânicos.....	33
Figura 7 - Alguns dos principais padrões de corte mencionados na revisão de literatura.	33
Figura 8 - Esquemas de materiais em arco com diferentes tipos de kerfing.	34
Figura 9 - Kerfing tradicional e kerfing por fabricação digital.	35
Figura 10 - Exemplos de aplicações da técnica de kerfing	37
Figura 11 - Esquema dos esforços mecânicos e ângulos de rotação do painel em kerfing.	38
Figura 12 - Parâmetros do padrão de corte em kerfing.	40
Figura 13 - Processo de distribuição dos cortes nas linhas de geração da superfície.	41
Figura 14 - Efeitos das diferenças de forças aplicadas nas amostras em kerfing.	42
Figura 15 - Tipos de kerfing por face de aplicação.....	44
Figura 16 - Alguns padrões de kerfing.....	45
Figura 17 - Ilustração de LEMs simples e em matriz e de algumas possibilidades dele.....	51
Figura 18 - Exemplo de aplicação de matriz de LEMs.....	51
Figura 19 - Alguns tipos de LEMs existentes.....	55
Figura 20 - Esquema dos esforços sofridos por cada tipo de LEM.	56
Figura 21 - Exemplos de matrizes de LEMs.....	57
Figura 22 - Exemplos de estruturas de kirigami.	61
Figura 23 - Tipos de kirigami.	63
Figura 24 - Exemplos de kirigami aplicados à elasticidade.	63
Figura 25 - Esquema de identificação das partes do material em kirigami de cortes fractais	64
Figura 26 - Esquema do material com kirigami de cortes fractais em extensão	64
Figura 27 - Esquema de kirigami de cortes fractais em formato quadrado e triangular	65
Figura 28 - Esquema de esforços do material com kirigami em tração	66
Figura 29 - Exemplo de aplicação da técnica de cortes tipo ligações auxéticas.	68
Figura 30 - Padrões de cortes de comportamento auxético.....	69

Figura 31 - Geometrias com comportamento auxético.....	69
Figura 32 - Esquemas de material com cada uma das técnicas e os esforços mecânicos sob deformação.	72
Figura 33 - Exemplos de técnicas de Kirigami, Kerfing, Ligações auxéticas e lamina emergent mechanisms.....	73
Figura 34 - Fluxograma da metodologia proposta para o trabalho.	78
Figura 35 - Modelo genérico da peça em MDF a ser cortada, sendo E a espessura do material.....	80
Figura 36 - Legenda para código das amostras.	82
Figura 37 - Fluxograma do algoritmo de geração da geometria e planificação da amostra.....	84
Figura 38 - Imagens da tela do software Rhino/Grasshopper com o modelo resultante de cada etapa.	84
Figura 39 - Ampliação do algoritmo de geração da estrutura com kerfing.....	85
Figura 40 - Esquema dos dispositivos de fixação das amostras e seus componentes.	87
Figura 41 - Equipamento de digitalização 3D utilizado.....	88
Figura 42 - Imagens do processo feito no Geomagic Qualify.....	90
Figura 43 - Legenda de desvios.....	92
Figura 44 - Padrão de apresentação das figuras resultantes das análises.	92
Figura 45 - Corte das amostras em equipamento laser.....	93
Figura 46 - Dispositivo projetado para suporte e inflexão das amostras em arco 180°.	94
Figura 47 - Análise visual das amostras curvadas em arco.....	94
Figura 48 - Processo de digitalização de uma amostra.....	95
Figura 49 - Esquema da proporção de espessura, comprimento e raio de arco entre amostras de MDF.	98
Figura 50 - Corte das amostras de 6 mm na fresadora CNC.	99
Figura 51 - Dispositivos de suporte desenvolvidos para fixação e curvamento das amostras.....	100
Figura 52 - Foto de uma amostra de cada espessura do teste F posicionada no seu respectivo suporte.	101
Figura 53 - Fotos da digitalização 3D das peças do teste F.	101
Figura 54 - Exemplo de amostras com variação do índice 1.	103
Figura 55 - Exemplo de amostras com variação do Índice 2.	103
Figura 56 - Simulação do movimento de curvamento das amostras.	105
Figura 57 - Fotografia ilustrativa dos movimentos parasíticos existentes em amostras com Índice 1=2.	108
Figura 58 - Fotos do momento de rompimento de algumas amostras.....	109
Figura 59 - Fotos de amostras que conformaram diferentes geometrias de arcos.	109

Figura 60 - Tendências observadas pelas análises dos testes A.....	110
Figura 61 - Tendências observadas pelas análises dos testes B.....	114
Figura 62 - Exemplo de amostras com variação no Índice 3.	115
Figura 63 - Tendências observadas pelos resultados dos testes C.	120
Figura 64 - Exemplo de amostras com variação do índice 4.	121
Figura 65 - Tendências observadas pelas análises dos testes D.....	127
Figura 66 - Foto do conjunto das amostras do teste F.	131
Figura 67 - Registro fotográfico da amostra de 3mm Índice 2 = 4.....	131
Figura 68 - Registro fotográfico da amostra de 6mm Índice 2 = 4.....	132
Figura 69 - Registro fotográfico da amostra de 9mm Índice 2 = 4.....	132
Figura 70 - Registro fotográfico da amostra de 18mm Índice 2 = 4.	132
Figura 71 - Registro fotográfico da amostra de 3mm Índice 2 = 14.	133
Figura 72 - Registro fotográfico da amostra de 6mm Índice 2 = 14.	133
Figura 73 - Registro fotográfico da amostra de 9mm Índice 2 = 14.	134
Figura 74 - Registro fotográfico da amostra de 18mm Índice 2 = 14.	134
Figura 75 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.....	135
Figura 76 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.....	135
Figura 77 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.....	136
Figura 78 - Tendências observadas pelas análises dos testes F.	141
Figura 79 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes quantidades de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão.	143
Figura 80 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes valores de sobreposição de cortes.	144
Figura 81 - Exemplos do resultado de curvamento para amostras com diferentes larguras.	145
Figura 82 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes raios de arco.	146
Figura 83 - Evolução da precisão da geometria junto ao aumento do raio.	146
Figura 84 - Diferenças de resultados entre corte a laser e fresamento CNC.	147
Figura 85 - Exemplo de resultados de curvamento para amostras com diferentes espessuras.	147
Figura 86 - Resultados de precisão geométrica para amostras com diferentes espessuras e sobreposição de cortes.	148
Figura 87 - Resultado ampliado para a para avaliação da tensão nas áreas laterais dos segmentos da amostra de espessura 9 mm e sobreposição de cortes 14.	152
Figura 88 - Fotos de amostras com segmentos aparentemente planos.	152
Figura 89 - Foto de amostras de diferentes etapas de testes que romperam por cisalhamento.	153
Figura 90 - Diferença entre a geometria dos vazios gerados pelos cortes quando a peça é curvada. .	153

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados teste A: fotos do curvamento e distância mínima obtida pela aproximação das extremidades das amostras.	106
Quadro 2 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste B.	112
Quadro 3 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste C.	118
Quadro 4 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste D.	124
Quadro 5 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste E.	129
Quadro 6 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste F.	138
Quadro 7 - Resultados das análises geométricos para avaliação dos efeitos da mudança de sobreposição dos cortes.	144
Quadro 8 - Geometrias obtidas a partir de amostras com diferentes graus de flexibilidade/ tensão..	150
Quadro 9 - Resultados das análises geométricas para avaliação da tensão nas áreas laterais dos segmentos.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerâncias dimensionais dos painéis Duratex.	80
Tabela 2 - Propriedades dos painéis Duratex.	81
Tabela 3 - Nomenclatura de índices para cada parâmetro das amostras.	82
Tabela 4 - Resumo dos testes envolvidos em cada etapa.	82
Tabela 5 - Características técnicas da fresadora CNC utilizada: Jaraguá modelo Solid 2818.	99
Tabela 6 - Tolerâncias de desvios utilizados nas análises digitais para cada uma das amostras.	102
Tabela 7 - Dados geométricos das amostras do teste A.	104
Tabela 8 - Resultados teste A: distância mínima obtida entre as extremidades das amostras quando da aproximação (em milímetros).	105
Tabela 9 - Dados geométricos das amostras dos testes B.	111
Tabela 10 - Resultados das análises de desvios para as amostras dos testes B, em milímetros.	112
Tabela 11 - Dados geométricos das amostras dos testes C.	116
Tabela 12 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste C, em milímetros.	117
Tabela 13 - Dados geométricos das amostras do teste D.	122
Tabela 14 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste D, em milímetros.	123
Tabela 15 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste E, em milímetros.	128
Tabela 16 - Dados geométricos das amostras do teste F.	130
Tabela 17 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste F, em milímetros.	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados teste A: Influência do Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) no curvamento manual das amostras.	107
Gráfico 2 - Resultados teste A: Influência do Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra) no curvamento manual das amostras.	107
Gráfico 3 - Resultado testes B: Desvio RMS para as amostras com relação ao Índice 2.	113
Gráfico 4 - Resultados testes C: Relação entre o RMS e o Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra) no curvamento das amostras.	119
Gráfico 5 - Resultados testes D: Relação entre o RMS Absoluto e o Índice 2 (sobreposição dos cortes) no curvamento das amostras.....	125
Gráfico 6 - Resultados testes D: Relação entre o RMS Relativo e o Índice 2 (sobreposição dos cortes) no curvamento das amostras.....	125
Gráfico 7 - Resultados testes F: Relação entre o RMS Absoluto e o Índice 5 (espessura da amostra) no curvamento das amostras, para Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 4 e 14.	139
Gráfico 8 - Resultados testes F: Relação entre o RMS Relativo e o Índice 5 (espessura da amostra) no curvamento das amostras, para Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 4 e 14.	139

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	21
1.3	OBJETIVOS	26
1.4	JUSTIFICATIVA	26
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2	REVISÃO DE LITERATURA	28
2.1	MDF	28
2.2	TÉCNICAS DE CURVAMENTO DE MATERIAIS PLANOS POR CORTES PADRONIZADOS	31
2.2.1	<i>Kerfing</i>	34
2.2.2	<i>Lamina Emergent Mechanisms</i>	50
2.2.3	<i>Kirigami</i>	60
2.2.4	Ligações auxéticas	68
2.2.5	Síntese da revisão	71
3	MATERIAIS E MÉTODOS	78
3.1	ENSAIO PADRÃO	83
3.1.1	Simulação da geometria-alvo e planificação	83
3.1.2	Fabricação de protótipos	86
3.1.3	Curvamento em arco	86
3.1.4	Digitalização 3D	87
3.1.5	Análise digital comparativa entre geometria-alvo e geometria digitalizada	89
3.2	ETAPA 1 DE ENSAIOS: SELEÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PADRÃO DE CORTE	93
3.3	ETAPA 2 DE ENSAIOS: COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS DE CORTE	96
3.4	ETAPA 3 DE ENSAIOS: DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA CURVATURA DO MDF	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1	ETAPA 1 DE ENSAIOS: SELEÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PADRÃO DE CORTE	103

4.1.1	TESTE A.....	103
4.1.2	TESTE B.....	111
4.1.3	TESTE C.....	115
4.1.4	TESTE D	121
4.2	ETAPA 2 DE ENSAIOS: COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE CORTE	128
4.2.1	TESTE E.....	128
4.3	ETAPA 3 DE ENSAIOS: DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA CURVATURA DO MDF.....	130
4.3.1	TESTE F.....	130
4.4	DISCUSSÃO	142
5	CONCLUSÃO.....	154
	REFERÊNCIAS.....	159
	APÊNDICES	169

1 INTRODUÇÃO

A partir da popularização dos novos sistemas de fabricação digital tem-se estudado técnicas para obter formatos curvos e complexos a partir da inserção de cortes padronizados em materiais planos, as quais buscam ampliar as possibilidades formais desses últimos. Pelo uso dessas técnicas são eliminadas a necessidade de subdivisão da geometria em faces menores e planas para fabricação individual e a utilização de elementos de junção ou articulações entre partes do material. Dessa forma, é possível otimizar o processo de projeto, uma vez que há uma maior proximidade, ou menor quantidade de etapas, entre a concepção e a materialização das ideias. Além disso, disfruta-se das vantagens (intrínsecas à fabricação digital) de integração do projeto e fabricação em um sistema computadorizado. Esse é o tema da presente dissertação, sendo apresentado neste capítulo introdutório contextualização/problematização, objetivos e justificativa.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A evolução das ferramentas digitais voltadas ao design e à arquitetura resultou em grande liberdade projetual, encorajando os projetistas a idealizar formas cada vez mais complexas, possibilitando formatos curvos como alternativa aos planos. Porém, esse fenômeno não foi acompanhado pelo desenvolvimento de plataformas que aliem essa liberdade aos aspectos construtivos, sendo esses dois aspectos comumente separados (LAWSON, 2002; SASS e OXMAN, 2006; MENGES, 2018; ZARRINMEHR et al., 2017a). Bernal, Haymaker e Eastman (2015) apontam o avanço dos softwares que automatizam ou até aumentam as ações de designers no momento da criação, englobando a geração, avaliação e seleção de alternativas. Segundo os autores, o desafio reside no auxílio aos profissionais, não só na reprodução de seus mecanismos mentais, mas também no processo de integração dos sistemas. Um exemplo desse avanço são as ferramentas paramétricas que, segundo Oxman (2017), têm aspecto generativo e possibilitam a criação de diversas versões topológicas através da manipulação das relações associativas da forma.

Em projetos de arquitetura e design tem-se que, muitas vezes, a questão da materialidade é abordada apenas no final do processo, resultando com frequência em projetos inexequíveis (FLEISCHMANN et al., 2012; MENGES, 2018; OXMAN, 2012; SASS e OXMAN, 2006; VAZQUEZ e JABI, 2015; WALTER, 2006). Faz-se necessário, então, o retorno às etapas iniciais, visto a inviabilidade da execução segundo a concepção inicial, gerando retrabalho e conseqüente desperdício de recursos (WALTER, 2006) ou um trabalho extensivo para traduzir os projetos para ferramentas de produção CAD-CAM (SASS e OXMAN, 2006). Para evitar as incompatibilidades mencionadas anteriormente, há necessidade de se considerar informações relativas à fabricação em estágios iniciais do projeto, mudando seus fluxos (LOUTH et al., 2018).

Tem-se que, no espectro físico, diferentemente do digital, as limitações dos materiais e as forças externas são inseparáveis das formas que se apresentam, exercendo o comportamento dos materiais

importante influência na definição das geometrias (FLEISCHMANN et al., 2012; ZARRINMEHR et al., 2017a). Os materiais industriais apresentam diversas limitações de tamanho, formato e rigidez devido aos requisitos dos processos de fabricação em massa (ZARRINMEHR et al., 2017a). Assim, materiais como aço, concreto, madeira e vidro têm alta disponibilidade e podem ser suficientemente resistentes para aplicações estruturais, mas dificultam, por exemplo, a configuração curva (CHEN et al., 2018).

Em consideração às limitações relatadas, Gursoy e Ozkar (2015) apontam o crescente interesse no estudo dos materiais e dos processos de produção, que atribuem ao avanço das tecnologias de fabricação digital e ciências dos materiais. A partir do estudo dos materiais, suas propriedades e comportamento podem se tornar premissas de projeto, sendo um princípio de geração, estruturação e organização do processo (FLEISCHMANN et al., 2012). Segundo Bianconi e Fillipucci (2019), os softwares paramétricos e generativos têm um papel importante nessa mudança de paradigma, visto que podem conter as características do material e, assim, otimizar seu uso. Além disso, alguns aspectos de fabricação e montagem podem impor relações geométricas de projeto e serem convertidos em algoritmos (KONAKOVIĆ et al., 2016). Kolarevic (2003) aponta que, assim como as inovações em materiais e tecnologias construtivas viraram protagonistas no século 20 e 21, os processos de projetos e produção coordenados digitalmente tornar-se-ão lugar comum.

Tem-se que CAD (*Computer Aided Design*) representa um sistema de projeto digitalizado e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) indica um processo de fabricação auxiliado por computador, enquanto o sistema CAD-CAM engloba as duas etapas em um processo computadorizado. Os sistemas de fabricação CAD-CAM facilitam a integração entre o projeto e a execução, pois sua compreensão é acessível aos responsáveis pelos projetos e pelo fato de as informações de ambas etapas estarem inseridas no mesmo sistema digital (KOLAREVIC, 2003; SASS E OXMAN, 2006). Através do sistema CAD pode-se gerar uma grande variedade de geometrias que serão processadas por CAM (LOUTH et al., 2018). Além disso, os processos de fabricação digital permitem a criação de novos sistemas de soluções para formas complexas, sendo possível testar aspectos construtivos de modo concreto (SASS e OXMAN, 2006). Assim, os projetistas têm novas oportunidades no que tange à experimentação, havendo uma possibilidade de simultaneidade entre experimentos digitais e físicos, o que pode, inclusive, fazer com que sirvam de ferramentas criativas (GURSOY e OZKAR, 2015).

A experimentação física aumenta a interação do projetista com sua obra, seja por protótipos fabricados manual ou digitalmente, e tem papel importante em diversas etapas. Na criação, ela auxilia a exploração de soluções (CROSS, 2004) e a construção do universo do design, que consiste em um processo tanto apreciativo quanto ativo, denominado por Schon (1992) *seeing-moving-seeing*. A prototipagem vincula as restrições materiais com a forma final do projeto, englobando aspectos como os limitantes geométricos do material, restrições de fabricação, tempo e custo (BERNAL, HAYMAKER e EASTMAN, 2015). Quando da construção de formas complexas é essencial o desenvolvimento de protótipos, que viabilizam a observação de aspectos dos materiais que são invisíveis às representações digitais, de modo que o comportamento desses informa e guia as estratégias de projeto e fabricação (GREENBERG e KÖRNER, 2014; GURSOY e OZKAR, 2015).

Visando a aproximar a ideação e materialização, alguns autores propõem técnicas e ferramentas de seleção de materiais para o design, como Ashby e Johnson (2011), assim como de auxílio na consideração desses em estágios iniciais e intermediários de projeto, como o faz Walter (2006). Seguindo essa lógica, porém com propostas mais radicais, há modelos que intervêm na ordem tectônica de projeto, que passa de forma-estrutura-material a material-estrutura-forma (OXMAN, 2017).

Nesses casos, implementam-se estratégias inversas às tradicionais, considerando o comportamento do material e método de fabricação como componentes ativos do processo. Um exemplo são os experimentos apresentados por Menges (2011), nos quais a madeira compensada e a fabricação robótica são pré-requisitos de projeto, sendo analisadas possibilidades de transformação de um pelo outro e inserindo-se os resultados no sistema computacional, que gera análises do comportamento do conjunto e extrai os dados para sua fabricação. Já Oxman (2012) introduz a possibilidade de programação do material pelo controle da distribuição espacial de seus componentes por fabricação digital, visando cumprir certas funções desejadas, além da geração do material em detrimento de sua seleção.

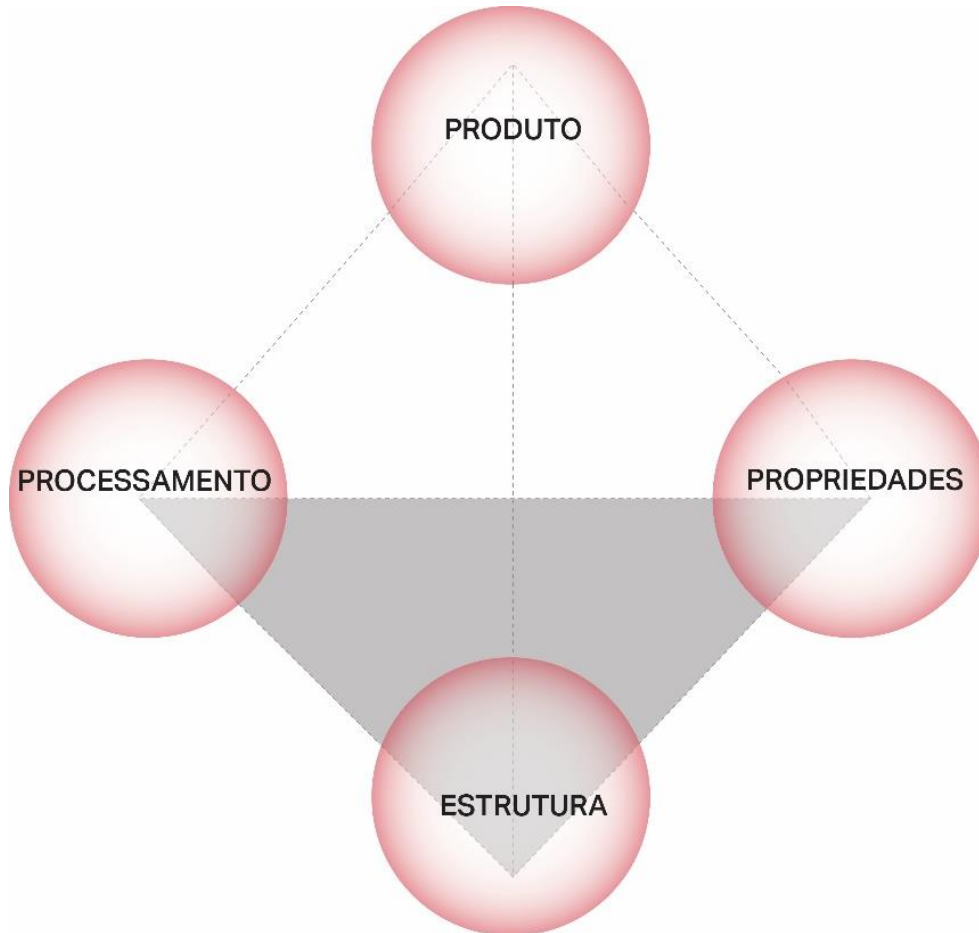
As abordagens mencionadas propõem uma alteração nos fluxos do projeto, principalmente pela consideração do material em estágios iniciais do processo, pela integração digital do projeto e fabricação e inclusão de protótipos durante todo o processo. Sendo o material e o processamento por CAD-CAM aspectos definidores nos processos que se estabelecem, estudos que englobem essas tecnologias e materiais compatíveis a elas permitem ampliar as possibilidades e definir os limites desse sistema, de modo que se possa manipulá-lo e ter controle sobre os resultados.

Tem-se que estrutura, propriedades e processamento dos materiais influenciam um ao outro, refletindo nas possibilidades de aplicação do material, relação que pode ser observada na Figura 1. A estrutura é a disposição tridimensional dos átomos que compõem o material, enquanto suas propriedades representam suas qualidades e se dão tanto pela estrutura quanto por sua composição química, permitindo distingui-lo dos outros materiais. Dentre as propriedades dos materiais tem-se as mecânicas (rigidez e tensão de escoamento – em tração, compressão e cisalhamento-, tensão de ruptura etc.) e as tecnológicas (como trabalhabilidade, soldabilidade, possibilidade de reciclagem, entre outras), que influenciam aspectos de manufatura. O processamento do material se refere às etapas que visam obter determinada forma e possibilitam a modificação da estrutura do material e, portanto, de suas propriedades (WALTER, 2006).

Ao constatar que o processamento do material pode alterar suas propriedades e o dilema dos requisitos heterogêneos de projeto frente à homogeneidade dos materiais de produção em massa, que fazem com que esses atendam alguns aspectos, mas sejam insuficientes em outros, tem-se estudado métodos de modificação desses materiais por alteração da sua macroestrutura, adequando-os ao comportamento desejado. Essas explorações têm o potencial de ressignificar esses materiais, conferindo propriedades aparentes distintas das convencionas e manipulando o seu comportamento, inserindo um aspecto que se aproximaria a uma anisotropia programada ou artificial (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019; GREENBERG e KÖRNER,

2014; OXMAN, 2012). Segundo os autores (2019, 2014, 2012), essas técnicas se inspiram na qualidade encontrada na natureza, que introduz diferenças estruturais ou mecânicas em dada direção do material de acordo com a necessidade, otimizando-o.

Figura 1 - Esquema de relação entre estrutura, processamento, propriedades e produto.



Esferas representando a interrelação, ou dependência, entre produto, processamento, estrutura e propriedades. Fonte: adaptado de TOMASI e BOTTA (1991, APUD Walter, 2006).

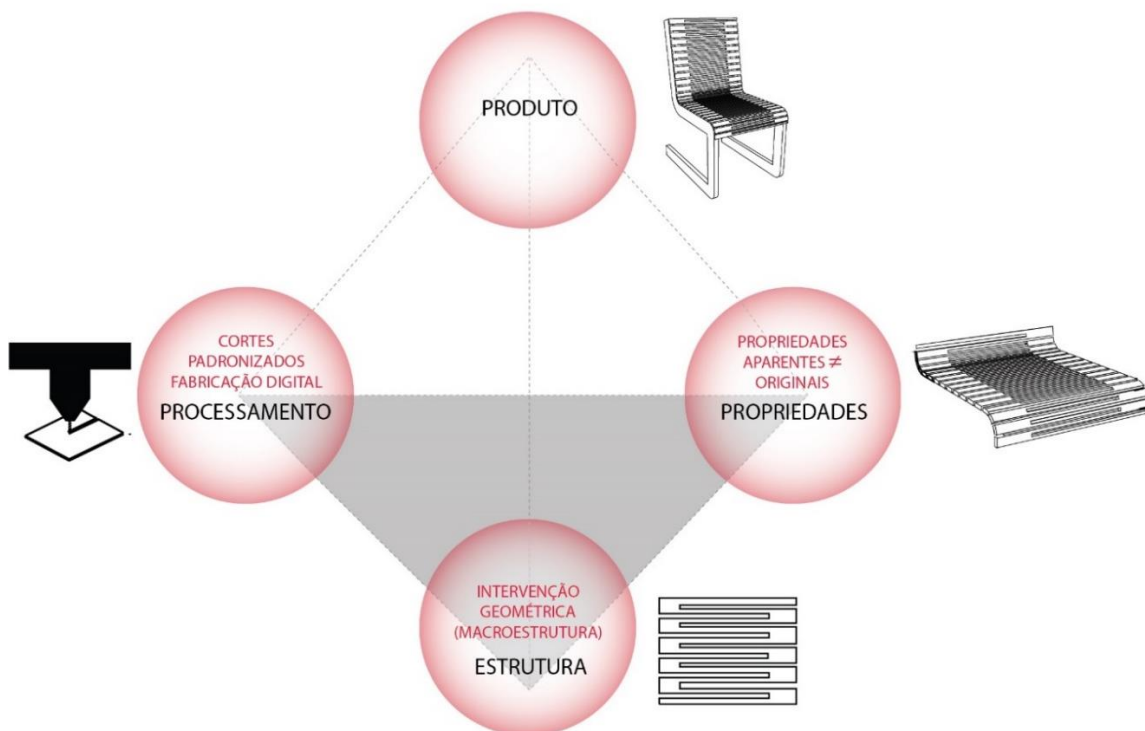
Pela exploração dos métodos de fabricação CAD-CAM, pode-se descobrir novos materiais ou até mesmo possibilidades inovadoras para materiais já estabelecidos (CAPONE e LANZARA, 2019). Quando se fala em alteração de propriedades de determinado material uma das abordagens mais diretas é pela manipulação de sua geometria, o que dá origem aos metamateriais, fabricados a partir de conceitos geométricos (CHO et al., 2014). Os mesmos autores (2014) acrescentam que as intervenções geométricas têm o potencial de resultar nas mais diversas respostas mecânicas dos materiais. Esses métodos unem material, forma e performance e afloram novas propriedades nos materiais, visto que a variação de formas geométricas provém em parte das propriedades do material e de sua organização no espaço, afetando todo o processo de projeto (GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Dentre as intervenções baseadas em parâmetros geométricos tem-se as que operam por corte ou subtração de material e que visam o curvamento de materiais planos de produção em massa, ou a possibilidade de transformação desses em geometrias tridimensionais complexas. Esses estudos têm demonstrado potencial visto a possibilidade de execução de padrões de corte precisos e complexos por equipamentos de fabricação digital, permitindo uma capacidade inédita de curvamento dos materiais. Ainda, configuram processos eficientes e de baixo custo quando comparados a outros processos tradicionais, além de serem acessíveis pela disponibilidade atual dessas tecnologias (CALLEN e ZADPOOR, 2018; CELLI et al., 2018; MANSOORI et al., 2019; MITOV et al., 2019; XU et al., 2017).

Segundo Konaković et al. (2016), pela possibilidade de controlar o comportamento de deformação por cortes, surgem novas oportunidades para design baseado em materiais. A capacidade de unir as características dos materiais com geometrias complexas poderia resultar em funcionalidades inéditas. A obtenção de estruturas tridimensionais a partir de materiais planos é um paradigma de manufatura que se manifesta em diversas escalas (CALLEN e ZADPOOR, 2018). A relação entre estrutura, processamento, propriedades e produtos presente nas técnicas mencionadas está representada na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de relação entre produto, processamento, propriedades e estrutura no caso das técnicas baseadas em alterações geométricas.



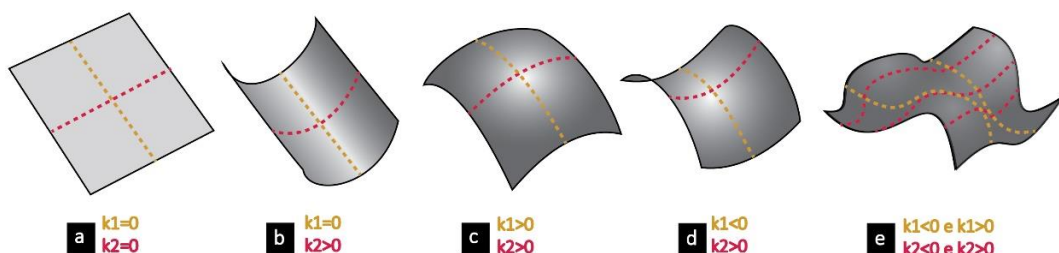
Representação das esferas de produto, processamento, estrutura e propriedades aplicado a técnicas que aplicam cortes padronizados por fabricação digital (processamento), alterando a macroestrutura do material e assim afetando propriedades de flexibilidade, rigidez e resistência, permitindo assim a aplicação do material a novos produtos. Fonte: da autora (2021).

Cho et. al (2014) aponta que a maioria dos materiais não comporta muito alongamento elástico, resultando em uma limitação de formas macroscópicas as quais o material consegue se deformar, mas, por cortes padronizados qualquer material pode ser alterado, permitindo tensões maiores e mudanças de forma macroscópica. Os autores (2014) acrescentam que por essas técnicas se pode manipular desde aspectos formais até propriedades mecânicas e específicas do material (como propriedades elétricas e acústicas). Porém, segundo Callens e Zadpoor (2018), para que se possa obter formas tridimensionais a partir de materiais planos é preciso mudar a curvatura intrínseca desses e ao mesmo tempo limitar a sua distorção para que as características da superfície não sejam prejudicadas.

A transformação de materiais bidimensionais em geometrias tridimensionais inspira estudos em diversas áreas e escalas, o que se dá em parte pela possibilidade de processamento por ferramentas voltadas a materiais planos (geralmente rápido e barato, de fácil estocagem e transporte), fazendo com que se abra uma nova gama de possibilidades de usos e funções para esses. Porém, é necessário controle sobre o processo, podendo esse originar a geometria apenas pelo desenrolar do material (no caso de superfícies desenvolvíveis) ou por inserção de distorções no plano (no caso de superfícies não desenvolvíveis) (CALLENS e ZADPOOR, 2018).

Uma superfície curva desenvolvível tem curvatura gaussiana zero (uma das curvaturas principais é zero, a curvatura é simples) e nela as distâncias internas permanecem as mesmas quando planificada, não havendo distorção e podendo ser obtida por um material que seja flexível, não deformável e plano (CAPONE e LANZARA, 2019). As superfícies não desenvolvíveis (como as de dupla curvatura) não podem ser convertidas em um plano e caso se tente sua obtenção por um material rígido é provável que ocorra extensão, enrugamento, fratura ou rasgo desse (BORHANI e KALANTAR, 2017; YANG, CHOI e KAMIEN, 2016). Nesse sentido as técnicas baseadas em cortes padronizados têm o potencial de aliviar as tensões e alterar o comportamento dos materiais sob deformação, visando a obtenção tanto de superfícies curvas desenvolvíveis quanto não desenvolvíveis. Exemplos de cada tipo de superfície e curvatura constam na Figura 3.

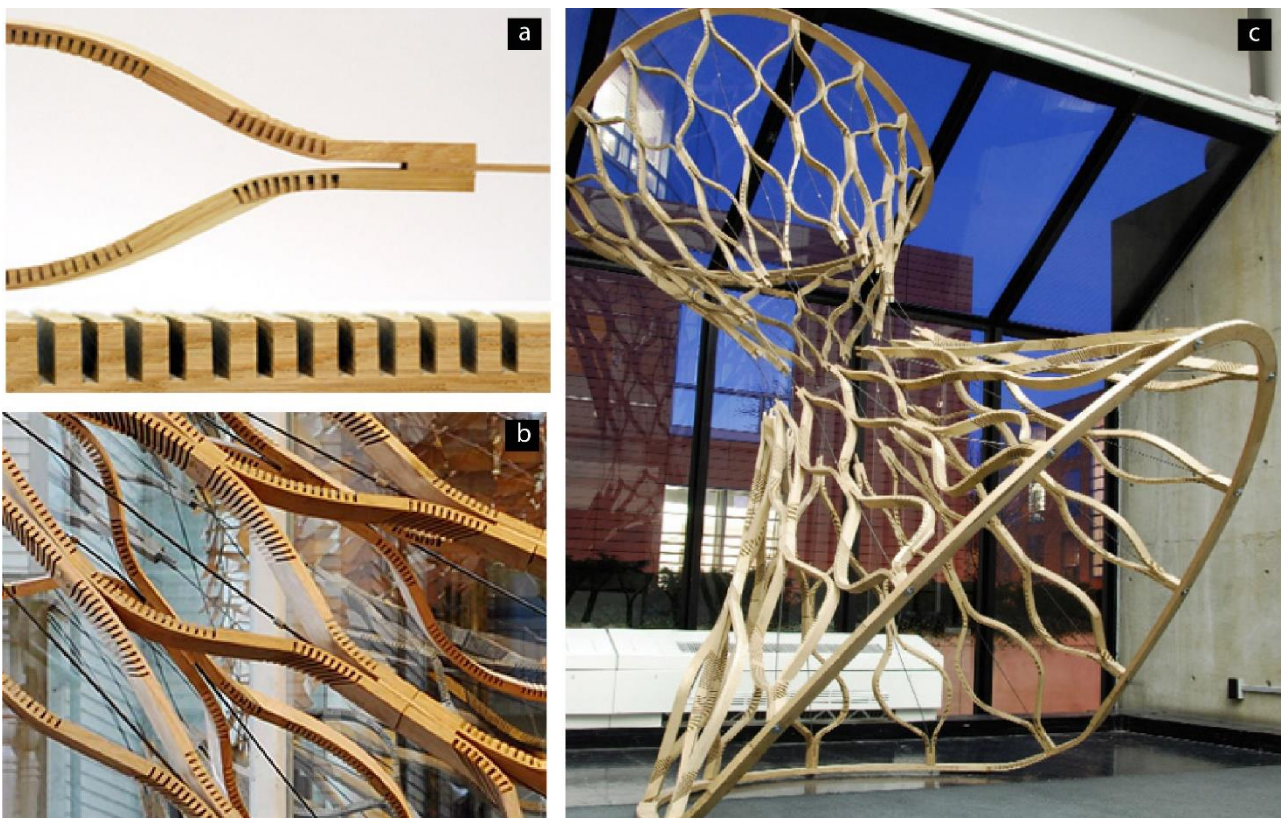
Figura 3 - Esquema dos tipos de superfície baseados nas suas curvaturas principais.



Tipos de superfícies, considerando que curvatura Gaussiana ou intrínseca ($K = k_1.k_2$ (sendo que quando $K=0$ a superfície é desenvolvível e quando $K \neq 0$ a superfície é não desenvolvível) e curvatura média ($H = \frac{1}{2} \cdot (k_1 + k_2)$). (a) superfície plana de $K=0$, (b) superfície de curvatura simples de $K=0$ (desenvolvível), (c) superfície de curvatura dupla positiva e $K \neq 0$ (não desenvolvível), (d) superfície de curvatura dupla negativa e $K \neq 0$ (não desenvolvível) e (e) superfície de forma livre (não desenvolvível). Fonte: adaptado de Mansoori et al. (2019).

Conforme levantamento feito pelo estudo aqui presente, algumas técnicas de corte padronizado têm potencial de aumentar as possibilidades de fabricação de formas complexas e curvas e ao mesmo tempo facilitar a integração do projeto com a execução, visto que são processos baseados em sistemas computacionais, fabricação digital e materiais acessíveis. O conjunto das técnicas relatadas encontra utilidade em diversas áreas de aplicação, desde eletrônicos vestíveis (CHEN et al., 2019; GUO et al., 2016; MA et al., 2018; ZHENG et al., 2018) até pavilhões (GREENBERG e KÖRNER, 2014). Além disso, apresentam um diferencial estético que pode ser muito explorado nos projetos. Entretanto, faz-se necessário ter maior domínio sobre elas para que elas possam ser utilizadas com segurança e, indo para além disso, se tornem programáveis, previsíveis e acessíveis a designers e arquitetos, entrando para a gama de possibilidades desses para concretização de suas ideias. Um exemplo de cortes padronizados é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Imagens de experimento utilizando técnica de corte padronizados para curvar madeira.



Experimento de cortes padronizados (técnica de *kerfing*) aplicados em um dos lados de amostras de madeira com variação de profundidade e frequência de cortes, desenvolvido por Brad Crane, Andrew McGee, Marshall Prado e Yang Zhao (Performative Wood Studio, Prof. Achim Menges, Harvard GSD 2010). Em (a) união de duas amostras e uma amostra no formato plano, em (b) trecho do conjunto da estrutura e em (c) estrutura final montada a partir de amostras de madeira com cortes curvadas. Fonte: adaptado de Menges (2011) e Crane et al. (2010).

Alguns estudos fazem menção à importância da espessura no comportamento do material em técnicas desse tipo voltadas ao curvamento do material (CALLENS e ZADPOOR, 2018; CAPONE e LANZARA 2019; GREENBERG, 2012; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; MITOV et al., 2019; NELSON et al., 2016). A

espessura é definida de acordo com o uso previsto para a estrutura curva, considerando-se, por exemplo, que materiais finos podem ser mais flexíveis que materiais espessos (GREENBERG, 2012; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019; MATINI e HAGHNAZAR, 2018), porém menos resistentes à carga (BORHANI e KALANTAR, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Desse modo, é necessária sua correta especificação em vista de atingir os movimentos e requisitos mecânicos esperados (como a possibilidade de ser fletido e manter uma boa resistência mecânica, a possibilidade de sofrer torsão ou não etc.) (GREENBERG, 2012). Ademais, quando se considera a utilização de materiais espessos, há que se levar em conta aspectos como a tensão em flexão que esses apresentam quando curvados (NELSON et al., 2016), o que se deve em parte ao aumento da resistência mecânica que normalmente acompanha o aumento da espessura da peça (ABLAT e QATTAWI, 2019; CAPONE e LANZARA, 2019; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; MITOV et al., 2019; WEI e SINGH, 2017).

As técnicas mencionadas apresentam grande potencial como facilitadoras na obtenção de geometrias curvas pelo uso de tecnologias digitais, quando comparadas a métodos tradicionais de realização dessas geometrias. Além disso, a possibilidade de fabricação de projetos que envolvem as técnicas mencionadas por meios digitais permite que os protótipos sejam construídos com as mesmas tecnologias adequadas para a escala real e integrados ao sistema de projeto, aumentando ainda mais o potencial de adoção dessas técnicas. Entretanto, visto a importância do desenvolvimento de protótipos ao longo do processo de projeto, tanto sob uma ótica criativa quanto construtiva, é essencial que se avalie como que essas técnicas se comportam quando da mudança de escala e, portanto, de espessura.

As técnicas em questão obtêm flexibilidade com base em parâmetros geométricos aplicando-se, teoricamente, a qualquer escala. Porém, para que a transformação de determinado material em uma geometria tridimensional seja previsível e controlável há que se ter atenção ao desenho de cortes, tipo de material e espessura (CALLENS e ZADPOOR, 2018). E indo para além disso, para que se tenha confiança no protótipo dessa geometria tridimensional com relação à construção em escala real há que se avaliar o que ocorre quando da mudança de espessura do material.

Segundo Kalantar e Borhani (2018) e Gursoy e Ozkar (2015), há que se considerar que padrões de corte similares tendem a obter geometrias similares, porém, a magnitude e raio da curvatura, rigidez e concentração de tensão serão distintos para cada material e espessura. Essa constatação vai ao encontro do que afirma Nelson et al. (2016b), para quem a eficiência de determinada geometria em modificar a rigidez e força de um material é independente da escala e tipo de material. Entretanto, os valores de rigidez e força em si para materiais e espessuras diferentes serão distintos, visto que a geometria apenas indica a capacidade de redução ou aumento desses valores com relação ao material-base, mas não significa que os valores finais dessas propriedades para diferentes materiais serão iguais. Essa alteração de propriedades do material devido à determinada geometria é referida pelos autores (2016) como fator de forma e é diferente para cada padrão de corte.

Pela revisão de trabalhos científicos que tratam das técnicas de materiais planos por cortes padronizados observa-se um foco na investigação dos parâmetros geométricos dos cortes em si (ABLAT e QATTAWI, 2019; BLEES, 2015; BORHANI e KALANTAR, 2017; CELLI et al., 2018; CHEN et al., 2018; CHEN et al., 2019; CHO et al. 2014; DELIMONT, 2014; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; GOMES, 2017; GUO et al., 2016; GURSOY e OZKAR, 2015; GUTOWSKI, 2017; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; JENSEN, BLINDHEIM e STEINERT, 2017; LEE, 2011; MA et al., 2018; MATINI e RAMTIN, 2018; NELSON et al., 2016a; NELSON, 2018; SHAN et al., 2015; SHYU et al., 2015; VAZQUEZ e JABI, 2015; ZARRINMEHR et al., 2017a; ZHANG et al., 2018; ZHENG et al., 2018; WEI e SINGH, 2017; WILDING, 2011). Pelos estudos anteriores, pode-se fazer inferências sobre o comportamento dos padrões de corte como, por exemplo, que aqueles mais flexíveis obtêm curvas de raios menores (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GOMES, 2017; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; HOLTERMAN, 2018; ZARRINMEHR et al., 2017a; WEI e SINGH, 2017), e que padrões com maior densidade de cortes obtêm maior flexibilidade (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GOMES, 2017; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a; WEI e SINGH, 2017).

Apesar de alguns autores fazerem menção à influência da espessura, material e escala do experimento nos resultados de curvamento, nota-se uma carência de estudos específicos sobre esses parâmetros. Porém, observa-se que alguns materiais são bastante comuns nos estudos deste tipo, como é o caso do MDF. A frequência desse material nas investigações pode se dar a sua ampla utilização no design e arquitetura (AYRILMIS, 2007; BERGLAND e ROWELL, 2005; CHEN et al., 2018; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; STARK, CAI e CARLL, 2010; WILSON, 2010), além das vantagens da alta disponibilidade no mercado (GÜZELCI, BACINOĞLU e ALAÇAM, 2017), preço relativamente baixo e alta qualidade (ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015). Ademais, o MDF apresenta algumas características benéficas ao processamento por equipamentos de fabricação digital, como: o fato de ser comercializado em painéis planos, facilitando o corte em formatos variados (CHEN et al., 2018), a uniformidade de seu núcleo, a sua lisura e solidez, o que o torna muito adequado à moldagem e gravação, fresamento e aplicação de acabamentos com precisão (AYRILMIS, 2007; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; WANG et al., 2001; WANG, WINISTORFER e YOUNG, 2004; DAVIM, CLEMENTE e SILVA, 2009), além de características da sua superfície, como a estabilidade dimensional (ELTAWAHNI, OLABI e BENYOUNIS, 2011; GAITONDE, KARNIK e DAVIM, 2008; RAMAN, SHARIF e SUDIN, 2012). Além disso, sua característica de comportamento aproximadamente isotrópico no plano do painel aumenta a previsibilidade e confiabilidade de sua utilização (SHMULSKY e JONES, 2011).

Observa-se, portanto, certa relevância do MDF tanto em aplicações voltadas ao design quanto em estudos deste tema. Também se nota, conforme dito anteriormente, que há certo domínio sobre o comportamento dos diferentes padrões e parâmetros geométricos de corte. Além disto, tem-se a sugestão de Nelson et al. (2016b) com relação à constância da eficiência de certa geometria em mudar propriedades dos

materiais. Considerando-se o comportamento do material em diferentes escalas e espessuras, cabe um questionamento: no caso do curvamento de MDF com aplicação de determinado padrão de corte, caso se utilize diferentes espessuras do material e se ajuste a geometria do padrão de corte proporcionalmente à espessura, a curvatura obtida seria alterada na mesma medida?

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a técnica de curvamento por aplicação de cortes padronizados feitos por fabricação digital e os efeitos geométricos da mudança de espessura do material (MDF) na curvatura resultante.

Para atingir o objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- I. Levantar os estudos existentes no meio acadêmico e científico que tratam de técnicas de curvamento de materiais planos por cortes padronizados de modo a diferenciá-las e avaliar o comportamento mecânico do material e seus resultados formais oriundos da adoção de cada uma.
- II. Analisar as abordagens, métodos, materiais, aplicações e resultados obtidos pelos autores dos estudos existentes sobre técnica de curvamento de materiais planos.
- III. Propor um método de corte e avaliação da influência da espessura no curvamento de MDF pela análise da revisão sistemática.
- IV. Avaliar a influência de alguns parâmetros geométricos dos cortes e da geometria-alvo mencionados na literatura existente na capacidade de curvamento do MDF.
- V. Analisar a geometria resultante do curvamento do MDF por técnica de cortes padronizados, relacionando os resultados com o comportamento mecânico conhecido do material.

1.4 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa busca aumentar as possibilidades formais oriundas de sistemas de fabricação CAD-CAM em MDF através do estudo do seu curvamento por cortes padronizados. Com isso, tem-se a intenção de fazer com que a fabricação digital permita a obtenção de geometrias complexas na mesma medida que o fazem os softwares de projeto. A escolha dos materiais foi baseada na sua recorrência em projetos de design e arquitetura e em sistemas de fabricação CAD-CAM (AYRILMIS, 2007; BERGLAND e ROWELL, 2005; CHEN et al., 2018; HUGHES, 2015; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; SHMULSKY e JONES, 2011; STARK, CAI e CARLL, 2010; WANG et al., 2001; WANG, WINISTORFER e YOUNG, 2004; WILSON, 2010). Ademais, considera-se que o estudo pode contribuir para o conhecimento e diferenciação das técnicas voltadas ao curvamento de

materiais planos por corte, podendo-se selecionar a mais adequada e, também, unir conhecimentos de diferentes técnicas.

No que tange ao curvamento de MDF propõe-se que o parâmetro a ser investigado seja a espessura do material, visando analisar os efeitos da sua mudança no comportamento do material em curva. Esse parâmetro foi considerado relevante tanto pela carência de estudos sobre ele quanto por sua importância no processo de prototipagem, que tem papel fundamental no processo de transição do digital para o físico no desenvolvimento de um projeto. Pelo controle dos efeitos da mudança de espessura pode-se facilitar o desenvolvimento de maquetes físicas em escala reduzida, conferindo confiança no método com relação ao modelo em escala real. Assim, colabora-se com a economia de recursos necessários para a prototipagem dos projetos em escala real e com a redução do retrabalho no momento da execução desse, que é causado pela falta de precisão dos protótipos ou falta de definição inicial da materialidade do projeto.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Propõe-se a divisão deste estudo em 5 capítulos: Introdução; Revisão Teórica; Materiais e Métodos; Resultados e Discussão; e Conclusão. Os capítulos serão descritos nos parágrafos a seguir.

A Introdução busca inserir o leitor na problemática de design e arquitetura que diz respeito à diferença entre a liberdade dos sistemas digitais e os limitantes de materialização dos projetos no que tange à criação de formas geométricas complexas ou curvas. São apresentadas técnicas que visam a contornar as limitações de materiais apropriados à fabricação digital por alteração de suas propriedades. Essas técnicas baseiam-se em intervenções geométricas, mais especificamente a aplicação de cortes padronizados, que permitem a conversão de materiais planos em geometrias curvas. Justifica-se o estudo da técnica aplicada ao MDF e a influência da espessura do material nos resultados de curvamento. Por fim, o trabalho é decomposto em objetivos gerais e específicos.

O capítulo Revisão Teórica inicia descrevendo o MDF e suas características. Em seguida é feita uma revisão sobre técnicas existentes de curvamento de materiais planos por corte (incluindo conceitos e abordagens encontradas) de modo a posicioná-las no contexto científico, compará-las e identificar tendências, além de selecionar métodos mais apropriados a este estudo.

Materiais e Métodos dizem respeito à etapa experimental da pesquisa, envolvendo a definição dos processos e ferramentas dos ensaios a serem feitos e das três etapas de análises.

No capítulo Resultados e Discussão serão apresentados os resultados preliminares do experimento, visando a fornecer dados para validação do método e, ao final, será feita uma discussão sobre os resultados encontrados, comparando-os com os conhecimentos prévios adquiridos na Revisão Teórica e argumentando-se as causas e consequências dos resultados. Em Conclusão, ao final, o estudo como um todo é analisado e resumido e são feitos apontamentos relacionando os resultados com os objetivos iniciais da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

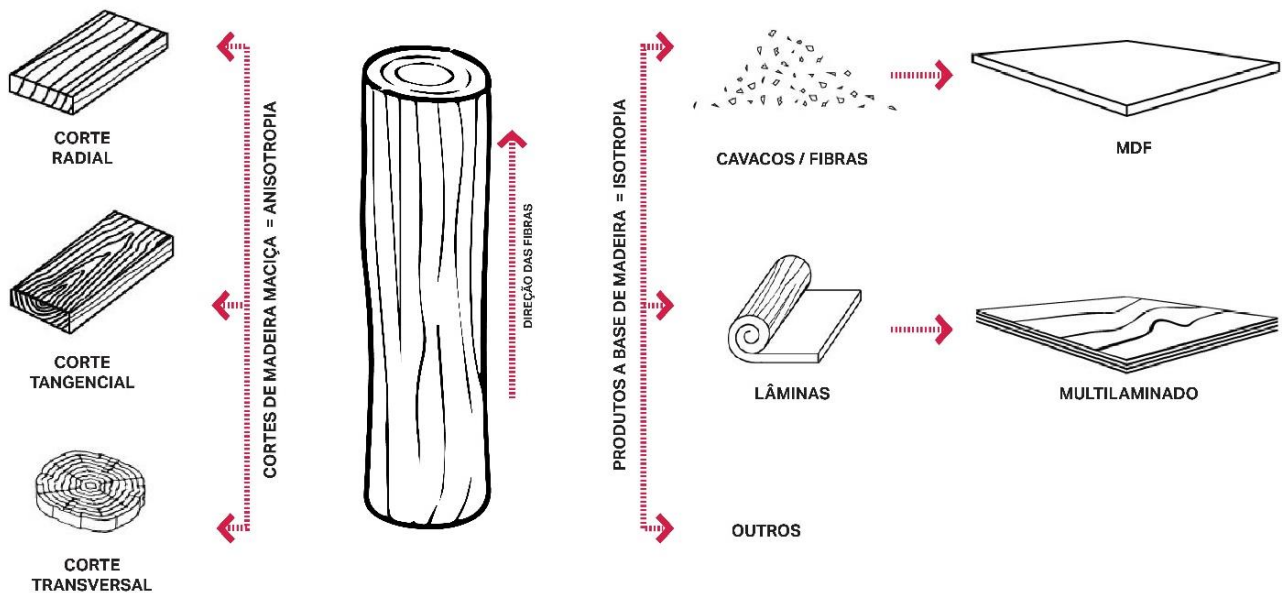
Tendo em vista que o presente trabalho investiga a aplicação de uma técnica em um material específico, considerou-se pertinente fazer uma revisão da literatura existente acerca destes dois aspectos. Assim, busca-se compreender o funcionamento das técnicas de curvamento de materiais planos por corte e selecionar a mais apropriada ao material em questão, assim como estudar as características do MDF para analisar os possíveis resultados obtidos com base nisso. A revisão teórica será apresentada nos itens que seguem.

2.1 MDF

A madeira é um material natural de comportamento anisotrópico, ou seja, as propriedades que ela apresenta no sentido paralelo ao grão são diferentes das propriedades no sentido perpendicular a esse (SHMULSKY e JONES, 2011). Além disso, ela se apresenta como um material heterogêneo, no qual as falhas são distribuídas de maneira aleatória (RATHKE et al., 2012). Muitos materiais industriais, por outro lado, apresentam característica isotrópica, que se refere à presença de propriedades similares em todas as direções, como é o caso de materiais fabricados à base de madeira (seja de lâminas, partículas ou fibras), etc. Esses materiais obtêm essa característica devido à distribuição diversificada da direção das fibras no material, apresentando normalmente propriedades uniformes ao longo do painel, o que os faz mais previsíveis e controláveis (SHMULSKY e JONES, 2011). Segundo os autores (2011), esses materiais ainda podem apresentar performance superior a alguns materiais naturais. Além disso, através desses materiais alguns aspectos relacionados à fabricação são facilitados, como a padronização de formatos e tamanhos, otimizando o processo como um todo (CHEN et al., 2018). A Figura 5 ilustra a diferença entre os produtos de madeira e à base de madeira.

O MDF, painel de fibra de média densidade, é um produto industrial que se enquadra na categoria dos materiais compósitos à base de madeira. É feito a partir de fibras de madeira ligno-celulósicas que são unidas por resinas, ou ligantes, por aplicação de calor e pressão (DAVIM, CLEMENTE e SILVA, 2009; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; PRAKASH e PALANIKUMAR, 2010; RAMAN, SHARIF e SUDIN, 2012; YOUNGS e HAMZA, 2016). A matéria prima básica é a fibra de madeira, porém há pesquisas buscando outras fontes ligno-celulósicas, incluindo resíduos agrícolas (ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015).

Figura 5 - Esquema dos produtos de madeira maciça (anisotrópicos) e produtos à base de madeira (isotrópicos).



Representação de um tronco de árvore, que deriva tanto para tábuas cortadas em diferentes direções, originando produtos de comportamento anisotrópico, quanto para produtos à base de madeira, de comportamento isotrópico. Fonte: da autora (2021).

No Brasil as fibras de madeira para produção do MDF são obtidas a partir de madeira oriunda de florestas plantadas (BIAZUS, HORA e LEITE, 2010). No país, o plantio nessas florestas é composto por aproximadamente 75% de eucalipto e 25% de pinus. A produção de painéis de madeira industrializada, dentre as quais se encontra o MDF, consumiu 7,1% da madeira plantada no Brasil em 2012 (ABRAF, 2013).

Com relação à sua fabricação, os painéis de MDF têm processo automatizado e linear baseado em: trituração, que gera cavacos de madeira; refinamento, no qual os cavacos são fervidos e moídos; mistura, na qual as fibras são unidas às resinas, ceras e outros aditivos; a secagem em tubo de ar quente, resultando em uma mistura com teor de umidade de 7 a 9%; formação do colchão por distribuição das fibras em uma esteira transportadora plana com ajuste da espessura do painel; prensa com calor e pressão para remover o ar e aumentar a densidade, chegando a valores de 496 a 801 kg/m³ e à espessura desejada; resfriamento e acabamento, na qual os painéis são lixados para uniformizar a espessura e densidade e cortados nas dimensões finais (ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; WILSON, 2010).

O MDF é um material de alta disponibilidade no mercado (GÜZELCI, BACINOGLU e ALAÇAM, 2017), relativamente barato, de boa qualidade e altamente desenvolvido, sendo requisitado por diversos usos-fim (ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015). É, inclusive, em muitos casos preferido à madeira maciça, visto algumas vantagens sobre essa (DAVIM, CLEMENTE e SILVA, 2009; PRAKASH e PALANIKUMAR, 2010). O material tem função não estrutural, utilizando-se para marcenaria e móveis, além de estruturas secundárias em edifícios, como paredes, fachadas, pisos, portas, componentes de telhados, etc. (AYRILMIS, 2007; BERGLAND e ROWELL, 2005; CHEN et al., 2018; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; STARK, CAI e CARLL,

2010; WILSON, 2010). Também encontra utilidade em superfícies que não necessitam de muita resistência mas nas quais se possa dar acabamento, como revestimentos de parede (AYRILMIS, 2007; SHMULSKY e JONES, 2011).

O MDF é fabricado em painéis planos, o que facilita o corte em formatos variados (CHEN et al., 2018). Além disso, segundo Raman, Sharif e Sudin (2012) o MDF tem a vantagem sobre outros materiais (como o aglomerado de madeira) de ser aproximadamente uniforme ao longo do painel. Essa uniformidade e o fato de ser um material liso e sólido o torna muito adequado à moldagem e gravação, fresamento e aplicação de acabamentos com precisão (AYRILMIS, 2007; BIAZUS, HORA e LEITE, 2010; ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015; WANG et al., 2001; WANG, WINISTORFER e YOUNG, 2004), sendo o fresamento muito comum para a fabricação de produtos de MDF (DAVIM, CLEMENTE e SILVA, 2009). Além da facilidade de processamento, há vantagens do uso do MDF devidas às características da sua superfície, como a estabilidade dimensional (ELTAWAHNI, OLABI e BENYOUNIS, 2011; GAITONDE, KARNIK e DAVIM, 2008; RAMAN, SHARIF e SUDIN, 2012).

Uma das desvantagens do uso do MDF é que ele não é adequado para usos externos, visto a sua baixa resistência à umidade. Porém, há estudos que visam a melhorar essa característica pela aplicação de aditivos químicos ou mistura de resinas, de modo que eles já são aplicados a ambientes internos de alta umidade (ORMONDROYD e STEFANOWSKI, 2015).

Quando se aborda a questão das propriedades de um painel de MDF, há que se compreender que o produto é resultante e influenciado por diversos processos físicos e químicos. Esses processos são provindos dos materiais de origem e sua interação (como a falta de adesão das fibras à cola ou por falhas da madeira em si) quanto de aspectos de sua fabricação, como a criação de zonas de falhas na transição entre as duas camadas de diferentes densidades, devido às diferenças de tempo de cura da resina (RATHKE et al., 2012).

As propriedades ao longo do plano do MDF podem ser consideradas isotrópicas, isso é, não há diferença significativa entre as propriedades mecânicas na superfície do painel (GANEV et al., 2005b). A densidade do MDF oscila entre 600 e 800 kg/m³ (AYRILMIS, 2007). Segundo Cai e Ross (2010), com relação a propriedades estáticas de flexão, o MDF tem Módulo de elasticidade (ou módulo de Young) de 3,59 GPa e Módulo de ruptura (ou resistência à flexão) de 35,85 Mpa, porém esses valores oscilam entre fabricantes.

Já com relação ao interior do painel, tem-se que geralmente a geometria das fibras e a quantidade de resina não mudam ao longo da espessura do painel, porém há uma diferenciação entre camadas por nível de compactação, apresentando os painéis de MDF uma graduação de densidade ao longo de sua espessura (BERGLAND e ROWELL, 2005; GANEV et al., 2005b; WANG et al., 2001). Essa diferenciação se dá principalmente pelo maior aquecimento incidente nas camadas superficiais do painel de MDF resultante do processo de compactação (KELLY, 1977). Esta mudança de densidade na espessura corresponde ao perfil de densidade do MDF, ou seção transversal do painel, está relacionado a muitas características do painel de MDF que interferem em sua performance (WANG et al., 2001). Segundo Kelly (1977), a existência dessa diferença de densidade favorece algumas características comumente desejadas para o MDF como o aumento resultante

na resistência à flexão do material, frente à redução de sua resistência à tração no sentido perpendicular ao plano do painel e ao cisalhamento entre essas diferentes camadas de diferentes densidades.

Normalmente o perfil de densidade do painel se apresenta com menor densidade no núcleo e maior densidade nas faces do painel, sendo a camada externa mais fina do que o núcleo (GANEV et al., 2005a; AYRILMIS, 2007; WANG, WINISTORFER e YOUNG, 2004). O MDF normalmente tem um perfil de densidade simétrico e homogêneo ao longo do painel (RATHKE et al., 2012), porém a diferença de densidade entre núcleo e a camada da face pode ser grande, chegando o núcleo a ter aproximadamente 50% da densidade máxima do painel.

Com relação ao módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento do MDF (também conhecido como módulo de torção, e que consiste na razão entre a tensão de cisalhamento aplicada a um corpo e sua deformação específica), estes aumentam significativamente com o aumento da densidade do painel de MDF (GANEV et al., 2005b). Isso vai ao encontro do relatado por Sebera et al. (2014), que, por experimentos com amostras de diferentes espessuras observou que as amostras menos densas e as áreas menos densas dessas resultavam em maior tensão quando da aplicação de carga. O autor também constatou uma menor densidade total nos painéis mais espessos de MDF, além de uma maior complexidade no perfil de densidade desses, com formação de mais camadas de diferentes densidades ao longo do perfil transversal do material. Além disso, segundo Suchsland et al. (1979, APUD BERGLAND e ROWELL, 2005) o módulo de elasticidade do MDF depende em grande parte da densidade da camada da superfície.

2.2 TÉCNICAS DE CURVAMENTO DE MATERIAIS PLANOS POR CORTES PADRONIZADOS

Devido aos escassos trabalhos encontrados em uma busca inicial sobre o curvamento de materiais planos por corte, se constatou a necessidade de realizar uma busca sistemática, para a qual foi utilizada como base a metodologia proposta por Kitchenham (2007). A definição da questão da pesquisa partiu do objetivo da investigação: o curvamento de um material plano por corte, visando a encontrar técnicas que pudessem ser aplicáveis ao material em questão. Como estratégia de pesquisa foram definidos dois níveis de busca: a busca primária (uma fase preliminar de captação de dados para definição de filtros) e a busca secundária (que é a busca nas bases de dados).

A busca primária foi feita nas bases de dados Science Direct e Scopus, buscando-se nos campos Título, Palavras-chave ou Resumo: *kerfing*, *kerf cut* ou *kerf bending*, devido ao conhecimento prévio da técnica para curvar materiais rígidos. As buscas resultaram em alguns artigos de interesse que continham sinônimos para a técnica e a data de surgimento dessa. O registro inicial da técnica aplicada por fabricação digital foi encontrado em Zarrinmehr et. al. (2017), referente à introdução dessa em 2007 pela empresa Dukta.

A busca secundária se deu entre 20 de março a 31 de maio de 2019 e foi feita nas bases de dados Science Direct, Scopus e Google Scholar, as duas primeiras incluídas por conterem fontes de busca de

interesse e a terceira por ser abrangente e incluir trabalhos acadêmicos, um conveniente uma vez que os estudos encontrados eram recentes e poderiam existir trabalhos que carecessem de publicação. Foi definido o intervalo das buscas de 2005 (dois anos desde a introdução do *kerfing* por fabricação digital) até 2019. As *strings* foram compostas utilizando sinônimos para cada aspecto do tema: para a técnica foram utilizadas: *relief cut, kerfing cutting, kerf cut, kerfing pattern, kerf*, para o material (painel plano): *flat, sheet e panel*, e para o resultado desejado (curvamento): *curving, bending, folding, flexible e elasticity*. Foram utilizadas operações booleanas de *AND* e *OR*, aspas e asterisco, a depender da base de dados. Não foi filtrado campo nem fonte de busca, apenas excluindo-se patentes e citações.

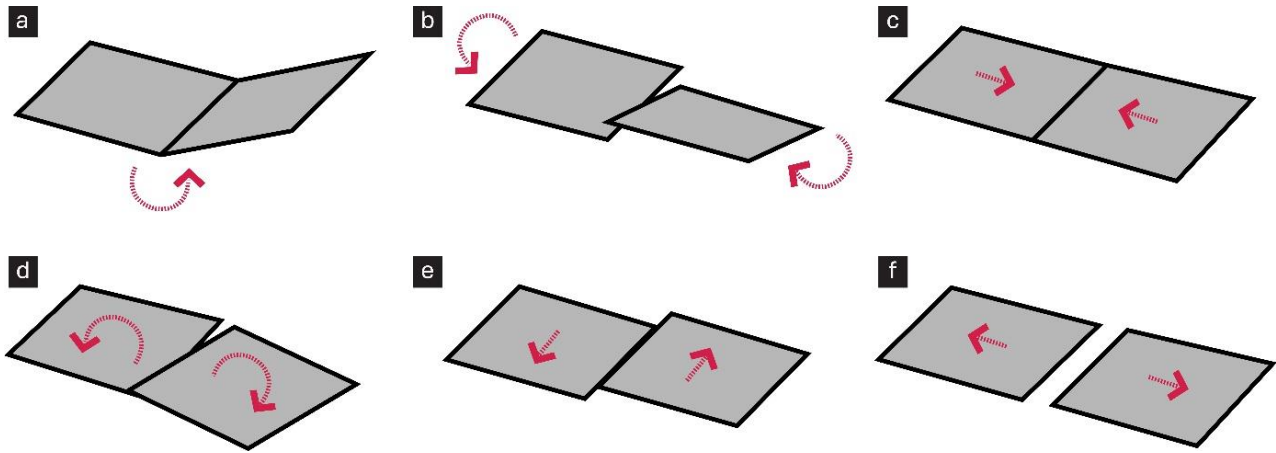
A seleção dos estudos se deu por uma sucessão de 4 filtros. O filtro inicial consistiu nas *strings*, no período das buscas e nas bases de dados. O segundo filtro se deu pela leitura do título, sendo excluídos os casos evidentemente não relacionados ao tema, do restante foram lidas as palavras-chave e resumo, fazendo-se o mesmo nesse caso. Foram excluídos então os trabalhos que não tinham tradução original para o português ou inglês. O terceiro filtro foi de exclusão de estudos repetidos. O quarto filtro foi da leitura integral dos trabalhos, a partir do qual considerou-se pertinente excluir alguns, como: aqueles que mencionam a técnica sem investiga-la; os que visavam apenas o alongamento do material, mesmo tratando de flexibilidade; casos em a técnica de cortes não foi decisiva para a dobra ou curvamento; e estudos que estavam inteiramente contidos em outros (com exceção de artigos contidos em trabalhos acadêmicos, quando se preferiu os artigos por sua relevância científica). A planilha da quantidade de trabalhos por filtros consta no Apêndice A.

A partir da leitura dos estudos foram extraídos e catalogados os dados, como: autores e data de publicação, métodos e materiais utilizados, padrão de corte aplicado, tipo de curvatura investigada etc. Pela revisão foram identificadas algumas técnicas utilizadas para curvar os materiais planos, sendo elas: *kirigami*, ligações auxéticas, *lamina emergente mechanisms* (LEMs) e *kerfing*. O agrupamento dos estudos por técnicas foi feito pela autora deste estudo de acordo com a denominação dada pelo autor de cada trabalho ou, na ausência dessa, por semelhança a outros estudos. As pesquisas de cada categoria também foram classificadas por abordagens criadas por esta autora, podendo cada uma pertencer a mais de um grupo. As classificações foram incluídas nas planilhas dos Apêndice B, Apêndice C, Apêndice D e Apêndice E, juntamente aos dados de cada estudo, planilhas essas que estão sintetizadas no Apêndice F. Nos itens que seguem as técnicas serão conceituadas de acordo com o material encontrado, assim como as abordagens dos estudos, sendo feita ao final uma síntese visando o diagnóstico de tendências, comparação entre as técnicas, observação dos métodos utilizados e identificação de lacunas.

Serão analisados os esforços mecânicos que cada técnica favorece quando da deformação das amostras. Para ilustração, um esquema desses esforços consta na Figura 6. Além disso, ao longo da revisão serão mencionados diferentes padrões de corte presentes na literatura. Para facilitar a visualização e compreensão desses padrões alguns deles estão ilustrados na Figura 7. Por existir muitas variações de padrões

de corte não foi possível representar sua totalidade, de modo que foram selecionados aqueles mais frequentes.

Figura 6 - Esforços mecânicos.



Representação dos esforços de: (a) flexão, (b) torção, (c) compressão, (d) flexão lateral, (e) cisalhamento e (f) tração. Fonte: adaptado de Delimont (2014).

Figura 7 - Alguns dos principais padrões de corte mencionados na revisão de literatura.

	Linear paralelo com apenas um segmento de continuidade de material perpendicular aos cortes entre duas linhas consecutivas, posicionado nas extremidades transversais do material de modo intercalado		"Y" espelhado
	Linear paralelo em série com segmentos perpendiculares ao eixo de curvamento do material dispostas de maneira desencontrada		Espiral
	Pino de boliche		Linear formando quadrados internos
	Onda		"Y" formando triângulos
	Losango		Linear formando retângulos internos

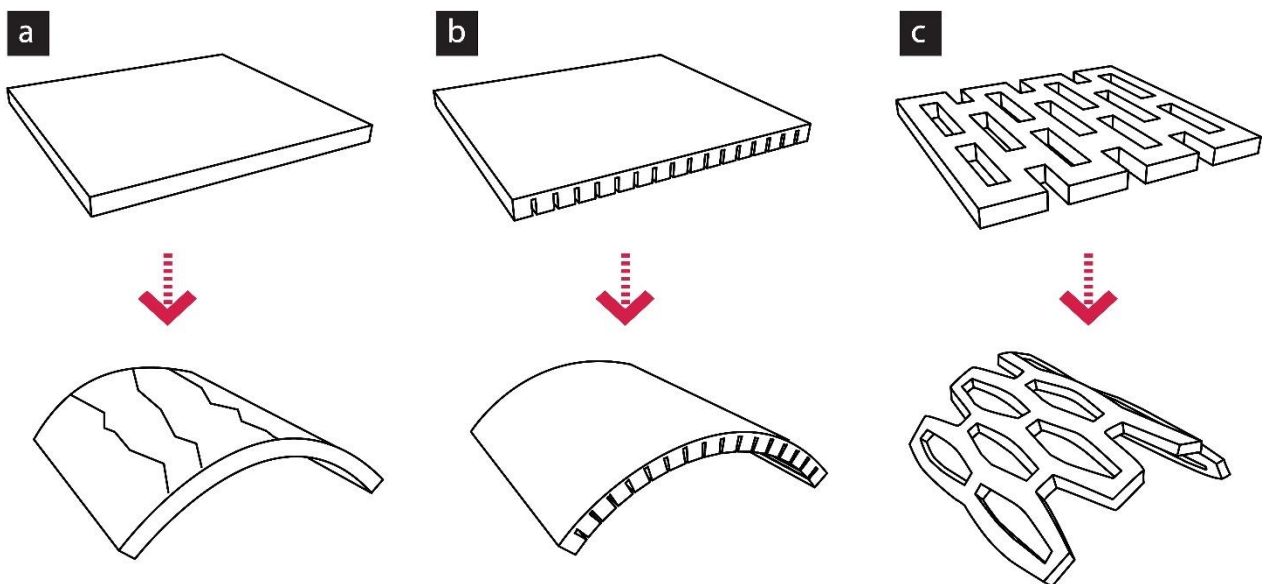
Fonte: da autora (2021).

2.2.1 Kerfing

Kerfing é um termo que se refere à técnica de corte, ou remoção de porções, de um material rígido em pontos estratégicos para conferir flexibilidade e facilitar o curvamento desse (CAPONE e LANZARA, 2019; CHEN et al., 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018; MANSOORI et al., 2019; MITOV et al., 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a, b). Esses pontos sofreriam altas tensões e concentrações dessas (que seriam de compressão na face côncava e de tração na face convexa da curva) e possivelmente originariam fraturas caso se tentasse fletir esses painéis rígidos (MENGES, 2011; ZARRINMEHR et al., 2017a). A técnica também é encontrada na literatura sob os termos *relief cutting*, *living hinge*, *lattice hinge*, *kef-bending* e *dukta* (CAPONE e LANZARA, 2019; GURSOY e OZKAR, 2015; KALANTAR e BORHANI, 2018; ZARRINMEHR et al., 2017a), esse último se referindo à empresa que patenteou o método em 2007.

Como um bom exemplo da combinação de propriedades tanto do material quanto de sua forma, que influencia sua performance (GURSOY e OZKAR, 2015), *kerfing* é um método subtrativo de manufatura que altera a resistência do material e aumenta a sua flexibilidade aparente (CAPONE e LANZARA, 2019). A Figura 8 ilustra um painel rígido e possíveis locais de ruptura e dois painéis com dois tipos de *kerfing*.

Figura 8 - Esquemas de materiais em arco com diferentes tipos de *kerfing*.



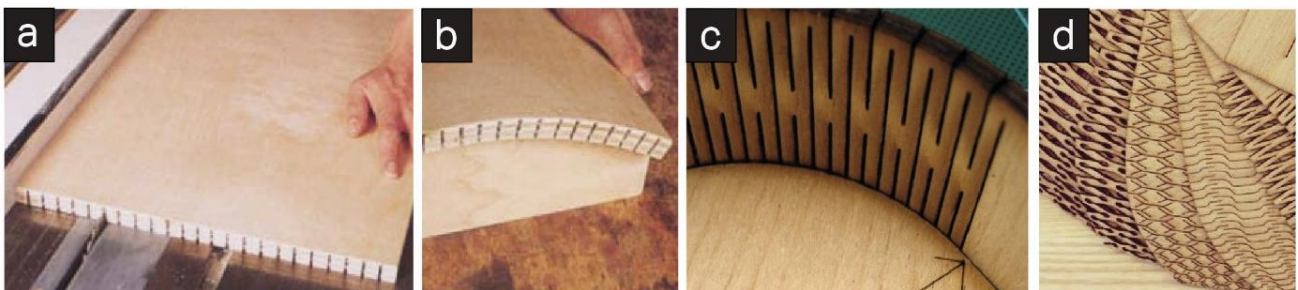
Representação do que ocorre ao tentar-se fletir: (a) um painel rígido, com ocorrência de rachaduras, (b) um painel rígido com aplicação de *kerfing* em um dos lados do material e (c) um painel rígido com aplicação de *kerfing* através da espessura do material. Fonte: da autora (2021).

Tradicionalmente, *kerf-bending* é uma prática de marcenaria que consiste na execução de incisões no sentido perpendicular às fibras (interrompendo-as) em um dos lados de um painel de madeira (MENGES, 2011). A técnica, juntamente à flexão à vapor e laminação, é uma opção quando se tem por objetivo curvar alguns materiais, apresentando a vantagem com relação às outras de ser rápida e acessível, por dispensar o

uso de moldes (CAPONE e LANZARA, 2019; MENGES, 2011; MITOV et al., 2019). Apesar de na marcenaria tradicional os cortes serem feitos com ferramentas como serras circulares e resultarem em curvas suaves, pelo uso da fabricação digital o *kerfing* alcança novos horizontes, permitindo características de curvamento anteriormente impossíveis aos materiais. Isso se dá pela alta liberdade geométrica e precisão dos cortes, além da velocidade do processo, sendo um método de alto custo-benefício frente aos outros (LANZARA e CAPONE, 2019; MANSOORI et al., 2019).

O *kerfing* por fabricação digital já é bastante difundido em *websites*, principalmente em investigações de padrões e parâmetros geométricos de corte. A partir da patente a técnica se disseminou em sites de compartilhamento da internet, como ilustram as experiências de Fenner (2012), Porterfield (2016), experimentos apresentados em sites como o Obrary e o Steammetry (2015), entre outros. Além do mais, estudos científicos sobre o tema têm surgido desde então. Exemplos do *kerfing* tradicional e por fabricação digital podem ser observados na Figura 9.

Figura 9 - *Kerfing* tradicional e *kerfing* por fabricação digital.



(a) e (b) *kerfing* em um dos lados do material produzido por técnica de marcenaria tradicional, fonte: Burd (2001), (c) e (d) *kerfing* através da espessura do material produzido por fabricação digital, fonte: Fenner (2012) e Steammetry (2015).

Em muitos casos, como o de Borhani e Kalantar (2017), a técnica visa a atender situações nas quais são necessários atributos contraditórios, como a necessidade simultânea de alta deformação elástica e rigidez para suportar carga sobre o material. Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) adicionam que o processo é capaz de introduzir propriedades heterogêneas, ou anisotropia, em materiais homogêneos, ou isotrópicos, como MDF e compensado multilaminado de madeira, de modo a se obter determinadas curvas. Pela manipulação do padrão e densidade de cortes, seleção do processo de fabricação e de um material com propriedades adequadas é possível curvar o material em qualquer ângulo que se deseje. Além disso, sob compressão ou tração os materiais respondem de acordo com sua resistência à deformação, e no caso de se desejar configurar determinadas formas essa deformação deve ser prevista, o que é possível por *kerfing* (KALANTAR e BORHANI, 2018).

A técnica viabiliza a conversão de um painel plano em superfícies de curvatura simples (desenvolvíveis), assim como a inserção de distorções no material, permitindo a obtenção de superfícies de dupla curvatura (não desenvolvíveis) (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019). O primeiro caso se deve ao fato de que

nas superfícies desenvolvíveis as distâncias internas são iguais no estado bi e tridimensional, sendo a planificação uma transformação isométrica, portanto pela aplicação de um padrão de *kerfing* com quantidade adequada de cortes se garante a curvatura desejada. Já as superfícies não desenvolvíveis requerem transformações não isométricas para conformar-se, sendo necessária a definição do tipo de corte a ser executado (CAPONE e LANZARA, 2019).

Alguns autores apontam semelhanças da técnica com estruturas encontradas na natureza por diferentes pontos de vista. Greenberg e Körner (2014) comparam a diferenciação de cortes em *kerfing* na superfície à distribuição de componentes em sistemas naturais, que por otimização das fibras atingem alta funcionalidade em uma estrutura contínua. Isso é denominado inteligência natural por Bianconi e Fillipucci (2019). Matini e Haghazadeh (2018) buscam o desenvolvimento de estruturas cinéticas que se articulam por movimentos da própria estrutura, eliminando elementos externos, como ocorre na natureza. Os autores (2018) relacionam o *kerfing* à pele animal, que consegue flexionar não apenas por propriedades do tecido, mas por aspectos geométricos, como rugas em locais mais solicitados. As rugas, apontam, se dão em sentidos perpendiculares à força aplicada e surgem para facilitar o alongamento do material, sendo a densidade delas vinculada à quantidade de deformação de cada área e a intersecção a múltiplas deformações.

No contexto da fabricação digital, o *kerfing* se mostra mais eficiente do que o processo de subtração de material de um bloco maciço por usinagem CNC (controle numérico computadorizado) para a confecção de painéis ou fôrmas curvas, que é um processo demorado e custoso (KALANTAR e BORHANI, 2018; MITOV et al., 2019). Também é vantajoso frente ao *paneling* (divisão da geometria curva em partes menores planas unidas por elementos de junção), que viabiliza a execução digital, mas depende de diversos estágios, tendo projeto e fabricação complexos e perda do aspecto curvo (LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019). Outras vantagens do *kerfing* é sua aplicabilidade a materiais como madeira, MDF, papel-cartão, polímeros e metais (GURSOY e OZKAR, 2015), que são relativamente rígidos quando comparados a outros materiais, comuns em sistemas de produção em massa e se apresentam em tamanhos e formatos padronizados (CHEN et al., 2018; MITOV et al., 2019). Ademais, pela integração em um único componente reduz-se o número de partes, o tempo de montagem e os custos de manutenção, se simplifica a estrutura e o processo de manufatura (MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Além disso, se facilita o transporte e armazenamento, visto a reversibilidade da geometria tridimensional (CAPONE e LANZARA, 2019; MANSOORI et al., 2019).

Os estudos sobre o tema são em grande parte voltados a fins arquitetônicos, como painéis acústicos (HOLTERMAN, 2018), sistemas para fachadas e coberturas (MATINI e HAGHNAZAR, 2018), mobiliário (CAPONE e LANZARA, 2019; GOMES, 2017; GUTOWSKI, 2017), fôrmas para concretagem de estruturas (KALANTAR e BORHANI, 2018), painéis decorativos ou estruturais (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019; MANSOORI et al., 2019; MITOV et al., 2019), estruturas integradas de piso, parede e cobertura (GREENBERG e KÖRNER, 2014), entre outros. Muitos exploram o potencial da estrutura mudar de forma durante o uso (JENSEN, BLINDHEIM e STEINERT, 2017; MATINI e HAGHNAZAR, 2018) ou adquirir mais de uma configuração (HOLTERMAN, 2018;

KALANTAR e BORHANI, 2018; MANSOORI et al., 2019; WEI e SINGH, 2017), deixando evidente seu potencial dinâmico. Pode-se conferir algumas possíveis aplicações para a técnica na Figura 10.

Figura 10 - Exemplos de aplicações da técnica de *kerfing*.



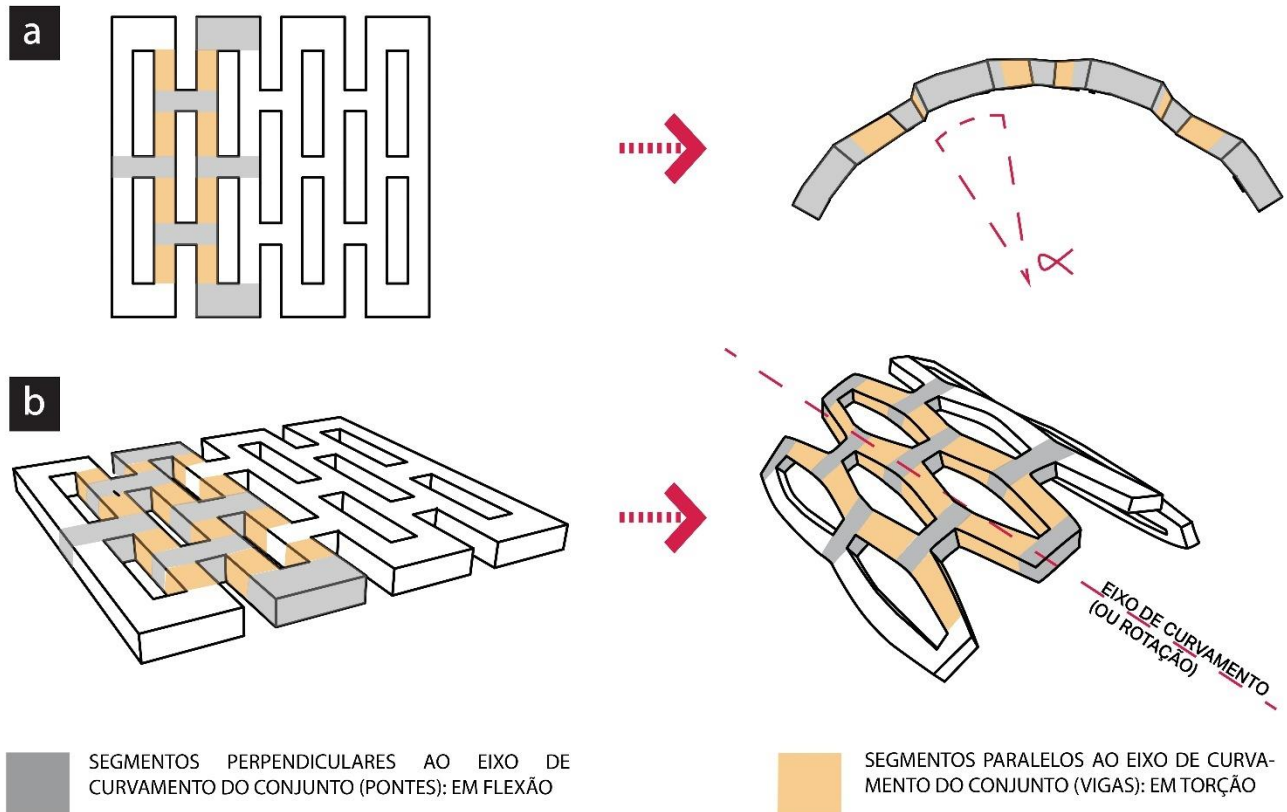
Kerfing padrão linear através do material aplicado a (a) luminária, fonte: Capone e Lanzara, (2018) e (b) cadeira com apenas um segmento perpendicular ao eixo da curva, fonte: Fleishman (2008), (c) forro acústico com *kerfing* em espiral através do material, fonte: Holterman (2018), (d) pavilhão em multilaminado com *kerfing* linear através do material. Fonte: Greenberg e Körner (2014). (e) fôrma para concreto em *kerfing* padrão espiral através do material. Fonte: Kalantar e Borhani (2018).

Visto que a técnica de *kerfing* se dá por cortes em materiais planos, as tecnologias de fabricação digital aplicáveis a ela são aquelas que operam por subtração de material. Dentre essas, observou-se nos estudos uma predominância na adoção de fresadoras CNC, equipamentos de corte a laser e ferramentas robóticas. Kalantar e Borhani (2018) apontam que em alguns casos pode-se executar posteriormente ao *kerfing* outras técnicas para se obter maior curvamento do material, como é o caso de fletir o material a vapor ou aplicar substâncias químicas para que o material fique elástico ou plastificado. Um exemplo é o trabalho de Brad Crane, Andrew McGee, Marshall Prado e Yang Zhao (Performative Wood Studio, Prof. Achim Menges, Harvard GSD 2010) no qual as peças em *kerfing* foram submetidas a flexão à vapor para conformar a estrutura projetada.

Os principais esforços mecânicos responsáveis pela aparente flexibilidade dos materiais em *kerfing* são a torção e flexão dos segmentos de material, que compõe um mecanismo que gera altas deformações fora do plano (CHEN et al., 2018). O movimento que exerce maior influência é a torção dos segmentos paralelos ao eixo de curvamento, chamados de vigas, e é o reflexo da compressão exercida na face inferior e tração na face superior do material quando do curvamento do conjunto (HOLTERMAN, 2018; MATINI e HAGHNAZAR,

2018). Quanto ao movimento de flexão, os autores (2018) apontam que esse ocorre nos segmentos perpendiculares ao eixo de rotação (pontes), mas não tem tanta influência quanto o movimento de torção dos outros segmentos. O curvamento total da superfície representa a soma dos pequenos ângulos que cada segmento é capaz de rotacionar (HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Os esforços sofridos por cada segmento do material em *kerfing* podem ser averiguados na Figura 11.

Figura 11 - Esquema dos esforços mecânicos e ângulos de rotação do painel em *kerfing*.



Esquema de um tipo de *kerfing* linear aplicado através do material e o efeito decorrente da flexão do conjunto em arco, com indicação dos segmentos que estão sob torção ou flexão, além dos ângulos que cada segmento rotaciona. Em (a) vista superior e frontal do material plano e fletido e em (b) perspectivas. Fonte: da autora (2021).

Na deformação de um material em *kerfing* por curvamento, é acumulada nas áreas não cortadas certa energia potencial elástica que faz com que o material tenda a retornar para o seu formato original quando removida a força (KALANTAR e BORHANI, 2018). Logo, se essa ultrapassar o limite elástico dos materiais eles deformarão de maneira plástica, não voltando ao seu formato original após a remoção da força, caso contrário ela será reversível (KALANTAR e BORHANI, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Segundo Capone e Lanzara (2019) o fator limite da deformação é a tensão máxima de torção no caso de cortes lineares com interrupções, que depende do material, espessura, formato e tamanho dos cortes. Os autores (2019) ainda percebem que a largura dos segmentos não deve ser menor do que a espessura do material, para que esse não tenda a

romper, o que pode ser devido à maleabilidade do material depender em parte da manutenção de sua estrutura interna (LANZARA e CAPONE, 2019).

A capacidade de se deformar tridimensionalmente ou de flexionar no seu próprio plano depende do potencial de extensão dos materiais (que normalmente não ocorre). Para adquirir dada geometria esses materiais devem ser expansíveis nas direções solicitadas, podendo isso significar em mais de uma direção simultaneamente (BORHANI e KALANTAR, 2017). A flexibilidade aparente resultante de alguns padrões de *kerfing* pode inclusive ser atribuída a seu comportamento auxético (ZARRINMEHR et al., 2017a). O *kerfing* permite a inserção de distorções na superfície para que a tração ou a compressão no sentido perpendicular aos cortes sejam viabilizadas, visando a alterar a curvatura do material por flexão (BORHANI e KALANTAR, 2017; CAPONE e LANZARA, 2019; MANSOORI et al., 2019; MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Os esforços ou movimentos são limitados ou facilitados pelas propriedades geométricas do padrão de corte, resultando em respostas formais específicas pela aplicação de carga de deformação (GURSOY e OZKAR, 2015).

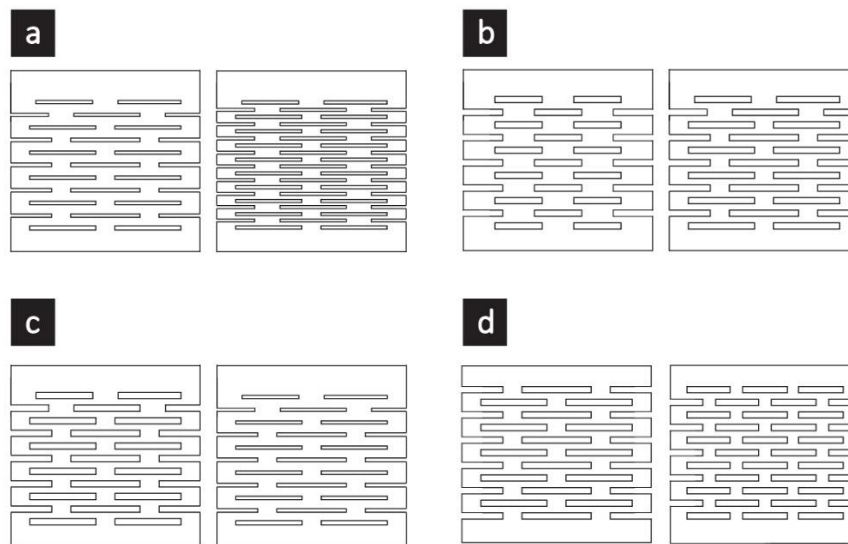
Os fatores que influenciam o curvamento do material em *kerfing* são: as propriedades do material em si (em especial o módulo de Young, que indica o quão rígido é determinado material), o tipo, padrão e os parâmetros de *kerfing* (formato, orientação, escala e densidade dos cortes) e a distribuição dos cortes na superfície (BORHANI e KALANTAR, 2017; CAPONE e LANZARA, 2019; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; KALANTAR e BORHANI, 2018; MITOV et al., 2019;). Segundo Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) não é a subtração em si que define a capacidade do material de se curvar (a porosidade não garante a flexibilidade), mas sim os parâmetros dos cortes e a relações topológicas entre esses, enquanto a sua distribuição na superfície define a geometria obtida.

Com relação às propriedades do material, além da influência do módulo de Young, nota-se que os valores de rigidez e resistência mecânica são muito afetados pela espessura do material, essa exercendo considerável influência nos resultados formais quando da aplicação de *kerfing*, de modo que o aumento dessa acompanha o aumento da rigidez da peça (ABLAT e QATTAWI, 2019; CAPONE e LANZARA, 2019; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; MITOV et al., 2019; WEI e SINGH, 2017). Holterman (2018) atribui a isso o fato da não ocorrência apenas de torção dos segmentos quando do curvamento, mas também flexão, o que faz com que sua altura, equivalente à espessura do material, afete a curvatura mais do que a largura, e no caso de haver apenas torção ambos valores exerceriam a mesma influência. A espessura do material é definida pelo objetivo da geometria que se deseja obter, considerando-se, por exemplo, que materiais finos podem ser mais flexíveis, mas não resistir a forças laterais, e materiais mais espessos o oposto (LANZARA e CAPONE, 2019; MATINI e HAGHNAZAR, 2018).

São diversos os parâmetros geométricos do padrão de corte que influenciam na flexibilidade do material por *kerfing*: densidade, largura e sobreposição dos cortes, a quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de curvamento, o acabamento dos cantos dos cortes etc. Dentre os parâmetros mais relevantes no comportamento do material tem-se a densidade de cortes, de modo que quanto mais próximos,

mais flexível, ou deformável, se torna o material. Assim, pode-se obter raios de curvatura menores e maior capacidade de expansão, porém ao custo de uma maior facilidade de ruptura do material (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GOMES, 2017; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a; WEI e SINGH, 2017). Em outras palavras, quanto maior a escala do padrão de corte menor a flexibilidade aparente obtida (LANZARA e CAPONE, 2019). Alguns dos parâmetros mencionados estão ilustrados na Figura 12.

Figura 12 - Parâmetros do padrão de corte em kerfing.

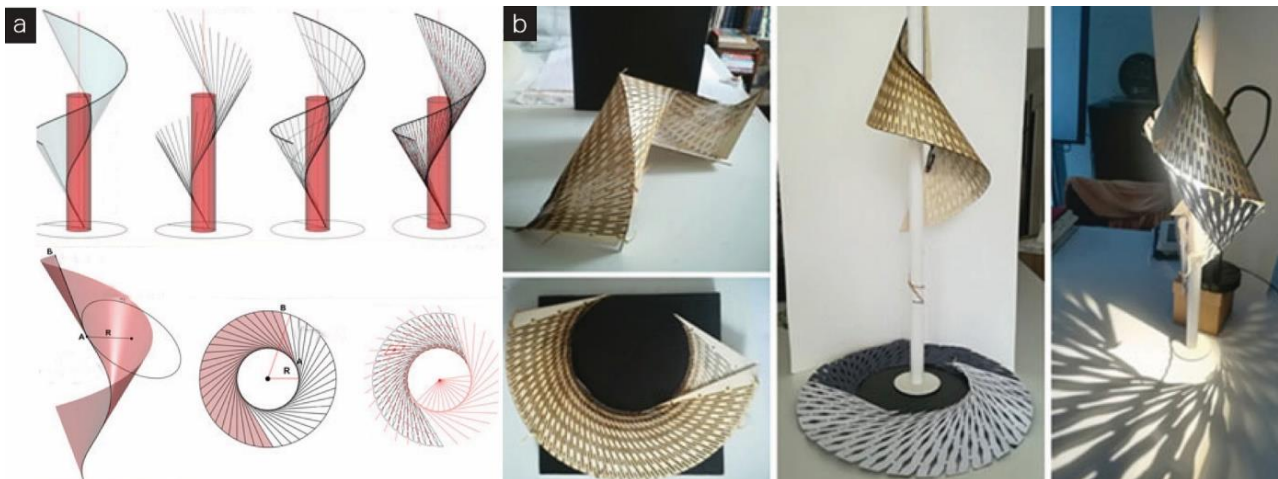


(a) densidade de cortes; (b) sobreposição dos cortes; (c) largura dos cortes; (d) quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão. Fonte: da autora (2021).

Pode-se programar a flexibilidade local dos padrões de corte pelo controle de sua densidade (BORHANI e KALANTAR, 2017; GREENBERG e KÖRNER, 2014). Isso se dá visto que a dimensão das áreas não cortadas determina sua possibilidade de rotação, e amostras com maior densidade de cortes obtêm segmentos mais esbeltos, com menor área transversal, logo tendo um ângulo de rotação maior, sendo mais flexíveis (CHEN et al., 2018; HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018). Ademais, o fato também se deve à presença de mais elementos para absorver a tensão de torção (HOLTERMAN, 2018).

Com relação às regras de distribuição, ou malhas, do padrão de corte muitos autores utilizam como referência as linhas de curvatura, ou geração, da própria superfície, que podem ser extraídas por softwares paramétricos (CAPONE e LANZARA, 2019; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019, MITOV et al., 2019). Esses softwares executam a planificação da superfície, incluindo a determinação da silhueta bidimensional a ser cortada para obter determinada geometria, ou a melhor aproximação dessa. Bianconi e Fillipucci (2019) equiparam a execução de cortes em seu experimento a um processo inverso de inserção de linhas geodésicas na superfície. Na Figura 13 se tem um exemplo da distribuição das linhas do corte nas linhas de geração da superfície.

Figura 13 - Processo de distribuição dos cortes nas linhas de geração da superfície.



(a) geração da superfície e planificação com *kerfing* feita em software paramétrico. (b) fotografias do material após ser cortado e montado em uma luminária. Fonte: adaptado de Capone e Lanzara (2018).

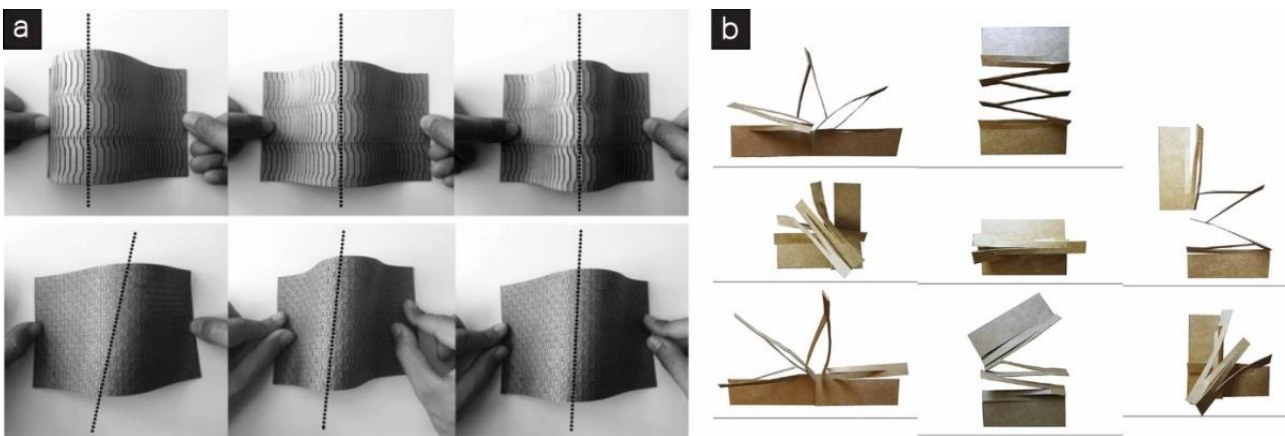
Muito tem se estudado a otimização do *kerfing* com enfoque na obtenção de geometrias específicas (geometrias-alvo), buscando-se tanto conduzir o material por determinado percurso para conformá-las, quanto a otimização entre as propriedades de flexibilidade e rigidez do material, removendo-se o mínimo possível de material. A otimização se baseia na necessidade de propriedades desiguais de flexibilidade aparente ao longo do material, e possibilita a ocorrência de diversos tipos e graus de curvatura em uma mesma amostra (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; ZARRINMEHR et al. 2017a). Lanzara e Capone (2019) justificam que padrões diferentes cabem a diferentes motivos: áreas de pouca curvatura permitem o uso de um padrão menos flexível, já aquelas com curvaturas bruscas necessitam um mais flexível.

Além dos fatores mencionados, tem-se também aqueles que tratam do tipo, magnitude e posição da carga que é aplicada no material para deformação, e que afeta a forma tridimensional resultante (GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018). Segundo Gursoy e Ozkar (2015) dependendo dos meios de manipulação da amostra pode ocorrer translação ou rotação de certas partes dessa no plano ou fora desse. Alguns resultados que as diferenças nas forças aplicadas podem gerar são representados na Figura 14.

Algumas das desvantagens da aplicação da técnica de *kerfing* é que na mesma medida em que ela aumenta a flexibilidade aparente do material ela reduz sua resistência, ou rigidez, não sendo adequada a situações que requerem desempenho estrutural significativo (CAPONE e LANZARA, 2019; GREENBERG e KÖRNER, 2014; LANZARA e CAPONE, 2019). Devido a isso, a maior parte dos trabalhos é voltada a aplicações que exploram mais o seu potencial estético e de obtenção da geometria desejada, como Capone e Lanzara (2019), Holterman (2018), Jensen, Blindheim e Steinert (2017), Mitov et al. (2019) e Wei e Singh (2017). Entretanto, pode-se tentar melhorar esse aspecto pela alteração de alguns parâmetros geométricos ou por outras estratégias, como a adição de elementos ligantes para conferir rigidez e estabilidade ao material, como

ocorre em Mansoori et al. (2017), que adicionam um polímero de memória de forma ao material em *kerfing*, Bianconi e Fillipucci (2019), que fazem experimentos preenchendo os vazios dos cortes por resina, e Greenberg e Körner (2014), que testam a aplicação de fibra de vidro e resina, além de incluir reforços em madeira para sustentação de áreas frágeis. Em muitos casos também são utilizados elementos auxiliares para converter o material na geometria desejada, como cabos de aço (HOLTERMAN, 2018) hastes metálicas (BORHANI e KALANTAR, 2017), estruturas de madeira (MITOV et al., 2019), faixas de fibra de carbono (GREENBERG e KÖRNER, 2014), entre outros.

Figura 14 - Efeitos das diferenças de forças aplicadas nas amostras em *kerfing*.



(a) diferentes aplicações de força nas amostras e as consequências de deslocamento do eixo de curvatura. Fonte: Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017). (b) deslocamentos de partes das amostras em *kerfing* e os resultados geométricos obtidos. Fonte: adaptado de GURSOY e Ozkar (2015).

Outro inconveniente diz respeito ao fato de que da forma como se apresentam a maioria dos estudos sobre *kerfing* comumente tem-se como base o uso de softwares avançados para simulação, avaliação e geração das informações para fabricação da estrutura. Os softwares são frequentemente paramétricos, utilizados para prever a planificação da geometria e distribuição do padrão de *kerfing* e algumas vezes envolvendo a análise de elementos finitos, que avaliam estruturalmente o material. Pelo número limitado de pessoas que tem acesso e domínio dessas tecnologias, acaba-se por reduzir a adoção da técnica por falta de segurança.

Alguns autores sugerem a possível similaridade de resultados entre o *kerfing* aplicado a materiais diferentes ou de diferentes espessuras, porém sem aprofundar-se nos efeitos e causas das mudanças. Tem-se que materiais diferentes podem resultar em deformações distintas sob mesma carga, enquanto padrões de *kerfing* similares tendem a obter geometrias similares, porém a magnitude e raio da curvatura, rigidez e concentração de tensão serão distintos para cada material (GURSOY e OZKAR, 2015; KALANTAR e BORHANI, 2018). Portanto, carece-se de controle de fato na mudança de materiais e espessuras.

Além disso, Lanzara e Capone (2019) ressaltam a importância de se desenvolver experimentos em diferentes escalas, podendo-se fazer testes em escala menor para depois adaptá-los a tecnologias

construtivas. Porém, levantam a ausência na literatura de registros sobre a influência da espessura do material na possibilidade de curvatura desse por *kerfing*. Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) e Mitov et al. (2019) reconhecem a relevância de se estudar espessuras diferentes visto o comportamento diverso em resistência e rigidez proveniente desse parâmetro. Parte do estudo de Matini e Ramtin (2018) se dedica a isso, comparando determinada geometria por *kerfing* em diferentes espessuras de compensado de madeira, pelo qual se confirma a existência dessas diferenças. O estudo dos autores (2018) sugere que a maior capacidade de comportar forças de deformação da amostra mais espessa poderia ser devido à maior quantidade de camadas do material.

2.2.1.1 Tipos de *kerfing*

Existem diferentes métodos de aplicação de *kerfing* mais adequados a cada ocasião e geometria desejada, podendo o comportamento ser programado pela operação subtrativa. Neste trabalho considerou-se duas subdivisões da técnica: por face de aplicação, que diz respeito ao lado do material no qual são aplicados os cortes, e por padrão de corte, que é referente ao desenho geométrico das incisões.

O *kerfing* apenas de um lado do material deixa parte da sua espessura sem corte, mantém uma face contínua e viabiliza a obter apenas superfícies desenvolvíveis pela flexão ao redor das linhas cortadas, de modo que o material é localmente alongado ou comprimido, porém não permite a distorção da superfície. Esse é o *kerfing* tradicional de marcenaria, que pode ser aplicado por fabricação digital, podendo-se variar o parâmetro de profundidade dos cortes assim como a frequência ou distância entre eles para manipular o raio de curvatura ou a rigidez (KALANTAR e BORHANI, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018; MENGES, 2011; MITOV et al., 2019). Capone e Lanzara, (2019) e Menges (2011) verificam que nesse sistema há concentração de tensão nas extremidades do comprimento dos cortes, o que pode ser amenizado pela variação da profundidade desses. A profundidade e precisão da ferramenta de corte são fatores importantes nessa variação da técnica, o que faz com que seja de difícil aplicação a materiais finos, e ela resulta em um curvamento menor do que é possível pelo corte que ultrapassa a espessura do material (KALANTAR e BORHANI, 2018).

O *kerfing* que é aplicado dos dois lados do material por incisões perpendiculares entre si resulta em uma estrutura que pode fletir e torcer e pela qual é possível configurar uma superfície de dupla curvatura (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019; CAPONE e LANZARA, 2019). Já o tipo de *kerfing* que atravessa a espessura do material é capaz de acomodar movimentos de tração e compressão no sentido perpendicular à força aplicada, dependendo do padrão de corte (MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Há diversos padrões de *kerfing* que atravessam a espessura do material e que podem ser diferenciados de acordo com o formato geométrico dos cortes e tipo de curvatura permitida por esses (CAPONE e LANZARA, 2019; GOMES, 2017; JENSEN, BLINDHEIM

e STEINERT, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019). Pode-se conferir os tipos de *kerfing* por face de aplicação na Figura 15.

Figura 15 - Tipos de *kerfing* por face de aplicação.



Amostras em *kerfing* aplicado a (a) um lado do material, fonte: Menges (2011), (b) dois lados do material, fonte: Bianconni e Filippucci (2019) e (c) através do material, Fonte: Dukta (2019).

Já com relação ao padrão de corte, há diversas variações existentes. Segundo Zarrinmehr et al. (2017a, b) há muitos padrões de *relief cutting* inventados e testados por designers, alguns resultando em respostas mais flexíveis do que outros. Um padrão é constituído pela distribuição de um dado formato ou linha por uma regra específica (GURSOY e OZKAR, 2015), permanecendo partes do material contínuas ao longo de toda a peça. Há que se deixar claro que normalmente quando se trata de padrão de *kerfing* refere-se ao tipo de *kerfing* que ultrapassa a espessura do material, que é o caso deste estudo.

Existem padrões que permitem um eixo de curvamento (curvatura simples) e um eixo rígido e padrões que permitem dois ou mais eixos de curvamento (curvatura dupla ou múltipla), ou eixos com diferentes graus de flexibilidade aparente. *Kerfing* em múltiplas direções resulta em um material que pode ser curvado em diferentes direções também, visto que a direção da linha em *kerfing* indica a direção perpendicular à qual será favorecida a curva, desde que distorções sejam permitidas (KALANTAR e BORHANI, 2018). Há também padrões de corte que permitem a curva em dois sentidos, porém não simultâneos, como é o caso de Mansoori et al. (2019). Conforme mencionado anteriormente, Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) apontam que não é o ato da subtração que confere flexibilidade ao material, mas sim a união de vários fatores, portanto pode-se considerar o sentido dos cortes um indicativo da direção que o material tenderá a fletir, mas sem garantia do movimento ou noção de sua magnitude.

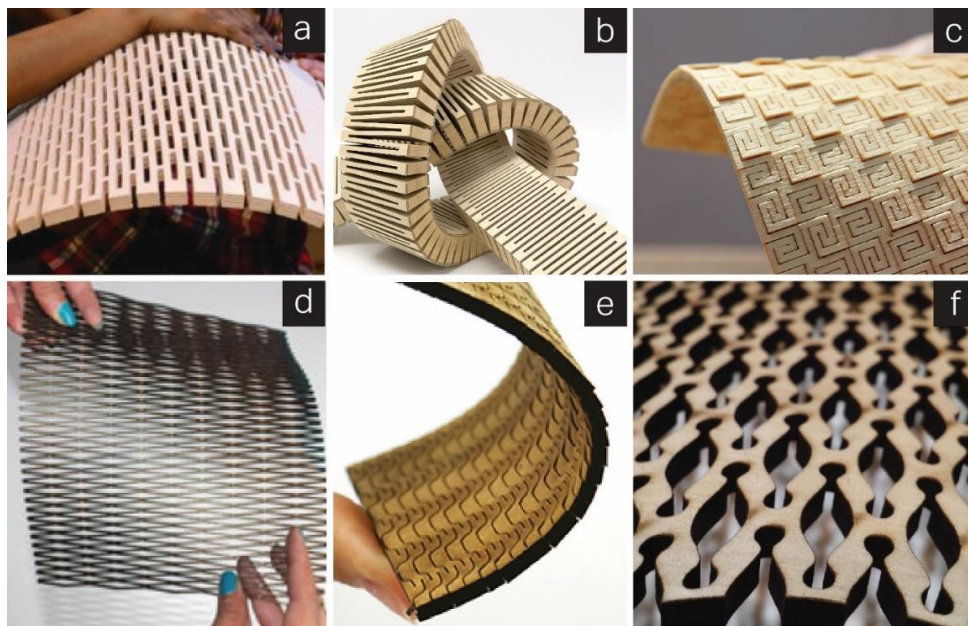
De um modo geral é possível perceber alguns padrões de corte predominantes, como o corte composto por incisões lineares paralelas em série com segmentos perpendiculares ao eixo de curvamento do material (ou pontes) dispostas de maneira desencontrada e que permite curvamento em um sentido apenas (CAPONE e LANZARA, 2019; GREENBERG e KÖRNER, 2014; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018). Esse padrão de corte opera praticamente só em torção e é considerado um dos mais confiáveis, sendo possível inclusive controlar a magnitude do curvamento pela densidade de corte (CAPONE e LANZARA, 2019). Segundo os autores, dependendo da configuração dos cortes,

ainda é possível mover uma das extremidades do material com relação à outra ou possibilitar a compressão e expansão perpendicularmente aos cortes, viabilizando distorções na geometria.

Outra possibilidade são os cortes lineares paralelos com apenas um segmento de continuidade de material perpendicular aos cortes entre duas linhas consecutivas, posicionado nas extremidades transversais do material de modo intercalado. Nesse caso, dependendo de alguns parâmetros, pode-se obter flexibilidade aparente em mais de uma direção (GUTOWSKI, 2017; CAPONE e LANZARA, 2019; GURSOY e OZKAR, 2015). Tem-se, também, os cortes em espirais entrelaçadas que permitem o curvamento em mais de um sentido, a depender do formato-base da espiral e apresentando liberdade de curvamento ao redor de eixos das linhas da espiral. O corte mais comum desse tipo é a espiral Arquimedean (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018; LANZARA e CAPONE, 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a, b), que foi a primeira espiral inventada com esse fim por Dujam Ivanisevic em 2014 (ZARRINMEHR et al., 2017a).

Além dos padrões de corte apresentados, que são os mais recorrentes nos estudos, também constam na literatura referências a outros padrões que podem ser considerados variações dos padrões básicos. Alguns exemplos são: cortes em formato de pino de boliche (GOMES, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019), em onda (GOMES, 2017; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017), em losangos (MANSOORI et al., 2019), entre diversos outros. A Figura 16 ilustra alguns dos tipos de *kerfing* e seus movimentos.

Figura 16 - Alguns padrões de *kerfing*.



Kerfing do tipo (a) cortes lineares paralelos em série com pontes dispostas de maneira desencontrada. Fonte: Greenberg e Körner (2014), (b) cortes lineares paralelos com apenas uma ponte entre duas linhas consecutivas nas extremidades transversais do material de modo intercalado. Fonte: Dukta (2019), (c) espirais entrelaçadas, Fonte: Kofactorlab (2019), (d) cortes em losango através do material, Fonte: Mansoori et al. (2019) (e) formato onda através do material, Fonte: Trotec (2019), (f) pino de boliche através do material. Fonte: Porterfield (2019).

2.2.1.2 Abordagens dos estudos sobre *kerfing*

Foram observadas algumas abordagens mais recorrentes nos estudos sobre esse tema, como aquelas que investigam variações nos padrões ou parâmetros geométricos dos cortes, as que buscam uma aplicação específica para a técnica e algumas voltadas à otimização do padrão de corte voltada a uma geometria-alvo.

Com relação aos estudos que investigam variações nos padrões ou parâmetros geométricos dos cortes, foram encontrados estudos que comparam diferentes padrões visando a escolha do mais adequado à aplicação desejada. Gutowski (2017) testa o *kerfing* apenas de um lado do material e constata baixa magnitude e irreversibilidade da curva, adotando cortes através da espessura e com conexões apenas nas extremidades. Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) concluem que padrão de *kerfing* que se comporta mais próximo ao tecido é o de espirais (dentre o circular, em onda e cortes lineares). Matini e Ramtin (2018), contudo, testam a flexão por *kerfing* em padrão espiral e linear, preferindo o segundo por comportar maior flexão em um sentido, frente ao primeiro de flexão dupla e uniforme, porém menor. Lanzara e Capone (2019) também obtém curvatura dupla para o padrão em espiral, frente à simples do pino de boliche.

Jensen, Blindheim e Steinert (2017) detectam por testes um padrão que não permite flexão (em formato “H”), os que permitem flexão em uma direção (cortes retilíneos, corte em “Y” com e sem remoção de material e corte em losango), em duas direções não simultâneas (espirais e em linhas perpendiculares entre si), e em dois sentidos simultâneos (cortes em triângulos circunscritos e em “Y” com extremidades em flecha). Percebem que o último obtém baixa porosidade e curvatura contínua, os cortes lineares e em losango toleram compressão e tração, o espiral obteve efeito escalonado e o de triângulos circunscritos efeito abrupto.

Gomes (2017) chega as seguintes conclusões: o corte em “Y” não resulta em muita flexibilidade aparente do material; o corte em losangos tem ao contrário, porém com baixa resistência; o de espirais tem fabricação difícil e tende a romper, assim como o hexagonal e em linhas formando triângulos; o formato de folha permite o curvamento e resiste à torção; o retilíneo é resistente e evita a torção do conjunto mas é pouco flexível; o corte em onda teve resistência e flexibilidade aparentes médias, curvando-se a 90° e o pino de boliche foi o mais flexível, fletindo a 270° e resistindo à torção, porém com baixa resistência. Já Louth (2017) testou a fabricação de uma superfície de dupla curvatura em alumínio por padrão de corte *kerfing* linear considerando a capacidade de curvatura de raio de cada padrão, verificando conflitos por torção em pontos de curvatura extrema.

Há também os estudos que incluem observações sobre parâmetros geométricos de corte ou que tem como objetivo sua investigação frente ao comportamento do material. Diversos autores estudam a densidade de cortes, concordando ao concluir que quanto mais próximos estiverem maior a capacidade de curvamento do material (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GOMES, 2017; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a; WEI e SINGH, 2017). Lanzara e Capone (2019) e Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017)

apontam que o curvamento também é ampliada pelo entrelaçamento dos cortes. No caso do padrão linear, Matini e Ramtin (2018) e Gutowski (2017) percebem que a redução do número de segmentos perpendiculares ao eixo de rotação do material resulta em maior deformação. Para Wei e Singh (2017), quanto maior a largura dos cortes mais flexível o material, porém para Matini e Ramtin (2018) cortes finos obtém uma curva mais uniforme. Chen et al. (2018), por sua vez, verificam que arredondar os cantos dos cortes evita a fratura nessas posições, pela redução de tensão localizada (ABLAT e QATTAWI, 2019).

Além desses parâmetros, Mitov et al. (2019) observam que o processo de dobra é facilitado pelo alinhamento do *kerfing* com as *rulling lines* da superfície. Holterman (2018) levanta a importância do tamanho do vão e tipo de apoio, provando que vãos iguais com apoios distintos resultam em curvaturas diferentes. Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) inclui considerações sobre aspectos da força aplicada, que afeta a simetria da cura, e testes variando espessuras, notando que quanto mais espesso mais rígido o material em *kerfing*. Matini e Ramtin (2018) testa o *kerfing* em multilaminado de madeira de três espessuras, obtendo maior deslocamento e menor resistência à deformação na amostra de menor espessura e concluindo que a amostra mais espessa tem maior capacidade de flexão, devido ao maior número de camadas de madeira, o que aumentaria a capacidade de rotação dos segmentos do padrão. Já Bianconi e Fillipucci (2019) testam diferentes tipos de madeiras com *kerfing* e seu comportamento de flexão. No caso de Louth et al. (2017) testou-se diferentes meios de distribuição de cortes lineares na superfície, constatando que pontos de curvatura extrema não eram possíveis de serem obtidos por esse padrão.

Ablat e Qattawi (2019) buscam simplificar a dobra de chapas metálicas por *origami-based sheet metal*, que se baseia em cortes em materiais metálicos. Avaliam que quanto maior a largura dos cortes menor a tensão resultante e a força necessária para a dobra, reduzindo a chance de contato das faces do material e aumentando o raio de dobra, e que a rigidez aumenta junto com a largura de material mantido (com relação à largura total). Afirmando que a distância entre cortes deve ser tal que evite a interferência das zonas de tensão das extremidades dos cortes. Apontam também que o padrão de desenho que apresentou menor tensão e resistência à dobra foi aquele no qual ocorreu torção além de flexão.

Alguns estudos ainda relacionam o desenho dos padrões de corte ao comportamento desses sob forças de deformação de um modo geral, não se adequando a um padrão de corte apenas, mas configurando uma lógica aplicável a qualquer padrão. Em Lanzara e Capone (2019) é levantada a hipótese de que as direções de alinhamento das áreas de corte (zonas de vácuo) definam os sentidos principais e secundários de curvamento do material, o que confirmam por experimentos e exemplos externos. Já Gursoy e Ozkar (2015) investigam as regras geométricas de geração dos padrões de corte e de manipulação das amostras (esforços de flexão, compressão e torção) para tecer relações entre essas e avaliar as geometrias obtidas. Dentre suas constatações, tem-se que sob tração as amostras com geometrias cortadas ampliaram a área dessas e que a deformação dos cortes seguiu a orientação desses.

No que tange os trabalhos que buscam aplicar o *kerfing* a um fim específico, observou-se uma predominância de estudos que avaliam a fabricação de estruturas ou elementos arquitetônicos. O trabalho de Matini e Ramtin (2018) visa a seu uso em estruturas elasto-cinéticas para proteção solar da fachada ou cobertura de edificações tipo *bending-active*, nas quais a aplicação de força em pontos específicos da estrutura faria com que ela tendesse a se converter em determinada geometria. Mansoori et al. (2019), com foco em componentes arquitetônicos de escalas macro, testam estruturas que mudem de forma a partir de estímulo de temperatura pela união de material em *kerfing* e um polímero com memória de forma responsivo à temperatura. Borhani e Kalantar (2017) e Kalantar e Borhani (2018) buscam a criação de fôrmas de curvatura dupla para concreto a partir de madeira compensada em *kerfing*.

O trabalho de Holterman (2018) investiga a adoção de *kerfing* em painéis acústicos que mudem de configuração geométrica para adaptar-se a diferentes situações acústicas. Greenberg e Körner (2014) aplicam o *kerfing* em piso, paredes e cobertura de um pavilhão de multilaminado de madeira, enquanto Louth et al. (2017) tentam aplicá-lo na cobertura de um pavilhão, feita de alumínio. Já Mitov et al. (2019) utilizam a técnica para fabricação de um painel arquitetônico.

Outras utilizações recorrentes são as voltadas a mobiliário, como nos trabalhos de Gomes (2017), que desenvolve uma escrivaninha, Gutowski (2017) que tenta fabricar uma cadeira e acaba optando por uma luminária e Lanzara e Capone (2019), que desenvolve luminárias e uma base para banquetas. Há também alguns trabalhos voltados ao design de objetos, como é o caso do trabalho de Jensen, Blindheim e Steinert (2017), que investiga o *kerfing* em um componente em sistemas de interface entre máquinas e humanos. Já Wei e Singh (2017) utilizam a técnica para desenvolver um dispositivo de medição de curvas de objetos existentes para fabricação de acessórios. No caso de Booth e Goldsmith (2016), é fabricado um mostruário portátil pela aplicação de *kerfing* em acrílico.

Cabe salientar que muitos estudos exploram o caráter dinâmico do *kerfing*, propondo estruturas que mudam de forma ao longo de seu uso, como: Jensen, Blindheim e Steinert (2017), Holterman (2018), Borhani e Kalantar (2017), Mansoori et al. (2019) e Matini e Ramtin (2018). Outro aspecto que é importante destacar são os desafios encontrados nos casos em que o *kerfing*, além de viabilizar a obtenção da forma desejada, teve caráter estrutural, como acontece em Gomes (2017), Capone e Lanzara (2019), Gutowski (2017), Matini e Ramtin (2018), Borhani e Kalantar (2017) e Greenberg e Körner (2014).

Em Gomes (2017), constatou-se a melhor performance do material nas situações em que os cortes estavam perpendiculares ao sentido da força, ficando as estruturas instáveis quando apoiadas perpendicularmente ao sentido dos cortes. Capone e Lanzara (2019) identificaram o potencial do *kerfing* para luminárias e a falta de resistência para aplicação a uma base de banquetas. Esse foi o mesmo problema de Gutowski (2017), no qual houve problemas estruturais ao obter um encosto para cadeira por *kerfing*, que não suportou o peso de uma pessoa apoiada, migrando também o autor para o desenho de luminárias.

Matini e Ramtin (2018), para obter um elemento articulado com rigidez e resistência a forças laterais além de flexibilidade aparente, optaram por materiais mais espessos. Solução similar foi adotada por Borhani e Kalantar (2017), para confecção de fôrma de concreto em madeira compensada com *kerfing*, necessitando essa ter flexibilidade aparente (para formar curvas) e rigidez simultânea (para que se tenha controle da deformação), optando, por isso, por um material espesso para suportar o peso do concreto, o que poderia limitar o raio mínimo permitido pela membrana. Greenberg e Körner (2014), que desenvolvem pavilhão curvo em multilaminado de madeira com *kerfing*, apontam que a técnica enfraquece o material em até 60% com relação ao painel sem cortes, gerando falhas estruturais.

Algumas estratégias são adotadas para melhorar a performance estrutural dos materiais em *kerfing*, como por adição de elementos ligantes que confirmam rigidez e estabilidade ao material, como no estudo de Mansoori et al. (2017), no qual se adiciona um polímero de memória de forma ao material em *kerfing*, Bianconi e Fillipucci (2019), que preenchem os vazios dos cortes por resina, e Greenberg e Körner (2014), que testam a aplicação de fibra de vidro e resina termofixa ao material em *kerfing*, além de incluir reforços externos em madeira para sustentação das áreas frágeis de seu pavilhão.

Já no caso dos trabalhos que abordam a otimização do padrão de corte a partir de uma geometria-alvo, tem-se que a geometria final desejada é fixa, buscando-se o método de intervenção no material que garantirá o seu alcance. Foram identificadas duas tendências nessa investigação. Uma delas é o estudo da distribuição dos cortes no material, que avalia a que melhor aproxima a geometria desejada. A outra é a variação topológica (ou diferenciação) dos cortes, na qual se alteram os parâmetros geométricos de maneira localizada para obter características de flexibilidade aparente de acordo com a curvatura desejada para cada porção da geometria. Os dois aspectos dizem respeito à otimização da técnica de *kerfing*, podendo ter objetivos tanto de melhor aproximação da geometria-alvo quanto da melhor performance do material, ou seja, da obtenção de uma estrutura rígida e resistente, porém flexível o suficiente para que seja capaz de adquirir a forma desejada.

Alguns trabalhos buscam sistematizar esses processos para obtenção de superfícies curvas a partir de materiais planos, como é o caso de Zarrinmehr et al. (2017a) e Lanzara e Capone (2019). O método proposto pelo primeiro baseia-se na geração do padrão de corte em espirais a partir de malhas poligonais, obtendo versões não regulares do padrão original por *remeshing* e efetuando o controle dos parâmetros geométricos do padrão de maneira localizada por uso de algoritmo. O estudo difere dos demais pela geração de padrões de corte com formatos adaptados à malha poligonal, enquanto os outros partem de um padrão de corte de geometria definida, recorrendo eventualmente apenas a mudanças de seus parâmetros.

Lanzara e Capone (2019) e Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) propõem métodos similares entre si em que partem de geometrias-alvo que são inseridas em software paramétrico e planificadas, extraindo-se linhas ou malhas de curvatura para aplicação de um padrão de corte sobre essas (configurando matrizes uni ou bidirecionais), que foi previamente analisado com relação à curvatura que permite. No primeiro caso,

analisa-se os padrões de corte com relação à curvatura que permitem, criando uma lógica de zonas de vácuo. No caso do estudo de Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017) inclui-se a manipulação dos parâmetros de tamanho e distância entre cortes de maneira localizada, separando as áreas côncavas e convexas por linhas de atração. Técnica similar é estudada por Holterman (2018), que apresenta um algoritmo para geração de padrão de corte em espiral e controle local de densidade, largura dos cortes e número de entrelaçamentos pela criação de pontos de atração, além de manipulação da curvatura por alteração na direção da malha de distribuição do padrão.

Já nos trabalhos de Mitov et al. (2019) e Greenberg e Körner (2014), dividem-se as superfícies em faixas desenvolvíveis seguindo diferentes critérios e distribuindo o padrão de *kerfing* (linear) nas linhas de curvatura da superfície. No caso do estudo de Mitov et al. (2019) são utilizadas faixas paralelas e o com *kerfing* em apenas um lado do material, enquanto no caso de Greenberg e Körner (2014) se utiliza o *kerfing* linear através do material, e a planificação parte das linhas geodésicas da superfície, tendo cada painel uma única curvatura principal. Ambos trabalhos fazem uso de testes manuais para definição do espaçamento ideal dos cortes para cada raio de curvatura e adotam os valores encontrados. Greenberg e Körner (2014) também fazem análises estruturais de painéis com diferentes parâmetros geométricos de corte, transferindo os dados para o modelo de análise do conjunto.

O caso do estudo de Gutowski (2017) também se enquadra nessa categoria apesar dos testes serem empíricos, uma vez que o dado de entrada do projeto era um encosto curvo para cadeira, sendo o padrão, parâmetro geométrico e disposição radial das linhas de corte investigados fisicamente com fim geométrico. No caso do trabalho de Matini e Ramtin (2018) foi utilizado um processo intermediário entre o convencional e o invertido, tendo-se como objetivo a obtenção de uma geometria de dobra em linha curva que separa as faces côncava e convexa, adquirindo a superfície característica de flexão em dupla curvatura. A distribuição do padrão foi feita do tipo tentativa e erro, baseando-se na geometria das rugas e comportamento observado na pele de animais, e testando a aplicação de dois padrões diferentes. A superfície foi simulada em FE e validada por testes físicos em multilaminado, fazendo-se ajustes nos parâmetros geométricos dos cortes para aprimorar a deformação.

2.2.2 *Lamina Emergent Mechanisms*

Foram encontrados alguns estudos que tratam da técnica que origina os *Lamina Emergent Mechanism*, ou LEMs, que são mecanismos fabricados a partir de materiais planos capazes de executar movimentos que fazem com que eles emergem do plano de fabricação (JACOBSEN et al., 2010; JACOBSEN, HOWELL e MAGLEBY, 2007). Assim, esses mecanismos funcionando como junções ou articulações. Segundo Jacobsen et al. (2010) através de topologia simples, obtida por métodos de fabricação comuns a materiais planos, esses mecanismos

executam movimentos mecânicos complexos sendo, conforme Nelson et al. (2016) seu movimento primário similar a uma dobra. Na Figura 17 tem-se uma ilustração do funcionamento dos LEMs, enquanto na Figura 18 um exemplo de aplicação de uma matriz dessas articulações.

Figura 17 - Ilustração de LEMs simples e em matriz e de algumas possibilidades dele.

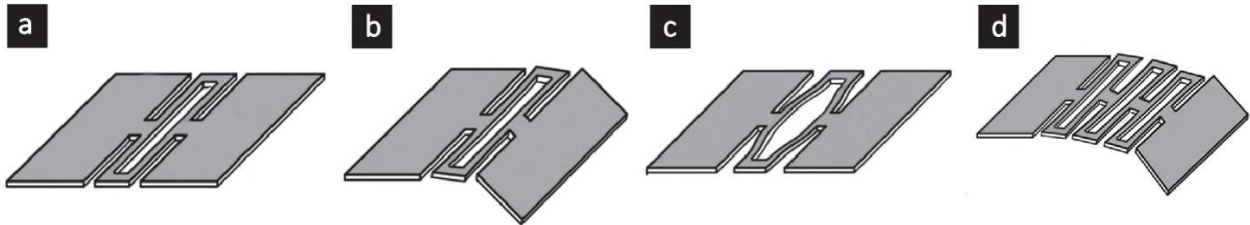
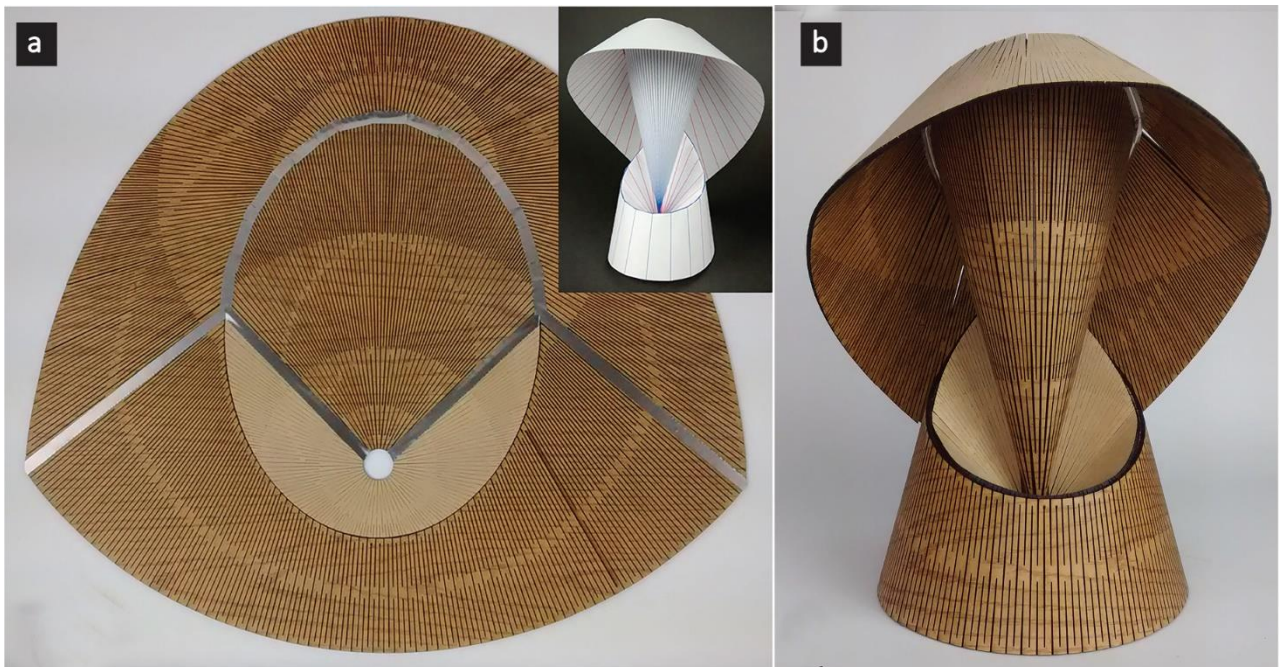


Ilustração de (a) um material cortado em formato configurando um LEM; (b) o movimento de dobra possível a partir dele; (c) movimento de tração ou alongamento que também é possível em alguns casos e pode ser desejado ou não; (d) Matriz de LEMs. Fonte: da autora (2021).

Figura 18 - Exemplo de aplicação de matriz de LEMs.



Em (a) o material com cortes planejado e em origami e em (b) o material na configuração tridimensional. Fonte: adaptado de Nelson et al. (2016).

O movimento dos LEMs se dá em parte pela deflexão dos membros flexíveis do mecanismo, o que faz com que possam ser incluídos no grupo dos *compliant mechanisms* (HOWELL, 2001 apud JACOBSEN et al., 2010; NELSON et al., 2016; NELSON, 2018; WILDING, 2011). Por sua capacidade própria de flexão desses mecanismos ele acabam por se assemelhar aos mecanismos encontrados na natureza. Devido às vantagens do uso dos *compliant mechanisms*, como baixo custo, miniaturização e performance, esses tem sido bastante investigados (HOWELL, MAGLEBY e OLSEN, 2013). Pesquisadores buscam reduzir suas falhas e custos de

fabricação, melhorar a precisão etc., contexto no qual os LEMs surgem como alternativa de redução de partes, tamanho e custo (GREENBERG 2012).

Jacobsen et al. (2010), Greenberg (2012), Nelson (2016), Nelson et al. (2018), Delimont (2014) e Delimont, Magleby e Howell (2015) apresentam semelhanças entre os sistemas de origami e as LEMs. A primeira pode servir de inspiração para a última, visto que contém informações sobre estruturas e mecanismos compactos que são configurados volumetricamente para o uso (NELSON, 2018). Delimont (2014) define uma dobra substituta (*surrogate fold*) como a alteração na geometria de materiais espessos para reduzir a rigidez localizada e permitir movimentos equivalentes à dobra sem que haja fratura. O autor (2014) afirma que movimentos adicionais que resultam das dobras substitutas podem ser desejáveis ou não, ou até mesmo combinados entre si, sendo o tipo mais comum o que atinge a deflexão por torção dos elementos. Segundo o autor (2014), nenhuma articulação até agora desenvolvida para materiais espessos apresenta a liberdade de rotação do origami (360°) sem a ocorrência de movimentos indesejados. Para Delimont, Magleby e Howell (2015) as dobras substitutas alteram as condições de borda do material nos locais de articulação, mudando suas propriedades aparentes localmente, o que também pode ser feito por alteração na espessura do material, reduzindo sua rigidez.

Algumas das vantagens da adoção dos LEMs são a fabricação a partir de materiais planos, sendo as tecnologias, materiais e escalas de aplicação vastos. Outras vantagens são a redução de custos de produção, o armazenamento e transporte compactos, o aspecto monolítico que reduz as partes, simplifica a fabricação e elimina a folga e desgaste de fricção, reduz o peso da estrutura, facilita a reciclagem e precisão, elimina a montagem e tem design mais integrado por incorporar os mecanismos (GREENBERG 2012; JACOBSEN et al., 2010; JACOBSEN, HOWELL e MAGLEBY, 2007; NELSON et al., 2016). Outra vantagem é que tem fabricação e desempenho superiores às junções compostas por mais de um elemento (JACOBSEN, HOWELL e MAGLEBY, 2007).

O processo de dobra e a colapsibilidade pode ser interessante em diversas fases do processo: na fabricação, pré-tensionamento do material, montagem, empacotamento, uso ou armazenamento (GREENBERG, 2012). Jacobsen et al. (2010) elencam alguns usos possíveis para os LEMs: mecanismos de espaço limitado (como eletrônicos e equipamentos médicos), equipamentos que necessitam de transporte compacto para depois serem expandidos (como equipamentos aeroespaciais), aplicações que tem fabricação limitada (como microeletrônicos). Segundo Nelson et al. (2016) as áreas de automobilística, construção de barcos, arquitetura, mobiliário e vestuário são outras beneficiadas pela possibilidade de transformação de materiais planos em superfícies complexas, além de facilitar o armazenamento de: equipamentos portáteis para uso externo, abrigos de emergência, painéis flexíveis funcionais ou decorativos, superfícies mutáveis etc. Por permitirem a aparente mudança de certas propriedades do material, as matrizes de LEMs também viabilizam, por exemplo, estruturas flexíveis e condutoras de eletricidade (DELIMONT, MAGLEBY e HOWELL, 2015; NELSON et al. 2016).

Os mecanismos tipo LEMs podem se basear em diferentes meios para interferir na flexibilidade aparente do material. Esses meios são: alteração geométrica (largura, espessura ou comprimento de segmentos ou seção transversal), modificações nas propriedades do material (como materiais com propriedades heterogêneas no espaço, modificação das condições de borda pela mudança da fixação ou das condições da carga aplicada) ou pela criação de componentes híbridos. No que se refere aos aspectos geométricos há alteração de rigidez, interferindo na flexibilidade aparente (JACOBSEN et al., 2010).

O movimento complexo verificado nas LEMs se deve a uma combinação de movimentos fundamentais efetuados pelos seus segmentos. Quanto às condições carga, podem incorrer em flexão, tensão axial, torção ou uma combinação desses, sendo que normalmente a flexão do conjunto do material resulta em outros esforços. A combinação desses pode resultar em mudança de rigidez: aplicando tensão axial simultaneamente à flexão no material tem-se uma resposta de maior rigidez para tração e maior flexibilidade para compressão. Para transformar LEMs em geometrias tridimensionais pode-se utilizar a torção do material pela aplicação de momento no eixo longitudinal dos segmentos. Pode-se também, ampliar esse efeito reduzindo sua altura, considerando essa a menor dimensão entre espessura e largura, e que quanto maior a largura menor a rotação e a tensão máxima de cisalhamento suportada (JACOBSEN, HOWELL e MAGLEBY, 2007).

Segundo Nelson et al. (2016), as matrizes de LEMs podem ser aplicadas a diversos materiais por tecnologias de fabricação aditiva e subtrativa, sendo para materiais planos adequadas as baseadas em subtração (como fresadoras e equipamentos de corte laser). Porém, aqueles com uma maior relação entre o limite de escoamento e o módulo de Young tem melhor resposta de flexibilidade (JACOBSEN, HOWELL e MAGLEBY, 2007).

Algumas articulações permitem um movimento simples de curvamento, como a *Simple Reduced Area*, porém facilitam a alta concentração de tensão nos elementos em flexão, reduzindo a capacidade de curvamento do conjunto. Por outro lado, junções que tem seus segmentos paralelos ao eixo de rotação, baseando-se na torção desses, tem a vantagem de permitir altas deflexões do conjunto, manter a rigidez constante, e reduzir a tensão na articulação, porém são mais suscetíveis a movimentos parasíticos em compressão e tração, que geram flexão desses elementos. Essa suscetibilidade aumenta com o aumento do comprimento dos segmentos em torção, apesar de assim também se obter maior ângulo de curvamento do conjunto. Há também uma tendência de que quanto menor a largura das articulações mais precisa a dobra obtida, mas reduz-se a resistência à compressão e tração, de modo que articulações desenhadas para resistir geralmente tem largura maior e, como consequência, um centro de rotação instável. Outro movimento que pode ser desejado em uma articulação é a flexão lateral, porém, é difícil de se obtê-la sem que se permita a torção do conjunto (DELIMONT, 2014).

Greenberg (2012) ressalta que é importante que se saiba as características de carga que o LEM será submetido para escolher o material, a espessura e o método de fabricação adequado. Além disso, segundo o autor (2012) há que se considerar o comportamento desejado para selecionar a articulação adequada, e

possivelmente otimizá-la, atingindo o movimento e requisitos esperados de rigidez em flexão, torção etc. No tangente à obtenção de superfícies tridimensionais, há que se prestar atenção à deflexão que essas solicitam para definir a tensão que o material sofrerá e evitar falhas (NELSON et al., 2016).

A limitação do uso de LEMs se dá por falta de compreensão de seus mecanismos, de exemplos de uso e de tipos disponíveis. Ainda, tem-se o desafio de se conduzir os movimentos desejados pela junção e ao mesmo tempo limitar os não desejados, necessitando-se flexibilidade em uns sentidos e rigidez em outros, tornando-se difícil a seleção dos modelos mais adequados (WILDING, 2011). Delimont (2014) acrescenta que ao conhecer o funcionamento dos LEMs, seus elementos e as respostas desses e do conjunto aos esforços, pode-se combiná-los visando o comportamento desejado, tanto pela criação de novos tipos quanto pela composição em matrizes.

2.2.2.1 Tipos de *Lamina Emergent Mechanisms*

A junção Groove Joint é uma das mais simples e consiste na redução da espessura do material em determinadas áreas, tem centro de rotação estável durante o movimento de flexão, resiste à compressão e tração e a parte sem corte funciona de maneira rígida e a (DELIMONT, 2014; DELIMONT, MAGLEBY e HOWELL, 2015; NELSON et al., 2016). A *Simple Reduced-Area Joint* também é simples e de fácil fabricação e modelagem, porém não atinge altas deflexões, tem centro de rotação estável e resiste à torção (DELIMONT, MAGLEBY e HOWELL, 2015).

Jacobsen et al. (2009) apresentam a junção *Lamina Emergent Torsional* (LET) em suas duas variantes, *Inside* LET e *Outside* LET. A LET é composta por elementos paralelos ao eixo de rotação do conjunto que funcionam sob torção, e os elementos que os conectam que sofrem flexão no curvamento do conjunto, sendo que o quanto o movimento de flexão colaborará para a flexão do conjunto depende de sua rigidez. Essa configuração reduz a tensão localizado na junção, visto que, por ser composta por mais de um elemento sob torção, o movimento total de rotação da peça é a soma dos movimentos menores de cada segmento. Esse tipo de junção consegue atingir alta rotação fora do plano, porém não é resistente a movimentos parasíticos fora do seu eixo de rotação, sendo adequada para situações em que esses movimentos são aceitáveis. Delimont, Magleby e Howell (2015) e Nelson et al. (2016) acrescentam que a *Inside* e *Outside* LET são sujeitas à torção, cisalhamento, flexão lateral, tração, compressão, cisalhamento e seu centro de rotação carece de estabilidade, sendo a diferença que sob grandes esforços axiais a primeira tem comportamento mais rígido que a segunda, devido a, em altas deformações, os elementos antes em torção ficarem em tração.

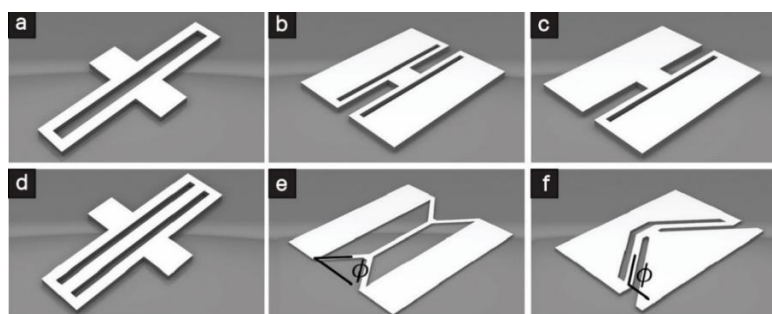
Pelo o que se notou nos trabalhos encontrados posteriores à Jacobsen et al. (2009) a LET é uma referência para a criação de outros tipos de junções, que visam principalmente reduzir os efeitos parasíticos dessa. Nesse contexto, Wilding (2011) cria três tipos de LEMs: *Inverted* LET (I-LET), *Tension* LET (T-LET) e *Inverted Tension* LET (IT-LET), que apresentam o inconveniente de ocupar uma grande área e ter centro de

rotação instável. O mesmo problema é encontrado em algumas junções criadas por Delimont (2014), que apresenta: *Bending-Orthogonal*, *Mixed Tension Resistant*, *Torsion-Parallel*, *Mixed Compression Resistant*, *Inverted Bending-Orthogonal*, *Torsion-Parallel with Buckling Member* e *Mixed Lateral Bending*.

A junção Bending-Orthogonal pode ser considerada uma variante da *Simple Reduced Area*, com vantagens iguais à segunda, tem um elemento em flexão perpendicular ao seu eixo de rotação e a seção transversal define sua resistência à tração e compressão. Já a *Mixed Tension Resistant* tem elementos em ângulo com o eixo de rotação e apresenta maior resistência à tração do que compressão (quando em compressão há flambagem de alguns elementos). Na *Torsion-Parallel* os elementos são paralelos ao eixo de rotação, sofrendo apenas torção quando do momento aplicado e tendo maior resistência à compressão e tração e centro de rotação mais estável que a LET. A *Torsion-Parallel Joint with Buckling Member* apresenta flexibilidade em flexão e resistência à compressão e tensão, devido à adição de um elemento central que resiste à flambagem (DELIMONT, 2014).







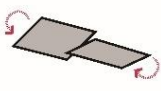


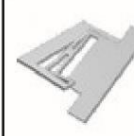
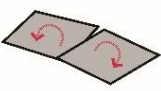


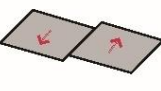

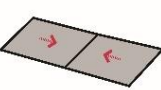



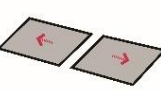



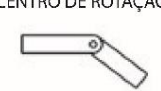
Pelo apontamento dos trabalhos pode-se concluir que no caso de intencionar-se curvar ou dobrar materiais com espessura o esforço mais eficiente, preciso e que apresenta menor tensão para o material seria o movimento de torção dos segmentos das articulações, que é explorado pela articulação do tipo LET. Os esforços de flexão, tração e flambagem podem ser considerados problemáticos e os materiais apresentam maior resistência a esses movimentos de um modo geral. Assim, articulações que posicionam os segmentos em torção (que pode ser obtido pelo paralelismo entre eles e o eixo de rotação da estrutura) seriam mais eficientes ao movimento de flexão do material e obtenção de aparente flexibilidade. Com relação a esses segmentos, identifica-se uma possibilidade de exponenciar a capacidade de flexão do material pelo aumento no comprimento dos segmentos em torção e pela redução da sua largura, o último fator também podendo contribuir para a maior precisão da dobra do material. Porém, a manipulação desses parâmetros pode resultar em perda excessiva de rigidez do conjunto e reforço da possibilidade de movimentos indesejados (parasíticos) na estrutura. Para melhor compreensão algumas das LEMs estão ilustradas na Figura 19 e na Figura 20 os esforços sofridos por alguns tipos de LEMs.

Figura 19 - Alguns tipos de LEMs existentes.



Junções tipo (a) Outside LET, (b) Inside LET, (c) Torsion Paralell, (d) Torsion Paralell with Buckling Member, (e) Mixed Tension Resistant e (f) Mixed Compression Resistant. Em (e) e (f) ϕ equivale o ângulo de inclinação das linhas de corte. Fonte: adaptado de Nelson et al. (2016).

Figura 20 - Esquema dos esforços sofridos por cada tipo de LEM.

	GROOVE JOINT 	SIMPLE REDUCED AREA 	OUTSIDE LET 	INSIDE LET 	I-LEJ 	T-LEJ 
TORÇÃO 						
FLEXÃO LATERAL 						
CISALHAMENTO 						
COMPRESSÃO 						
TRAÇÃO 						
ALTAS DEFLEXÕES 	BAIXAS DEFLEXÕES	BAIXAS DEFLEXÕES				
ESTABILIDADE DO CENTRO DE ROTAÇÃO 			INSTÁVEL	INSTÁVEL	INSTÁVEL	INSTÁVEL

Quadro com alguns tipos de LEMs existentes e como elas respondem aos esforços mecânicos. Fonte: adaptado de Delimont, (2014).

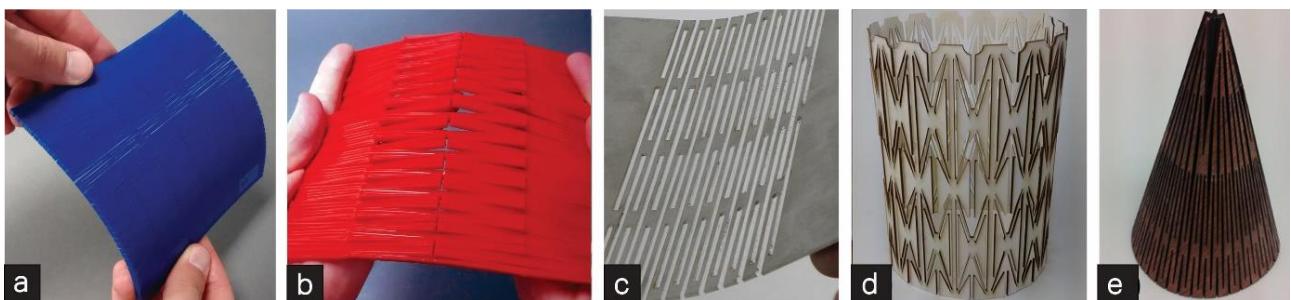
A distribuição de LEMs em rede resulta em uma matriz emergente de lâmina (Nelson et al., 2016). As matrizes consistem em painéis nos quais as junções (geometrias) são distribuídas ao longo do eixo de rotação (em paralelo) ou no sentido de afastar do eixo (em série), ou ambos, e são adaptáveis a diversas escalas (DELIMONT, 2014; NELSON et al., 2016; NELSON, 2018). Quando as LEM's são dispostas em matriz, os ângulos de deflexão do conjunto são calculados a partir do ângulo de deflexão que cada unidade de articulação permite (NELSON et al., 2016).

As matrizes de LEMs adquirem a possibilidade de movimento muitas vezes maior do que a permitida por cada elemento individualmente. Quando as articulações são combinadas em serie a deflexão máxima é dobrada, porém se perde a estabilidade do centro de rotação, enquanto quando combinadas em paralelo resistem mais ao movimento, sendo necessário mais força para movimentá-lo, porém resistindo mais à torção e flexão lateral também. Além disso, as matrizes de articulações permitem a obtenção de flexibilidade em materiais espessos que normalmente não tem comportamento flexível (DELIMONT, 2014).

As matrizes podem, ainda, ser consideradas um material modificado ao invés de um mecanismo, visto que são fabricados a partir de uma única peça e podem alterar certas propriedades aparentes de um material (em geral a rigidez de flexão fora do plano), resultando em alta deformação elástica, o que normalmente não é possível a partir do material-base. As matrizes funcionam a partir da torção ou flexão de seus elementos, de modo que se pode compor com elementos sob os esforços para que o conjunto realize determinado movimento, combinando os limites elásticos de cada unidade. A combinação de LEMs iguais ou diferentes gera diferentes matrizes que atingem alto movimento elástico, sendo aplicáveis à obtenção de superfícies desenvolvíveis e de dobras similares em materiais espessos. Pela manipulação dos parâmetros dos LEMs pode-se obter comportamentos diferentes para o material no qual eles foram aplicados (NELSON, 2018).

As matrizes são capazes de obter superfícies que conseguem se mover entre a posição plana e tridimensional sem ceder, porém, elas tendem a retornar à posição plana, sendo necessário utilizar elementos externos caso se deseje mantê-las na posição tridimensional. Pelo uso de matrizes de LEMs é possível obter uma aproximação de superfícies tridimensionais desejadas, porém não resulta no aspecto suave de uma curva. A redução da tensão na superfície pode ser obtida pelo alinhamento das LEMs às *rulling lines* das superfícies. Isso também faz com que a estrutura tenda a se curvar em uma determinada direção, visto que nas junções o movimento em um eixo apresenta maior resistência do que no outro, o que pode ser utilizado para a manipulação de movimento do material (NELSON et al., 2016). Na Figura 21 se observam alguns materiais com aplicação de matrizes de LEMs.

Figura 21 - Exemplos de matrizes de LEMs.



Matrizes de LEMs aplicadas a diferentes materiais: em acrílico (a) com flexão unidirecional e (b) com flexão bidirecional, (c) em aço inoxidável, Fonte: adaptado de Nelson (2018), (d) e (e) em MDF. Fonte: adaptado de Nelson et al. (2016).

2.2.2.2 Abordagens dos estudos sobre *Lamina Emergent Mechanisms*

A partir das análises dos estudos sobre esse tema, notou-se a predominância de abordagens sobre variações nos padrões ou parâmetros geométricos de corte. Alguns trabalhos, entretanto, buscam a compreensão do funcionamento dos LEMs e alguns tem por objetivo a obtenção de uma geometria-alvo, adequando o padrão de corte para isso.

Um exemplo de investigação de variação nos padrões ou parâmetros geométricos de corte é o trabalho de Delimont (2014), que propõe novas LEMs por alteração em alguns parâmetros das existentes. Apresenta composições de junções do tipo *dual-segment compliant* que englobam a alteração do ângulo de elementos de articulações existentes, buscando assim a manipulação da resistência à tração e compressão. O autor (2014) verifica que aqueles que conectam duas partes rígidas, quando inclinados de 0 a 90° (0° seria perpendicular ao eixo de rotação, funcionando em flexão, e 90° seria paralelo ao eixo de rotação, funcionando em torção) resistem mais à tração do que à compressão, enquanto articulações entre 90 e 180° (sendo 180° paralelo ao eixo de rotação), o contrário. O trabalho também apresenta exemplos de matrizes de articulações do tipo e os efeitos colaterais da disposição em matriz. Trabalho de abordagem similar é desenvolvido por Wilding (2011), que apresenta os princípios dos LEM's esféricos, nos quais todos os eixos dos elementos se encontram virtualmente no centro de uma esfera. O autor (2011) também desenvolve alguns os modelos de LEM's que visam a limitar movimentos parasíticos quando em compressão e tração pela adição de segmentos compridos perpendiculares ao eixo de rotação da estrutura de modo que o movimento não dependa apenas da torção dos segmentos.

O trabalho de Nelson et al. (2016a) foi incluído nessa abordagem visto que a alteração de parâmetros é tratada durante o estudo, mesmo não sendo seu foco principal. Os autores (2016) geram superfícies desenvolvíveis a partir de materiais com espessura, fazendo uso de articulações tipo *Outside LET* e *Mixed Tension Resistant*, que são distribuídas em matriz na superfície por uso de algoritmo. Por ajuste automático desse, ao aumentar a quantidade de linhas de articulação (densidade de cortes) e o comprimento dos segmentos em torção se minimiza a tensão na superfície cônica. Os autores (2016) também apontam que quanto maior a quantidade de pontos de interrupção das linhas de articulação (segmentos perpendiculares ao eixo de curvamento), maior a rigidez da estrutura e a resistência a movimentos parasíticos.

Nelson (2018) estuda a flexibilidade uni e bidirecional de polímeros e metais por mudança de parâmetros geométricos dos cortes, diferenciação que se dá por variação da distribuição da LEM (*Outside LET*) na matriz. Cálculos de rigidez em flexão definem os fatores de forma de flexão elástica e eficiência de força dos dois modelos, e multiplicando-os por valores do material-base e inserindo os "novos materiais" obtidos nos diagramas de seleção de materiais de Ashby (nos quais atributos técnicos dos materiais são apresentados em gráficos que indicam em quais materiais eles coincidem, facilitando a sua visualização, comparação e seleção) e aumentando, assim, as opções baseadas em determinadas propriedades (como rigidez em um eixo).

O autor (2018) aponta uma relação entre a rigidez em flexão e a resistência à flexão, sendo que um aumento na primeira acarreta aumento na segunda e o que mais afeta a resistência à flexão é a largura das barras em torção, enquanto o comprimento dos cortes afeta a rigidez em flexão. O autor também conclui que o fator de forma independe da escala, tendo determinada geometria a mesma eficiência em modificar a rigidez e a força do material para diferentes escalas (o fator de forma indica a magnitude dessa modificação), entretanto, o valor da rigidez e da força em si não é igual. Ademais, percebe que o fator de forma independe da quantidade de LEMs em série, devido à forma da unidade básica permanecer a mesma.

Conforme mencionado, também se encontrou trabalhos voltados à compreensão do funcionamento dos LEMs. É o caso de Greenberg (2012), que examina tipos de LEMs em mecanismos planares e esféricos, utilizando da abstração e síntese para compreender seu funcionamento, a relação entre as faces e movimentos do conjunto e representando os sistemas por gráficos (*graphs*). O autor (2012) afirma que a partir disso é possível saber se a geometria pode ser planificada e se trata de um mecanismo, (flexível) ou uma estrutura (rígida). É assinalado que há que se fazer ajustes nos *graphs* de modo a conferir se o movimento é factível considerando-se a espessura do material, para avaliar se pode ser realizado por LEM.

Delimont, Magleby e Howell (2015) buscam a compreensão do comportamento mecânico dos LEMs e definem um guia para seleção dos mais apropriados a cada caso, compilando junções existentes. Os autores (2015) classificam as articulações com relação à estabilidade do centro de rotação e apresentam a adequação de cada uma para altas rotações, percebendo que nenhuma das estudadas consegue evitar movimentos parasíticos e obter grandes deflexões. Apresentam equações de resistência das junções à flexão (dobra), à flexão lateral, à torção, à tensão e compressão, ao cisalhamento. Os autores (2015) ressaltam que pela distribuição das articulações no eixo de onde está prevista a dobra pode-se reduzir o efeito parasítico de torção e flexão lateral, porém notam também a dificuldade de obter resistência à compressão e tração e dobras compactas e precisas.

Já no caso das investigações voltadas à otimização do padrão de corte a partir de uma geometria-alvo, tem-se estudos como o de Nelson et al. (2016a), que estudam a construção de superfícies desenvolvíveis por materiais planos espessos ou quebradiços, o que normalmente não é possível, e para tal utiliza LEMs distribuídos em matrizes. O estudo se baseia em dois pilares: modelos matemáticos de rigidez de certas articulações aliado ao seu alinhamento às *rulling lines* das superfícies. Por testes FE, os autores (2016) notaram que quanto maior o desalinhamento das LEMs com relação às *rulling lines* da superfície maior a tensão no material, além de que o alinhamento das articulações a essas linhas faz com que a superfície tenda a se converter na geometria desejada.

2.2.3 Kirigami

Kirigami é uma prática japonesa que resulta em formas tridimensionais complexas partir do corte de papel, *gami* significando e *kiri*, corte (BLEES et al., 2015). A técnica busca responder a uma série de desafios, como o envolvimento de uma estrutura tridimensional com um material plano sem a ocorrência de deformações, ou o aumento da tensão suportada sem alteração nas suas propriedades intrínsecas. Devido à rigidez da maioria dos componentes de dispositivos, faz-se necessária a inserção de cortes nesses para viabilizar a criação de dobras agudas sem que ocorra cisalhamento e extensão do material. Os cortes podem consistir em linhas simples ou qualquer outra geometria, podendo inclusive formar matrizes de cortes e, atendendo assim a diversas intenções (YANG, CHOI e KAMIEN, 2016).

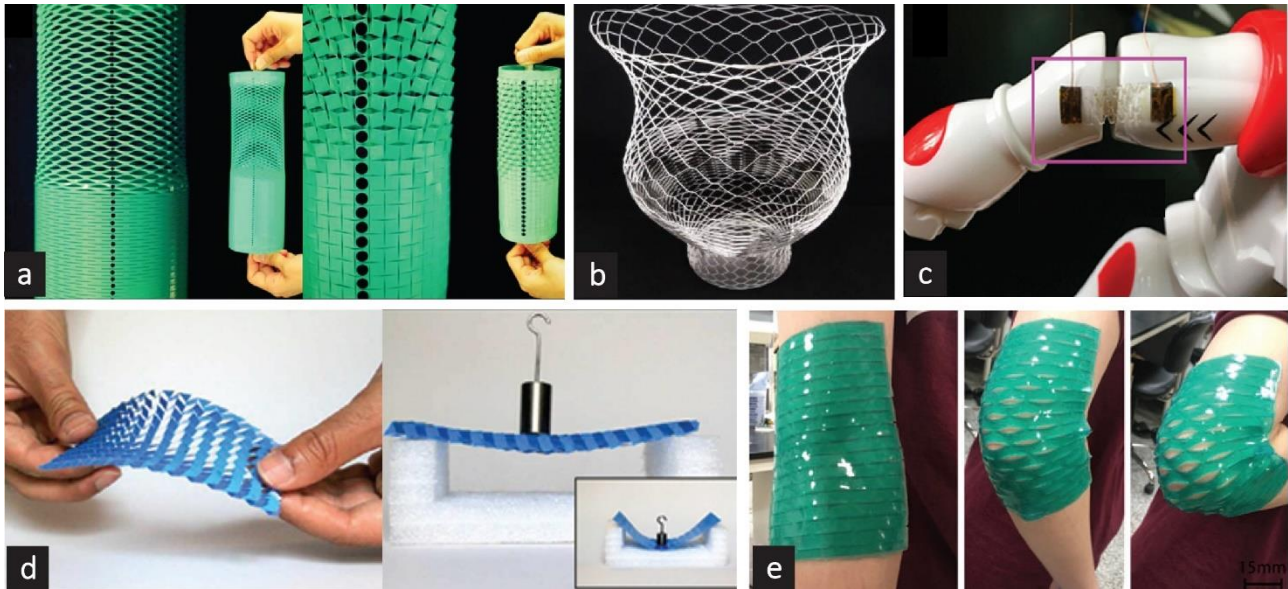
Especialmente com objetivos de alta expansão do material, tem-se utilizado estruturas com tensões programáveis a partir de *kirigami*, podendo-se prever suas deformações mecânicas de certos metamateriais mecânicos e manipular suas propriedades (CHEN et al., 2019; SHYU et al., 2015). De acordo com Shyu et al. (2015), através do *kirigami* se pode controlar a deformação pela imposição dos pontos de concentração de tensão, ou seja, pela de-localização da tensão em vários pontos pré-estabelecidos. Cho et al. (2014) afirmam que pela manipulação da geometria dos cortes em um material plano pode-se controlar a estrutura do material e as propriedades relacionadas a ela (como a macrogeometria e a forma dos poros), aspectos mecânicos (como tensão máxima) e até mesmo propriedades associadas às estruturas (elétricas, acústicas, fotônicas, etc). Desse modo, pode-se obter materiais funcionais tridimensionais com capacidade de alongamento superior à capacidade do material em si e, assim, melhorar a performance desses, especialmente com relação à flexibilidade (ZHENG et al., 2018).

A programação de certos aspectos faz com que o *kirigami* permita a combinação de propriedades que normalmente são contraditórias entre si (como alta condutividade e expansão do material), o que, junto à acessibilidade das tecnologias de manufatura subtrativa, tem aumentado sua adoção e investigação. A técnica se aplica às mais diversas escalas, visto que nessa as deformações são definidas pela combinação de cinemáticas e padrões geométricos. Os compósitos são favorecidos nesse sistema, por poderem ser finamente manipulados, podendo-se prever suas propriedades por investigação dos padrões de corte (XU, SHYU e KOTOV, 2017). Para Callens e Zadpoor (2018), outra vantagem é a obtenção de geometrias complexas por materiais planos originalmente não expansíveis, útil tanto em aplicações estáticas quanto dinâmicas.

De modo a ilustrar a ampla capacidade de adoção da técnica de *kirigami*, tem-se a busca por desenvolvimento de equipamentos eletrônicos flexíveis e vestíveis (CHEN et al., 2019; GUO et al., 2016; MA et al., 2018; ZHENG et al., 2018;), ferramentas biomédicas (ZHAO et al., 2018), dispositivos de captação e estocagem de energia (GUO et al., 2016; LAMOUREUX et al., 2015), robóticos maleáveis – *soft* (MCEVOY e CORRELL, 2018), entre outros. É importante salientar o potencial detectado no *kirigami* para uso em eletrônicos flexíveis. Tem-se que materiais convencionalmente utilizados para eletrônicos não são capazes de

adaptar sua forma em resposta à estímulos externos. Como alternativa, o *kirigami* possibilita a manutenção da condutividade do material em combinação com a capacidade de expansão desse (CHEN et al., 2019; MA et al., 2018; SHYU et al., 2015). Yang, Choi e Kamien (2016) notam oportunidade na técnica para aplicações biomédicas, observando que a maioria dos dispositivos dessa área são feitos de materiais duros, que tendem a falhar uma vez que a tensão for maior que 3%. Na Figura 22 tem-se algumas estruturas de *kirigami*.

Figura 22 - Exemplos de estruturas de *kirigami*.



(a) cilindros em kirigami, fonte: Rafsanjani et al. (2019), (b) escultura em formato de vaso em kirigami, fonte: Isobe e Okumura (2016), (c) conexão de articulação robótica em kirigami, fonte: Zheng et al. (2018), (d) material em kirigami resultando em curvatura gaussiana negativa e resistente à flexão, Fonte: Rafsanjani e Bertoldi (2017), (e) filme polimérico com aplicação de kirigami para adesão ao corpo humano, Fonte: Zhao et al. (2017).

Shyu et al. (2015) sugerem que as regras de *kirigami* se aplicam à diversas escalas e materiais nos quais altas deformações são desejadas. Porém os autores (2015) ressaltam a limitação referente à uniformidade do material para tal, devendo os cortes ser maiores do que as típicas variações na composição do material e nas propriedades da amostra.

O parâmetro crucial no *kirigami* é o que traduz a relação entre rigidez no plano e rigidez de flexão fora do plano, sendo materiais que são mais facilmente dobrados do que cortados por cisalhamento ou esticados aqueles que obtêm números mais altos (BLEES et al., 2015). Para Zheng et al. (2018), a arte é caracterizada por um material plano fino e inextensível que é transformado em uma geometria tridimensional específica. Hwang e Bartlett (2018) enfatizam que essas deformações geométricas que interferem na elasticidade do material e estrutura resultante da técnica são determinadas pelo padrão e orientação dos cortes.

Dentre as variantes do *kirigami* tem-se as aplicadas à elasticidade (*kirigami-engineered elasticity*), que consistem na execução de cortes no material sem que haja dobra posterior e demonstram potencial como metamateriais mecânicos. Dentre essas, a técnica de cortes fractais (na qual as incisões são feitas em mais de

um sentido) possibilita a extensão e flexibilidade por deformações no plano do material (rotação por flexão) enquanto a de cortes paralelos as obtém por deformações fora do plano (flambagem) (CALLENS e ZADPOOR, 2018).

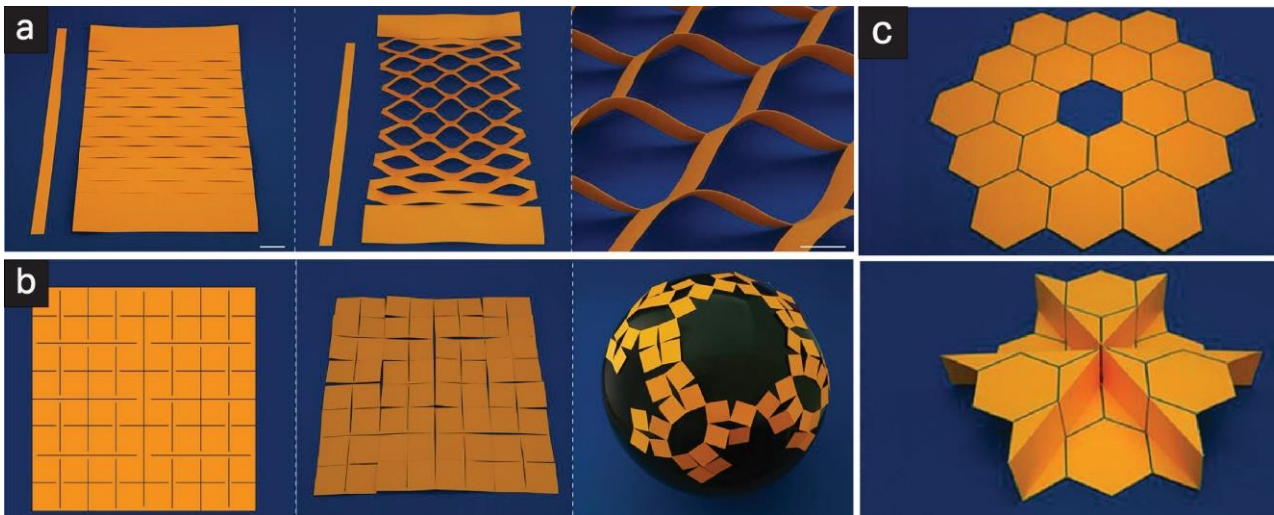
Devido ao *kirigami* permitir uma elasticidade aparente ao material, a obtenção de superfícies desenvolvíveis é facilitada. Além disso, a possibilidade de expansão no plano permite as distorções métricas necessárias para conformar superfícies de curvatura intrínseca aparente num sentido global (visto que os materiais permanecem intrinsecamente planos) por deformações em pequenas faces conectadas entre si. Porém, para que isso seja possível faz-se necessária a atenção ao desenho de cortes apropriado e ao material de aplicação e sua espessura, visto que o *kirigami* se baseia em materiais com espessuras quase insignificantes, de modo que técnicas aplicáveis às escalas micrométricas podem não se adaptar a escalas maiores. Portanto faz-se necessária a atenção a padrões específicos de corte ou dobra, para que os materiais planos possam ser convertidos em geometrias tridimensionais de modo previsível, controlável e adaptado a diversas escalas (CALLENS e ZADPOOR, 2018).

Apesar da geometria de cortes ser um fator muito importante no comportamento do *kirigami* a espessura do material é também muito relevante, uma vez que afeta a relação entre a rigidez no plano e rigidez fora do plano, obtendo números mais altos materiais que são mais facilmente dobrados do que cortados por cisalhamento ou esticados (BLEES et al., 2015; CALLENS e ZADPOOR, 2018). Os experimentos de Cho et al. (2014) confirmam a não dependência da escala do material para o sucesso do experimento em *kirigami*, porém Yang, Choi e Kamien (2016) apontam que, apesar de a técnica não ter um material ou escala específica para aplicação, dependendo dessas escolhas pode-se obter um resultado mais ou menos satisfatório. Para alguns autores o material com cortes se comporta melhor sendo o substrato flexível (CHO et al., 2014; CHOI, DUDTE e MAHADEVAN, 2019; LEE, 2011; SHAN et al., 2015; ZHANG et al., 2018). Portanto, faz-se necessário compreender o comportamento específico de cada material e investigar as diferentes respostas os com a variação da espessura e parâmetros geométricos dos cortes, assim como selecionar o material apropriado para cada aplicação (CALLENS e ZADPOOR, 2018; CELLI et al., 2018).

2.2.3.1 Tipos de *Kirigami*

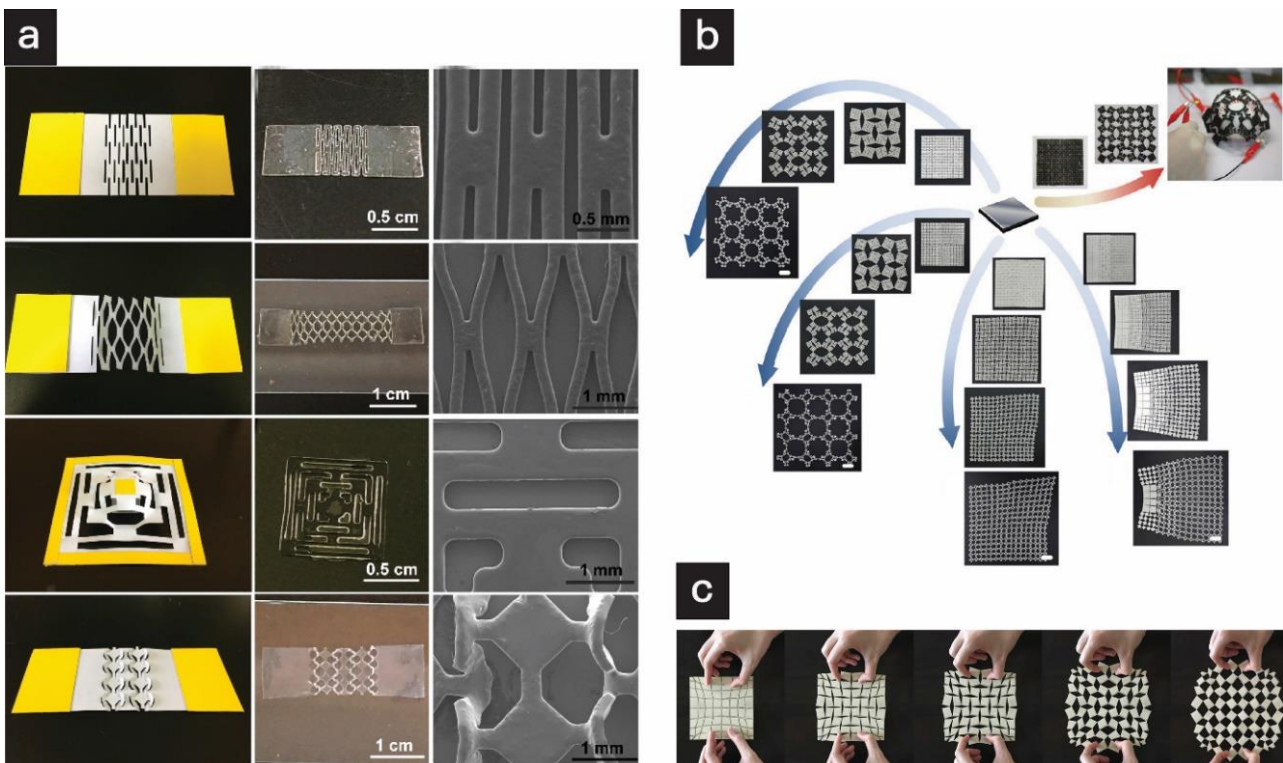
Observou-se na literatura três variações da técnica de *kirigami*: *kirigami* de treliça (*lattice kirigami*), *kirigami* aplicado à elasticidade por cortes fractais e por cortes paralelos. Yang, Choi e Kamien (2016) descrevem o primeiro como a execução de cortes em um material e união de bordas por dobra desse, assim impondo pontos específicos de curvatura gaussiana na superfície e obtendo superfícies escalonadas. Por envolver dobra em seu mecanismo essa variante não foi aprofundada na busca. Os diferentes tipos de *kirigami* podem ser visualizados na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 - Tipos de kirigami.



(a) kirigami de cortes paralelos (b) kirigami de cortes fractais, (c) kirigami de treliça. Fonte: adaptado de Callens e Zadpoor (2018).

Figura 24 - Exemplos de kirigami aplicados à elasticidade.

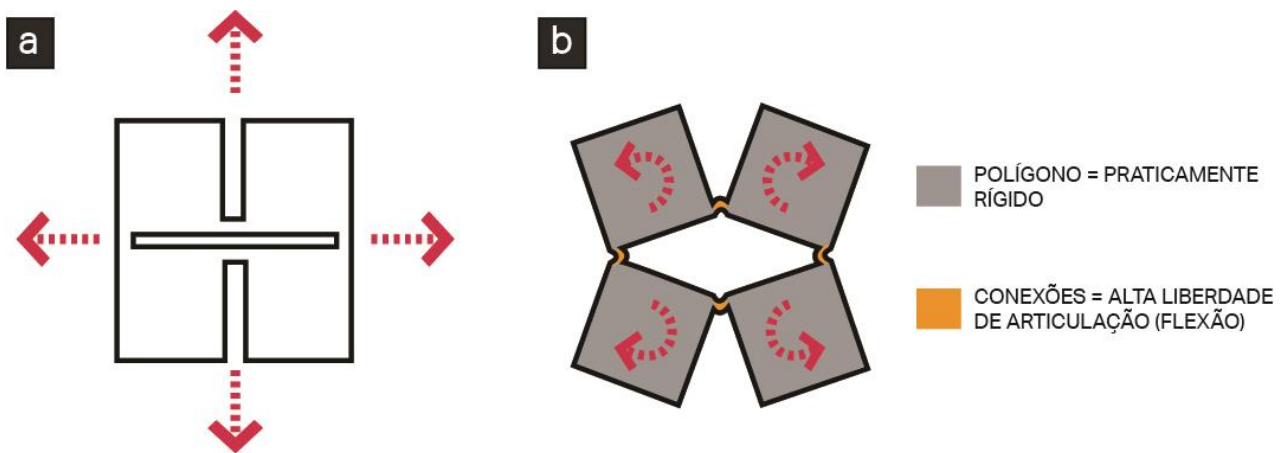


(a) diferentes tipos de kirigami de cortes paralelos feitos a partir de papel e MoS₂/PDMS e as geometrias resultantes, Fonte: Zheng et al. (2018), (b) estudos de cortes fractais com diferentes motivos, a geometria resultante e a aplicação à eletrônicos, Fonte: Cho et al. (2014), (c) estudo de cortes fractais com diferenciações visando obter determinada geometria-alvo, Fonte: Choi, Dudte e Mahadevan (2019).

O kirigami de cortes fractais baseia-se na divisão do material por cortes em unidades, ou polígonos, de rotacionais de geometria ditada pelo padrão de corte (geralmente quadrada ou triangular). Nesse sistema durante a aplicação de forças no material, os polígonos funcionam de modo aproximadamente rígido,

sofrendo majoritariamente rotação, enquanto as conexões entre elas funcionam como articulações com alta liberdade de rotação por flexão (CALLENS e ZADPOOR, 2018; CHO et al., 2014; YANG, CHOI e KAMIEN, 2016). Callens e Zadpoor (2018) consideram os cortes fractais adequados à aproximação de superfícies com curvatura intrínseca por permitir o alongamento biaxial e compressão do material. Choi, Dudte e Mahadevan (2019) apontam que a curvatura aparente, nesse caso, se dá pelas áreas vazias formadas pela expansão do material, visto que os polígonos em si permanecem planos. Esquemas de identificação das partes do *kirigami* de cortes fractais e do funcionamento do material em expansão são ilustrados nas Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Esquema de identificação das partes do material em *kirigami* de cortes fractais.



Exemplo de: (a) uma geometria de *kirigami* do tipo cortes fractais (polígonos quadrados) e (b) os esforços resultantes em cada segmento quando da extensão (deformação) do material. Fonte: adaptado de Cho et al. (2014).

Figura 26 - Esquema do material com *kirigami* de cortes fractais em extensão.

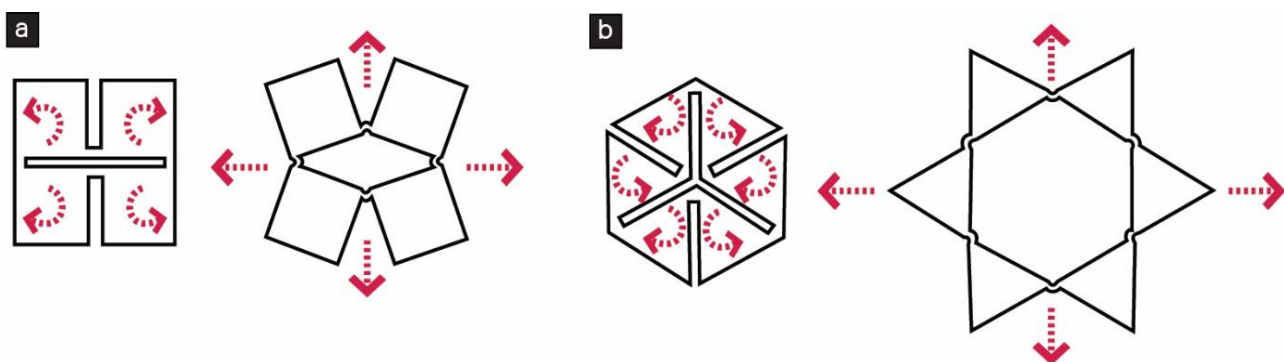


Ilustração de algumas geometrias de *kirigami* de cortes fractais formando polígonos (a) quadrados e (b) triangulares, no formato compacto e expandido. Fonte: adaptado de Cho et al. (2014).

No *kirigami* de cortes fractais pode-se fixar elementos sobre as unidades rotacionais sem que esses percam suas propriedades funcionais, não interferindo quando de altas deformações. Nesse sistema pode-se obter formas tridimensionais a partir de planos por cortes em quadrados ou triângulos. A variável que define a geometria final do material são os ângulos entre polígonos, e pode-se aplicar diferentes motivos e níveis

hierárquicos de corte para manipular a extensão máxima do material e as formas macroscópicas resultantes. Caso se busque obter uma superfície não desenvolvível, ocorrerá uma extensão não uniforme do material, resultando em abertura distinta dos cortes. Entretanto, há uma tensão máxima que esse sistema suporta, logo há que se dar atenção à escolha do material em especial com relação à rigidez e a fratura e as forças de escoamento. A técnica é aplicável a diversas escalas e materiais, desde que seja possível um comportamento de articulação (como ocorre nos elastômeros e metais) sendo as tensões nas articulações menores do que o limite do material. A ideia de que os polígonos têm livre rotação é uma idealização, uma vez que no sistema as articulações estão sob tensão, oferecendo alguma resistência à rotação, logo há que se ter atenção ao desenho das articulações, visto que a tensão máxima que essa aguenta é determinado por sua largura e comprimento (CHO et al., 2014). Na Figura 27 são apresentadas algumas geometrias de cortes fractais e seu funcionamento.

Figura 27 - Esquema de *kirigami* de cortes fractais em formato quadrado e triangular.

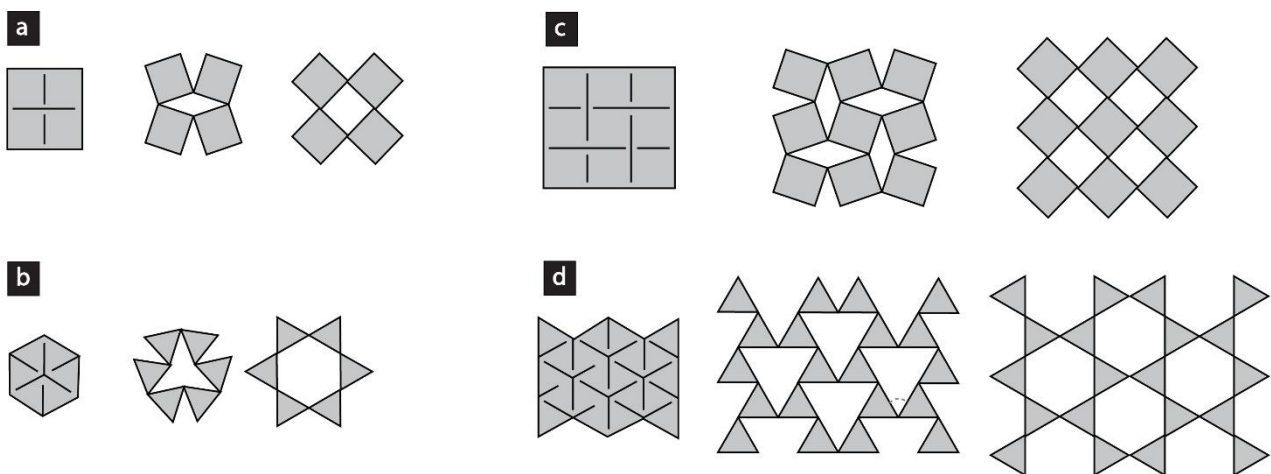


Ilustração de algumas geometrias de *kirigami* de cortes fractais formando polígonos (a) quadrados, (b) triangulares, no formato compacto e expandido, e (c) e (d) em conjuntos maiores. Fonte: adaptado de Cho et al. (2014).

Já o *kirigami* de cortes paralelos permite a deformação fora do plano do material como resposta a tensões de tração aplicadas de modo uniaxial e que acomodam alta deformação macroscópica até mesmo em substratos rígidos, como metais e materiais à base de carbono, o que seria impossível sem os cortes (XU, SHYU e KOTOV, 2017; ZHENG et al., 2018). Um exemplo do uso dessa técnica para obtenção de produtos industriais seriam as telas metálicas expandidas, que são geradas a partir de cortes feitos em uma chapa de aço. Chen et al. (2019), por exemplo, obtiveram pela técnica elasticidade maior que 277% em vidro metálico. De acordo com Xu, Shyu e Kotov (2017), esse fenômeno se dá pela diferença da rigidez à flexão e rigidez no plano do material, característica de materiais planos finos, e que favorece a deformação fora do plano para minimizar a energia de tensão. Devido a isso Callens e Zadpoor (2018) enfatizam a importância do parâmetro de

espessura nesse sistema, visto que a técnica obtém extensão e flexibilidade por flambagem do material, que é fortemente definida por sua espessura.

Nota-se também a manutenção de propriedades importantes dos materiais utilizados nesse sistema, o que foi constatado por Shyu et al. (2015), que aplicam componentes condutores no material em *kirigami*, sendo a condutividade mantida no final do processo, que obteve tensão máxima de tração de 370%. Na Figura 28 pode-se visualizar o material em *kirigami* quando tracionado, com seus segmentos em flambagem.

Figura 28 - Esquema de esforços do material com *kirigami* em tração.

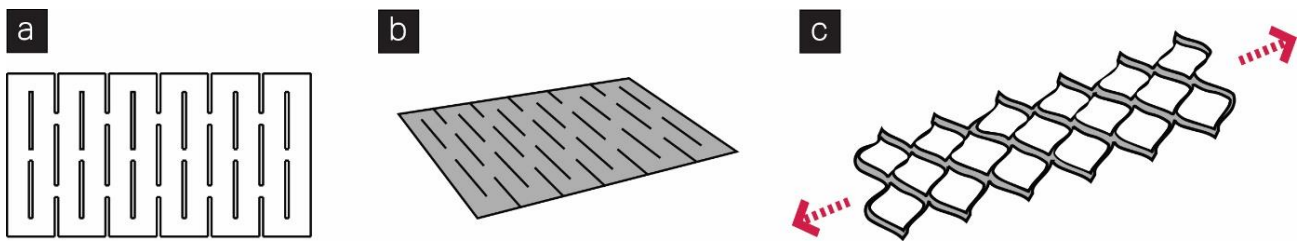


Ilustração de um material em *kirigami* do tipo cortes paralelos no formato normal e expandido uniaxialmente, em (a) vista superior e em (b) e (c) perspectiva, onde se observa a flambagem dos segmentos. Fonte: da autora (2021).

Há também investigações de cortes paralelos para obtenção de estruturas *pop-up* (VAZQUEZ e JABI, 2015). Essas ocorrem a partir da aplicação de tensões perpendiculares ao plano do material, também funcionando pela flambagem dos segmentos e resultando em estruturas tridimensionais.

2.2.3.2 Abordagens dos estudos sobre *kirigami*

Assim como nos temas anteriores, nos trabalhos sobre o *kirigami* foram identificadas algumas tendências, como a investigação de variações nos padrões ou parâmetros geométricos de corte, os estudos voltados a uma aplicação específica para a técnica e aqueles voltados à otimização do padrão de corte para obtenção de determinada geometria-alvo.

No caso das investigações sobre os padrões ou parâmetros geométricos dos cortes, constatou-se que a maioria dos trabalhos investiga os segundos, observando o consequente comportamento do material. Foi o caso de Cho et. al (2014) e Lee (2011) que estudaram a hierarquia de cortes, que acompanha a densidade desses, concluindo que quanto maior, mais a flexível o material. Choi, Dudte e Mahadevan, (2019) complementam ao verificar que a aproximação mais precisa da superfície desejada depende da maior quantidade de subdivisões (cortes). Shyu et al. (2015) focam no espaçamento entre cortes e comprimento desses, verificando a redução na concentração de tensão com o menor valor para o primeiro e ampliação da capacidade de extensão com aumento do segundo. Os autores (2015) também observam que o resultado em

tração é diferente para um corte simples e para um padrão de cortes repetidos. Resultado similar com relação ao espaçamento foi obtido por Guo et al., (2016) e Chen et al. (2019).

Chen et al. (2019), juntamente com Shyu et al. (2015) constatam que a utilização de cortes curvos e extremidades em círculo pode otimizar o comportamento de flexibilidade e redução de tensões no *kirigami*. Os primeiros apontam que incluir desenhos circulares nas extremidades dos cortes não aumenta sua capacidade de se alongar, sendo essa dependente das distâncias entre cortes, mas melhora a performance elástica do material pela menor concentração de tensão.

Já Vazquez e Jabi (2015), Zheng et al. (2018), Blees (2015) e Ma et al. (2018) notam as mudanças nas geometrias obtidas por diferentes disposições de cortes paralelos. Ma et al. (2018) também testaram a execução de incisões parciais (não ultrapassando a espessura do material) para conduzir a direção de movimento do material e facilitar a previsão da forma final. Cho et al. (2014) e Celli et al. (2018) testam a variação localizada de alguns parâmetros geométricos de corte em um mesmo material, obtendo geometrias variadas e resultante em expansão em diferentes direções. Os últimos sugerem que pela análise de cada padrão pode-se combiná-los em um mesmo material através de mapas, visando diferenciações na geometria por expansão ou manipulação.

Conforme mencionado, alguns estudos foram desenvolvidos as no sentido de analisar se o *kirigami* se aplica a determinado material ou função, como Shyu et al. (2015), que investigaram a aplicação a nano compósitos, Vazquez e Jabi (2015), que busca a obtenção de estruturas do tipo *pop-up* por um tipo particular de concreto, Zheng et al. (2018), que utilizam MoS₂ sugerindo aplicações como sensores e atuadores, Guo et al. (2016) que estudam um super capacitor composto por camadas de diferentes materiais aplicado a eletrônicos vestíveis auto carregáveis, Ma et al. (2018) que buscam a aplicação a biogrfeno para eletrônicos flexíveis e captadores de energia, Blees et al. (2015), que estuda e *kirigami* em grafeno e Chen et al. (2019), que têm seu enfoque em vidro metálico voltado a aplicações como eletrônicos e sensores.

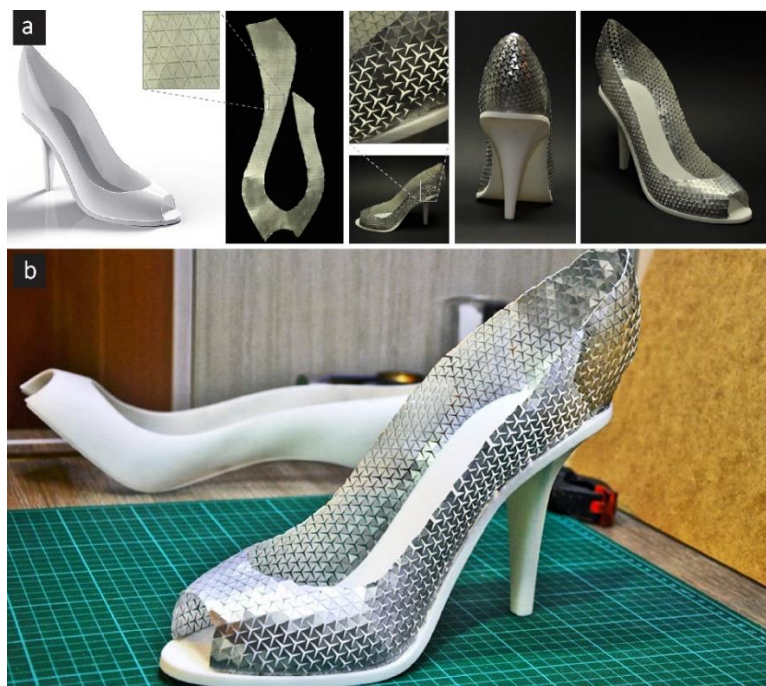
Há também pesquisas que investigam a obtenção do padrão de cortes a ser aplicada ao material bidimensional a partir da geometria-alvo tridimensional, o que é um processo inverso no design (CHO et al., 2014; XUE et al., 2017). Celli et al. (2018) apontam que um pré-requisito para a otimização e processo inverso de design é a investigação numérica do comportamento em flexão de cada padrão de corte.

Xue et al. (2017) apresentam estudo em que se busca a otimização topológica de um corte individual para obtenção de certa geometria curva e as alterações e tensões acarretadas pelas mudanças. Choi, Dudte e Mahadevan (2019) também estudam a otimização do padrão de cortes com o objetivo de aproximar mais precisamente a superfície-alvo, constatando a dependência da maior quantidade de cortes para tal. Já Cho et al. (2014) apresentam uma forma direta de se obter determinadas geometrias-alvo pela manipulação de uma paleta de tipos de cortes fractais em *kirigami* e cálculos de idealização teórica, aproximando-se muito dessa abordagem.

2.2.4 Ligações auxéticas

Os materiais auxéticos são aqueles que possuem coeficiente de Poisson negativo, ou seja, apresentam aumento da largura quando estendidos e redução quando comprimidos, o que diverge do comportamento naturalmente esperado para um material. Esse comportamento distinto é atribuído a dois fatores: a geometria do material e a sua estrutura interna. Um dos potenciais desses materiais é a otimização de algumas características somado as suas propriedades intrínsecas, sendo a distribuição espacial a principal responsável pelo desempenho diferenciado. Como exemplo, tem-se as possibilidades de melhoria de propriedades mecânicas (como a rigidez), inserção de anisotropia em materiais industriais e obtenção de curvatura sinclástica. Ademais, há alguns materiais e estruturas que são desenvolvíveis devido a uma propriedade auxética, apesar de não se ter consciência dessa dependência (EVANS e ALDERSON, 2000). Na Figura 29 tem-se um exemplo de aplicação da técnica.

Figura 29 - Exemplo de aplicação da técnica de cortes tipo ligações auxéticas.

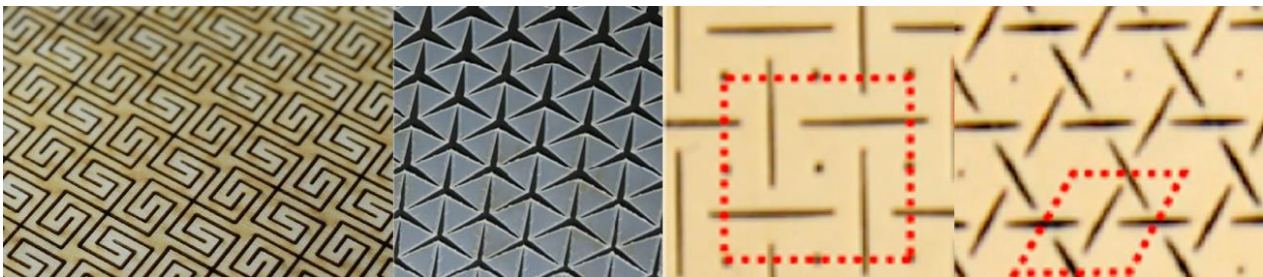


Em (a) projeto de sapato por corte de lâmina metálica em padrão auxético. Fonte: Konaković et al. (2016); (b) sapato fabricado a partir da técnica. Fonte: Carnegie Mellon University (2016).

Devido à categoria de materiais auxéticos incluir materiais fabricados por diferentes métodos, optou-se pela nomenclatura atribuída por Konaković et al. (2016), visto sua especificidade com relação à fabricação por corte. Segundo os autores (2016), ligações auxéticas se dão por: aplicação de um padrão de cortes a materiais (quase) inextensíveis, como metais ou polímeros, que, quando alongados há rotação dos polígonos formados pelos cortes com relação aos seus vizinhos, de modo que o material se expande de modo uniforme.

Os autores (2016) relacionam essa característica a capacidade desses materiais em obter superfícies com curvatura gaussiana diferente de zero. Zhang et al. (2018) são concordantes, afirmando que esse comportamento identificado em alguns materiais planos é atingido por topologias específicas, como unidades de geometria reentrante, unidades rotacionais rígidas ou semirrígidas e sistemas em espiral, formatos circulares formando vazios, entre outros. Porém, pelo estudo de Louth et al. (2017), pode haver limitações na obtenção de uma superfície desenvolvível por determinados padrões de corte auxéticos. Portanto, é possível notar semelhanças entre as ligações auxéticas e os cortes fractais de *kirigami*, visto que ambos são baseados na rotação de polígonos internos aos cortes. Alguns tipos de ligações auxéticas estão representadas na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 - Padrões de cortes de comportamento auxético.



(a) corte em espiral. Fonte: Zhang et al. (2018), (b) corte em Y formando triângulos internos, Fonte: Konaković et al. (2016), (c) corte formando polígonos quadrados. Fonte: Shan et al. (2015), (d) corte em formato Kagome. Fonte: Shan et al. (2015).

Figura 31 - Geometrias com comportamento auxético.

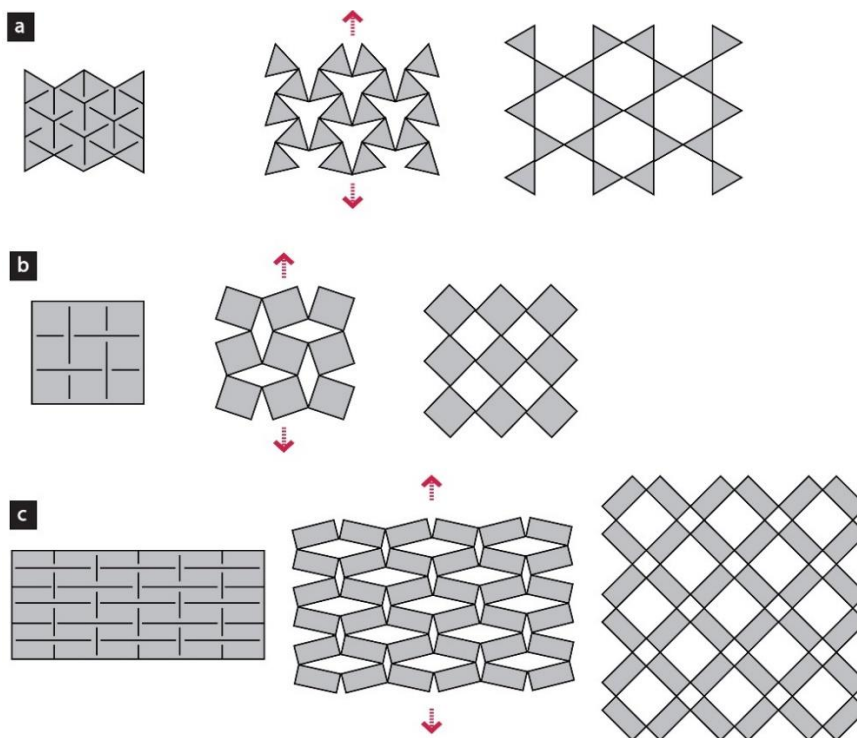


Ilustração de alguns tipos de geometrias de cortes com comportamento auxético (a) triangular, (b) quadrada e (c) retangular. Fonte: adaptado de Lim (2015).

De modo análogo aos cortes fractais do *kirigami*, Konaković et al. (2016) apontam que quando o material com cortes formando polígonos triangulares é expandido, os triângulos permanecem praticamente rígidos, concentrando a deformação nos pontos de articulação, que não resistem às forças externas e permitem a abertura da malha de modo quase isotrópico, sendo as mudanças de escala da superfície absorvidas sem grande esforço de cisalhamento. Segundo os autores (2016), há um limite de tensão que as articulações toleram sem ocorrer a fratura, de modo que há um valor máximo de expansão do material, sendo necessário determinar os limites adequados para cada material baseado em sua espessura e profundidade dos cortes, dependendo tanto do substrato quanto da sua geometria.

2.2.4.1 Abordagens dos estudos sobre ligações auxéticas

Assim como nas outras técnicas, também foram identificados alguns objetivos recorrentes nos estudos. Esses objetivos foram em grande parte a variação nos padrões ou parâmetros geométricos dos cortes e a otimização do padrão de corte para obtenção de uma geometria-alvo.

Como exemplo de estudo que investiga variações de padrões ou parâmetros geométricos de corte tem-se o caso de Zhang et al. (2018), que investigam a característica auxética de cortes em espiral quadrada em acrílico, verificando que essa é fraca e pouco influenciada pela largura dos segmentos ou espessura do material, mas bastante pelo aumento da densidade de cortes. Ressaltam que as deformações são limitadas pela fragilidade do material, além da redução de concentração de tensões pelo arredondamento dos cantos dos cortes. Shan et al. (2015), por análises experimentais e de elementos finitos baseados em borracha de látex natural de formato plano e fino, apontam que o comportamento auxético é ampliado com o comprimento dos cortes. Identificam também que a isotropia depende do formato dos cortes, podendo ser obtida por padrões de simetria rotacional *three-fold* (como o padrão em “Y” formando triângulos), ou *six-fold* (como em polígonos Kagome), detectando para os padrões de cortes formando quadrados e formando losangos alongados comportamento anisotrópico em tração. Já Lee (2011) testa um padrão de cortes reentrantes em poliuretano preenchido com material *soft*, apontando que a geometria do material conduz o comportamento elástico do preenchimento.

Já no caso das investigações que envolvem a otimização do padrão de corte a partir de uma geometria-alvo, apresentam-se os estudos de Konaković et al. (2016) e Louth et al. (2017). No estudo de Konaković et al. (2016), são feitos cortes formando triângulos internos, sendo as limitações do material e processo de fabricação traduzidos em valores geométricos e inseridos em um algoritmo computacional, que utiliza otimização para obter a configuração do material que mais se aproxima à geometria-alvo, extraíndo-se um padrão de corte adaptado às irregularidades locais da superfície por abertura não homogênea dos vazios e outras adaptações. Louth et al. (2017), contudo, buscaram a fabricação de uma superfície de dupla curvatura em alumínio, testando a aplicação do padrão de cortes formando triângulos nos nós da malha, concluindo que o material

com padrão auxético consegue conformar uma superfície duplamente curva, porém não uma superfície desenvolvível.

2.2.5 Síntese da revisão

Nesta seção será feita síntese dos estudos levantados pela revisão sistemática, diferenciando-se cada uma das técnicas e seus métodos de pesquisa. Através disto busca-se identificar a técnica mais apropriada para o curvamento do material envolvido nessa pesquisa (MDF), assim como os métodos a serem aplicados. O embasamento desta análise consta nos Apêndice B — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *kerfing*, Apêndice C — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *lamina emergent mechanisms*, Apêndice D — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de ligações auxéticas, Apêndice E — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *kirigami*, que estão resumidos no Apêndice F — Planilhas resumidas de dados dos estudos sobre *kerfing*, *lamina emergent mechanisms*, ligações auxéticas e *kirigami*.

As abordagens encontradas nos estudos das técnicas de *kerfing*, *lamina emergent mechanisms*, *kirigami* e ligações auxéticas são bastante semelhantes: há estudos voltados à análise de parâmetros geométricos ou padrões de corte, a aplicações específicas e a obtenção de uma geometria-alvo, sendo a mais recorrente a primeira. Em estudos voltados às diferentes técnicas há também autores que usam da abstração para compreender e generalizar o comportamento dos materiais, como é o caso de Gursoy e Ozkar (2015) e Capone e Lanzara (2019) com relação ao *kerfing* e Greenberg (2012) e Delimont, Magleby e Howell (2015) no caso dos LEMs.

Ao analisar os trabalhos nota-se que as diferentes técnicas se sobrepõem ou estão relacionadas, sendo uma tarefa difícil separá-las. De um modo geral há uma diferença entre os objetivos principais de cada uma com relação ao movimento ou geometria desejada: no caso do *kerfing* busca-se a obtenção de curvatura do material, no *kirigami* o alongamento uniaxial desse, nas ligações auxéticas a obtenção de comportamento auxético (expansão lateral resultante da extensão axial), no caso dos LEMs a dobra e possivelmente a curvatura (para matrizes de LEMs). É possível identificar semelhanças tanto nos objetivos das técnicas quanto nos esforços que cada uma prevê, sendo essa semelhança mais notável entre o *kerfing* e os LEMs, que tratam da dobra ou curvamento do material (sendo esse o mesmo que dobras consecutivas), e entre o *kirigami* e as ligações auxéticas, que buscam a extensão do material. Na Figura 32 pode-se conferir os movimentos e esforços mecânicos previstos em cada técnica, enquanto na Figura 33 pode-se observar alguns exemplos de aplicação.

Figura 32 - Esquemas de material com cada uma das técnicas e os esforços mecânicos sob deformação.

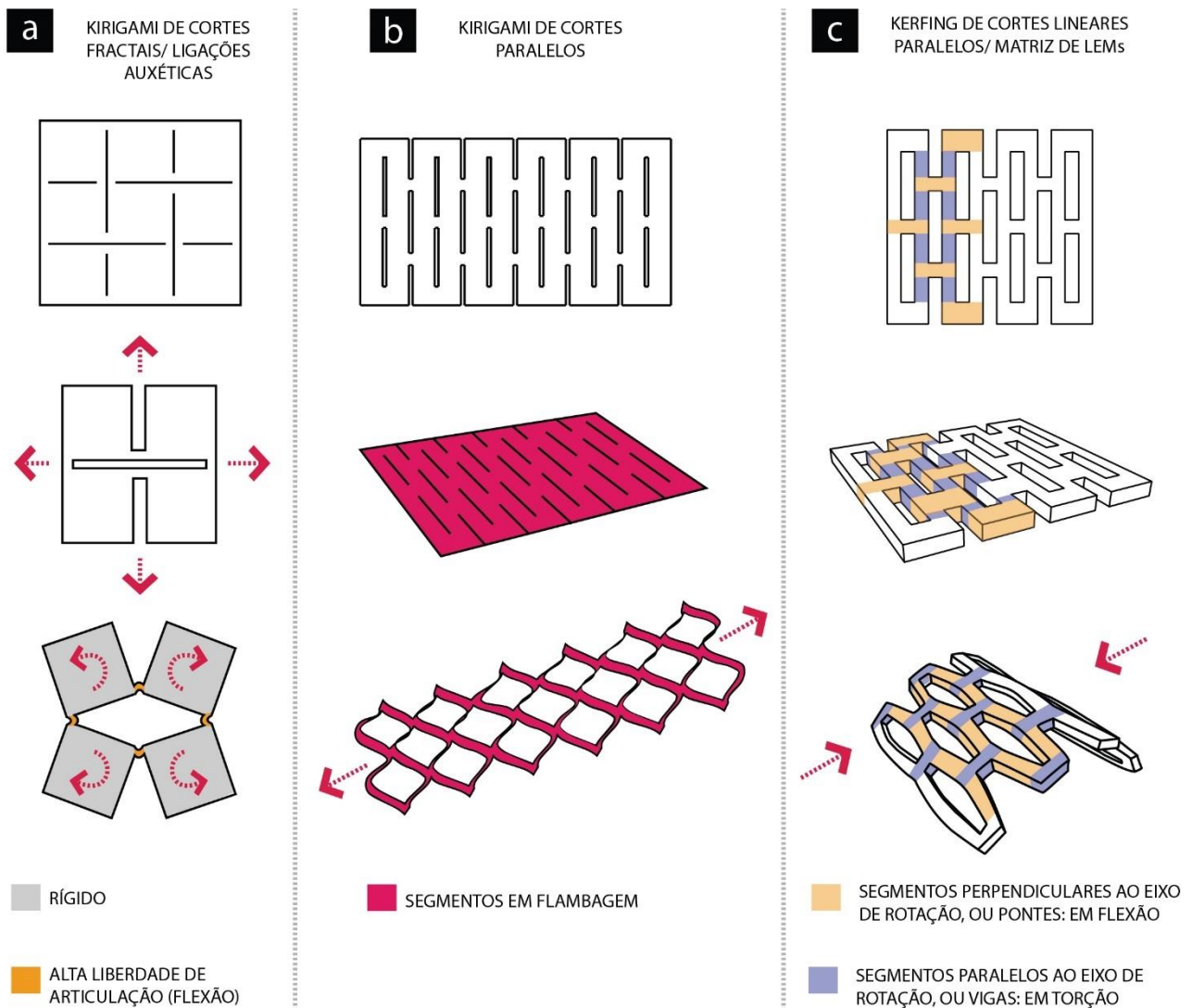
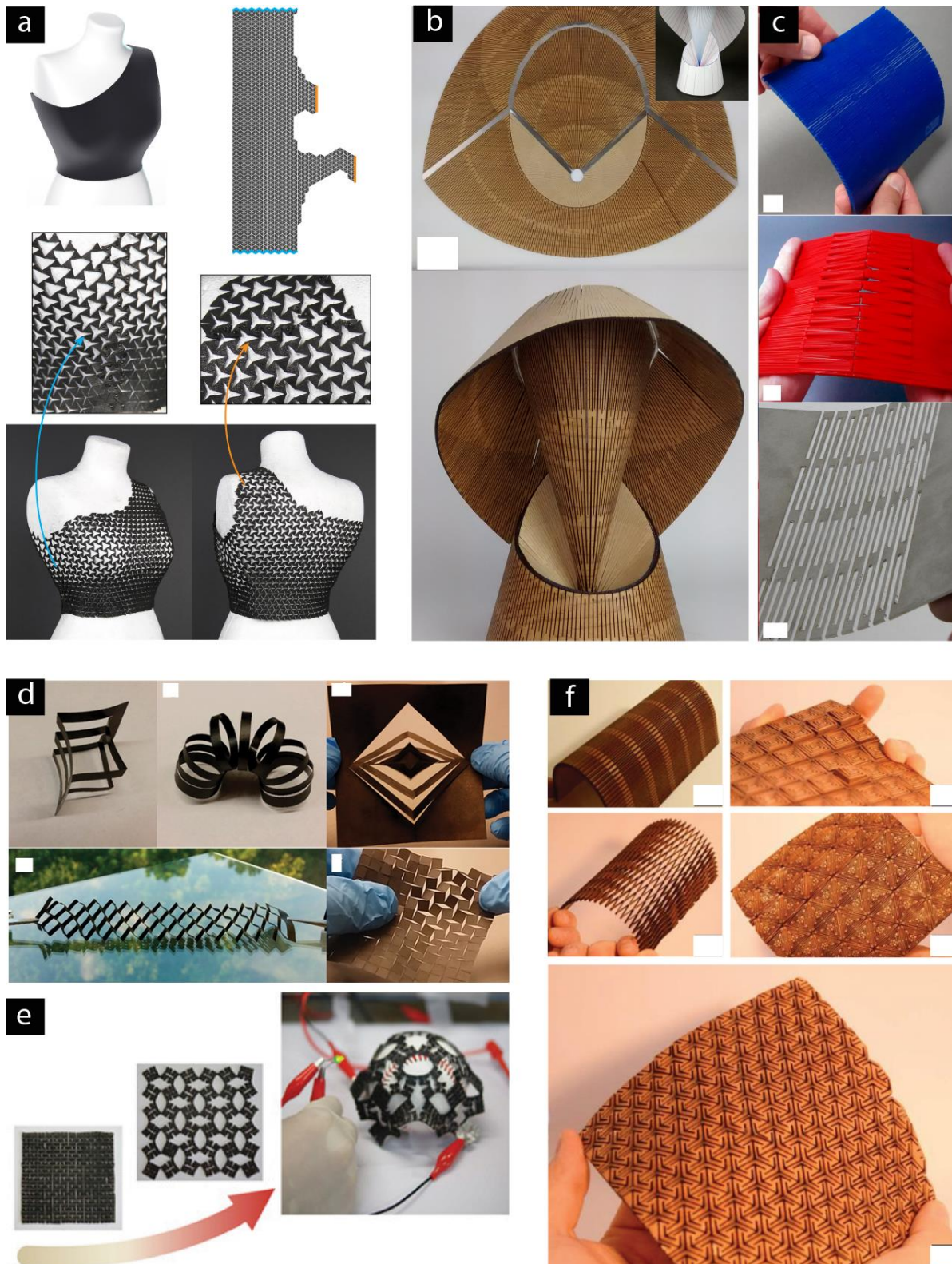


Ilustração da (a) técnica de *kirigami* de cortes fractais ou ligações auxéticas formando polígonos quadrados e os efeitos de rigidez do polígono e liberdade de flexão da articulação resultantes da extensão, (b) técnica de *kirigami* de cortes paralelos e a flambagem quando da tração uniaxial do material e (c) *kerfing* ou matriz de LEMs e os esforços de torção e flexão resultantes da tentativa de curvamento do material. Fonte: da autora (2021).

Levando-se em conta esses aspectos, a técnica de *kerfing* parece ser mais apropriada à presente pesquisa, visto que seu objetivo é especificamente de curvamento de material, podendo esse ser rígido e espesso. Além dessa técnica, também serão consideradas algumas informações oriundas dos estudos sobre LEMs. Isso pois essas junções em alguns casos também visam o curvamento do material e, mesmo nos casos que buscam dobra, contém análises úteis sobre os fenômenos mecânicos que ocorrem no material cortado quando esse é dobrado ou curvado.

Figura 33 - Exemplos de técnicas de *Kirigami*, *Kerfing*, Ligações auxéticas e *lamina emergent mechanisms*.



(a) imagem de padrão de ligações auxéticas aplicada a uma blusa. Fonte: adaptado de Konaković et al. (2016). (b) escultura tradicional de origami feita em MDF por técnica de matriz de LEMs. Fonte: adaptado de Nelson et al. (2016). (c) matrizes de LEMs aplicadas a acrílico e aço. Fonte: adaptado de Nelson (2018). (d) técnica de *kirigami* de cortes paralelos aplicada a multicamadas de óxido de grafeno combinado com fibroína de seda. Fonte: adaptado de Ma et al. (2018). (e) *kirigami* tipo cortes fractais aplicados à eletrônicos. Fonte: adaptado de Cho et al. (2014). (f) tipos de *kerfing* aplicado a MDF. Fonte: adaptado de Jensen, Blindheim e Steinert (2017).

Os objetivos deste trabalho estão incluídos na abordagem de investigação de padrões ou parâmetros geométricos de corte, abordagem com maior número de estudos. Isso foi definido pela constatação da lacuna referente ao estudo da influência da espessura no curvamento. O movimento investigado para o material será a curvatura, visto que se tem por objetivo aumentar as possibilidades de obtenção de geometrias curvas, e do tipo simples (desenvolvível), por ser amplamente estudada, considerando-se, portanto, interessante agregar informações aos estudos, além da maior viabilidade das análises.

Apesar das diferenças observadas, Greenberg (2012) aponta semelhanças entre LEMs e *kirigami*, sendo que os modelos cinéticos desse último, em especial do tipo *pop-up*, muitas vezes são LEMs. Já Zarrinmehr et al. (2017b) constatam que as técnicas baseadas no corte do material para obter painéis flexíveis, como o *kerfing*, dependem do comportamento auxético resultante dos cortes, que se dá por rotação dos polígonos formados entre esses. Na mesma direção, Kalantar e Borhani (2018) apontam que a capacidade de um material de alongar-se é o que define se a superfície poderá sofrer distorção. Callens e Zadpoor (2018), por sua vez, verificam semelhança entre o *kirigami* e os metamateriais auxéticos. Celli et al. (2018) investiga, dentre seus experimentos de mudança de padrões de corte, o efeito auxético obtido em alguns casos, que pode ser explorado para se obter geometrias tridimensionais.

Notou-se também uma diferença nas funções previstas para os materiais, predominando para o *kirigami* investigações voltadas a eletrônicos flexíveis e para o *kerfing* aplicações de arquitetura. No caso do *kirigami* atribui-se a isso a manutenção das propriedades do material no caso dos cortes paralelos e no caso dos cortes fractais pela possibilidade de posicionamento de elementos eletrônicos sobre os polígonos rígidos. Essa diferença influencia em parte os métodos de análise utilizados. Por exemplo, em muitos casos de *kirigami* foram incluídos métodos de medição elétrica e no caso do *kerfing* avaliação do aspecto geométrico e estético. Do mesmo modo em alguns casos de *kirigami* foram utilizados testes de fadiga, visto que o material seria submetido a esforços de aplicação e remoção de carga, o que não ocorre na maior parte dos casos do *kerfing*, que preveem aplicações estáticas. Tanto nos estudos de ligações auxéticas quanto nos de LEMs há um caráter investigativo, não se voltando a aplicações específicas, o que se reflete nos métodos utilizados.

Há também diferenças entre os materiais apropriados a cada técnica, que são definidos de acordo com os esforços mecânicos solicitados por cada uma. O *kirigami* de cortes paralelos, por se basear na flambagem dos segmentos para obter o alongamento do material é mais adequado à materiais finos ou flexíveis, conforme mencionam Blees et al. (2015) e Zheng et al. (2018). No caso do *kirigami* de cortes fractais, por depender da flexão das articulações entre polígonos rotacionais, requer um material que permita esse comportamento, como substratos flexíveis (CHO et al., 2014; CHOI, DUDTE e MAHADEVAN, 2019; LEE, 2011; SHAN et al., 2015; ZHANG et al., 2018). Os LEMs não são voltados a um material específico, podendo-se aplicar diferentes tipos de LEMs (que se baseiam em diferentes solicitações) em diferentes materiais. Já o *kerfing*, por depender principalmente torção dos segmentos do material para o curvamento do conjunto, pode ser aplicado a substratos rígidos e espessos que não flexionam ou flambam facilmente. Essas tendências são

identificadas nos estudos, notando-se uma predominância do uso de multilaminado compensado de madeira e MDF para o *kerfing*, das borrachas naturais para o *kirigami*, do alumínio para as ligações auxéticas e do aço para os LEMs, que também faz uso de materiais como multilaminado compensado de madeira, MDF e acrílico. Por esses fatores, reforça-se a aproximação deste estudo à técnica de *kerfing*, visto que o material que se busca investigar é rígido e espesso, além de reforçar a investigação do MDF, por ser de interesse de muitos pesquisadores do tema em questão.

Pelo fato de comumente as técnicas não serem voltadas às mesmas funções e escalas e serem aplicadas a materiais diferentes, há também uma distinção entre os processos de fabricação aplicáveis a cada uma, mesmo grande parte podendo ser classificada como ferramenta de fabricação digital. No caso no *kirigami*, por ser bastante adequado a funções micro e nanométricas, as ferramentas são compatíveis com escalas muito reduzidas, enquanto no caso do *kerfing*, por exemplo, as ferramentas são aplicáveis à escala macrométrica. Para este estudo, serão adotados equipamentos do tipo corte a laser e fresadora CNC, por serem adequadas ao corte do MDF de diferentes espessuras e por serem frequentes (junto às ferramentas robóticas) nos estudos que envolvem materiais similares.

No que tange ao padrão de corte utilizado nota-se no *kerfing*, nos LEMs e no *kirigami* uma predominância do modelo de cortes em linhas retas com interrupções (segmentos perpendiculares ao eixo de curvamento do material) através da espessura do material. É o caso de Capone e Lanzara (2019), Greenberg e Körner (2014), Gücelci, Alaçam e Bacinoğlu (2017), Holterman (2018) e Matini e Haghazari (2018). Esse será o padrão de corte adotado por este trabalho, visto sua aparente relevância (podendo agregar conhecimento aos trabalhos prévios) e por permitir o curvamento em um sentido apenas, que é o caso das curvas simples. No caso do *kerfing* e LEMs, porém, comumente se remove uma porção de material ao redor do corte visto que as técnicas envolvem materiais com espessura, evitando-se assim que esse se auto-interseccione no curvamento. No caso deste estudo, será investigado o curvamento simples do MDF, optando-se, portanto, por um padrão de cortes lineares com remoção de material. Já no caso do *kirigami* são comuns os cortes sem remoção de material junto à linha, visto que a intenção é alongar o material, além de que esse muitas vezes tem espessura mínima. Nas investigações acerca das ligações auxéticas são mais frequentes cortes em formato “Y” e aqueles que formam quadrados internos, também bastante utilizados no *kirigami*. É possível notar que os estudos que incluem cortes lineares buscam a extensão uniaxial ou curvamento simples, enquanto os cortes fractais, espirais etc. comumente buscam a expansão auxética, biaxial, ou curvamento em mais de uma direção.

Quanto aos métodos de análise utilizados pelos estudos tem-se aqueles voltados à previsão do comportamento dos materiais, como simulações geométricas, cálculos teóricos e análises estruturais, que são feitos previamente aos experimentos ou mesmo no lugar deles. Em outros casos, utilizam-se amostras físicas para efetuar-se a partir dessas análises visuais, mecânicas ou digitais desses materiais.

Com relação às simulações geométricas, apenas o *kerfing* as inclui com frequência, o que pode ser devido a fins formais de uso da técnica. Já os cálculos teóricos são muito utilizados pelos pesquisadores de LEMs, prevendo-se aspectos como a resistência aos esforços que uma articulação pode ser submetida ou seu ângulo de deslocamento na dobra. No *kirigami* também se encontram alguns estudos que incluem cálculos de comportamento mecânico, enquanto nas ligações auxéticas comumente se prevê o coeficiente de Poisson do conjunto. No *kerfing* esses cálculos são raros, porém, em contrapartida, nota-se a presença de algoritmos voltados a calcular a distribuição dos cortes na superfície, o que também ocorre nas ligações auxéticas e *kirigami*. Ademais, na maioria dos estudos voltados ao *kirigami*, LEMs e ligações auxéticas são envolvidas análises estruturais computacionais, especialmente aquelas baseadas em elementos finitos. Isso não ocorre no caso do *kerfing*, em que a maior parte dos trabalhos não envolve análises desse tipo ou, quando o faz, baseia-se no uso de plugins de softwares CAD para prever o comportamento estrutural.

Na maioria dos casos tanto de aplicação de *kirigami* quanto de ligações auxéticas nos quais o objetivo principal para o material é estrutural ou mecânico foram feitas diferentes combinações entre cálculos teóricos (em geral relativos ao comportamento elástico do material), testes mecânicos e análises de elementos finitos. Esses métodos foram utilizados para validar as previsões, o que se resultou em geral na concordância dos resultados de comportamento dos materiais entre diferentes métodos. Alguns casos desse tipo foram: Blees (2015), Celli et al. (2018), Chen et al. (2019), Cho et al. (2014), Lee (2011), Shan et al. (2015), Shyu et al. (2015), Xue et al. (2017), Zhang et al. (2018) e Zheng et al. (2018).

É possível notar também que, com exceção às LEMs, quase a totalidade dos estudos desenvolve amostras ou protótipos das técnicas, seja no próprio material de interesse ou em outro. Os trabalhos que envolveram esses protótipos em grande parte partiram para análise visual do comportamento do material de modo a inferir os fenômenos e os potenciais das técnicas de modo empírico. Muitos estudos voltados ao *kerfing* tiraram conclusões a partir de análises desse tipo, avaliando padrões de corte com relação à curvatura que esses permitem. Isso ocorreu tanto de modo mais genérico quanto ao tipo de curvatura (GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; LANZARA e CAPONE, 2019) quanto sobre os raios de curvatura resultantes dos parâmetros utilizados (GREENBERG e KÖRNER, 2014; MITOV et al., 2019).

Em alguns casos, os protótipos também serviram para que se efetuassem análises mecânicas dos materiais (como de tração), principalmente para o *kirigami* e ligações auxéticas, enquanto para o *kerfing* e LEMs essas são pouco utilizadas. Nota-se um caráter mais prático nas investigações de *kerfing*, investigando-se diretamente a aplicação de interesse e não tendo por objetivo a caracterização desses “novos materiais” por análises mecânicas. No caso das LEMs, apesar de os esforços mecânicos não serem medidos por testes físicos, eles são em grande parte contemplados por cálculos teóricos do comportamento dos materiais, como de flexão e rigidez. Pode-se inferir também que a presença dos testes mecânicos está vinculada à função prevista para o material de estudo, se apenas de obter a forma desejada ou também funcional e estrutural, sendo no segundo caso necessárias as análises mecânicas. O *kerfing* poderia ser enquadrado no primeiro caso,

visto que busca em grande parte o curvamento do material, bastando apenas analisar se esse pode curvar-se e manter-se em determinada posição. Já o *kirigami* e ligações auxéticas poderiam enquadrar-se no segundo caso, por investigar a extensão dos materiais e analisar o quanto de carga esses suportam. São executados também testes de fadiga em alguns estudos de *kirigami* e ligações auxéticas, o que não ocorre no *kerfing*, apesar de autores como Capone e Lanzara (2019), Gutowski (2017), Kalantar e Borhani (2018) e Matini e Haghazar (2018) mencionarem a importância de que o material seja capaz de deformar-se e retornar à forma original.

Além da medição de aspectos mecânicos em alguns casos também se mede o resultado geométrico do experimento, visando a dimensionar seu deslocamento ou deformação, o que ocorre em estudos de *kirigami* e ligações auxéticas. Em ambos os casos há medições feitas por registro de imagem do material deformado (como em Shan et al., 2015 e Zhang et al., 2018), e no *kirigami* também há um caso de digitalização da superfície.

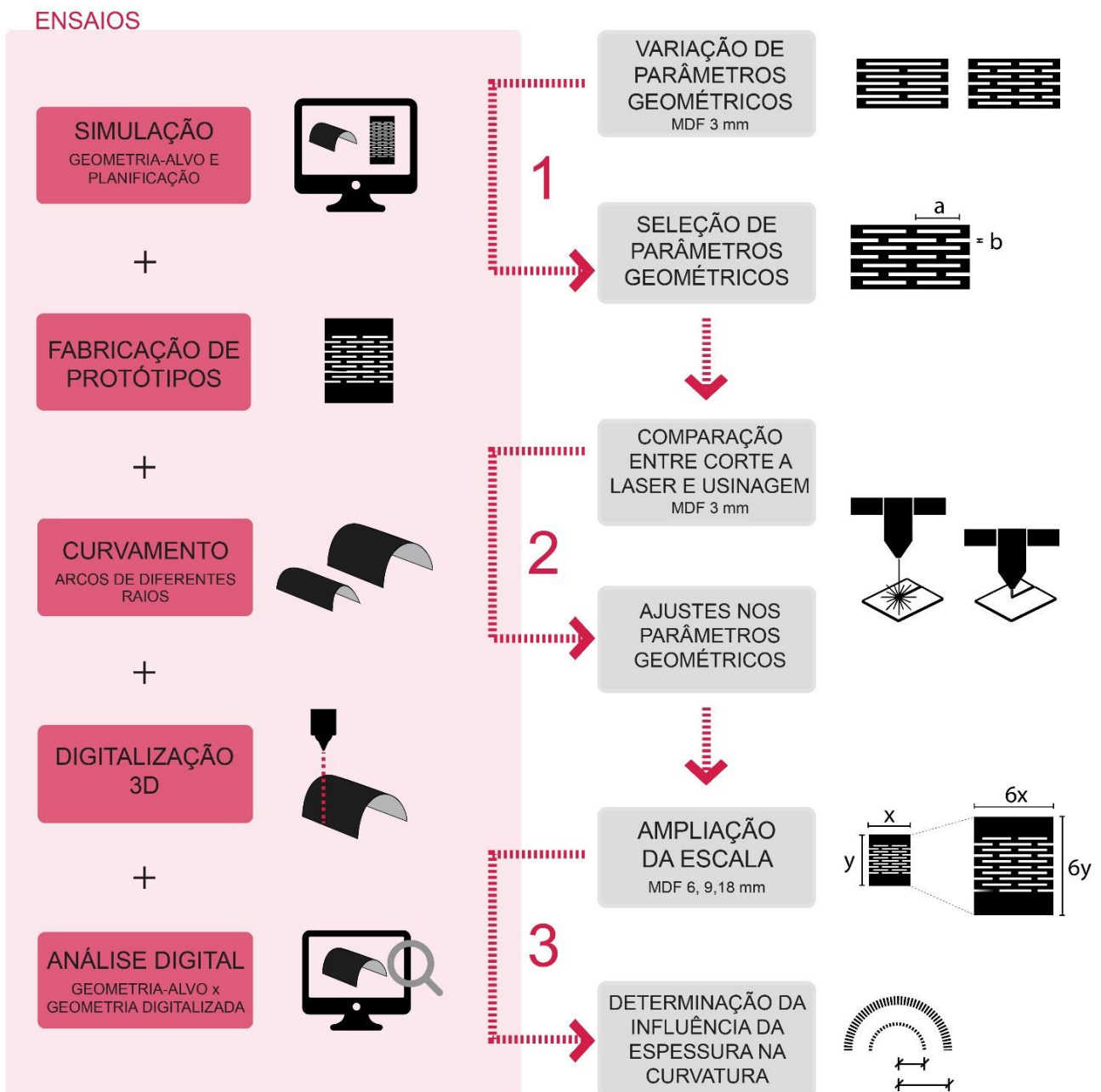
Por fim, muitos estudos, principalmente aqueles que buscam a utilização de uma das técnicas para uma aplicação específica, fazem uso de protótipos do produto com os materiais cortados e deformados de acordo com o objetivo. Através dos protótipos os estudos conseguem comprovar sua validade e ilustrar a utilização. No caso dos LEMs, como excessão, notou-se um caráter mais teórico, havendo poucos exemplos práticos de sua aplicação.

No que diz respeito aos métodos utilizados para as análises desta pesquisa, considerou-se interessante o desenvolvimento de simulação geométrica da geometria-alvo, para que se tivesse com o que comparar os resultados da técnica. Os cálculos teóricos (de comportamento mecânico etc.), análises estruturais e mecânicas não foram incluídos nessa pesquisa, visto o caráter puramente geométrico dessa e a simplicidade da geometria investigada. Foi considerada necessária a fabricação de amostras dos materiais com aplicação da técnica para efetuar as análises. A partir disso, apesar de poucos estudos efetuarem análises geométricas nos materiais, essa foi considerada indispensável para a conferência da precisão dos resultados de curvamento e avaliação dos possíveis efeitos que podem estar ocorrendo nos materiais. Além disso, elas permitem a sobreposição digital das geometrias obtidas por diferentes espessuras e materiais. Com relação à fabricação de um protótipo de produto com a técnica aplicada, foi considerado dispensável uma vez que o trabalho aqui presente não é voltado a uma aplicação específica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho é composta por três etapas que estão representadas no fluxograma da Figura 34. Na sequência será apresentado um resumo da metodologia e, posteriormente, as etapas e os ensaios serão explicados detalhadamente.

Figura 34 - Fluxograma da metodologia proposta para o trabalho.



Fonte: da autora (2021).

Após a revisão da literatura, da delimitação do aspecto a ser investigado dentro do tema de interesse e da definição da metodologia, foram propostas três etapas de ensaios. Tendo em vista que serão feitos ensaios similares para diferentes objetivos, se propõe um processo padrão baseado em: simulação digital, fabricação de protótipos, curvamento, digitalização tridimensional e análise geométrica digital.

Na primeira etapa de ensaios foram definidos os parâmetros geométricos ideais para curvar uma amostra de 3 mm em arco, o que se deu por meio de testes de variação de diferentes parâmetros do padrão de corte. Essas amostras foram cortadas em equipamento de corte a laser, visto sua disponibilidade no local do estudo e alta velocidade de corte.

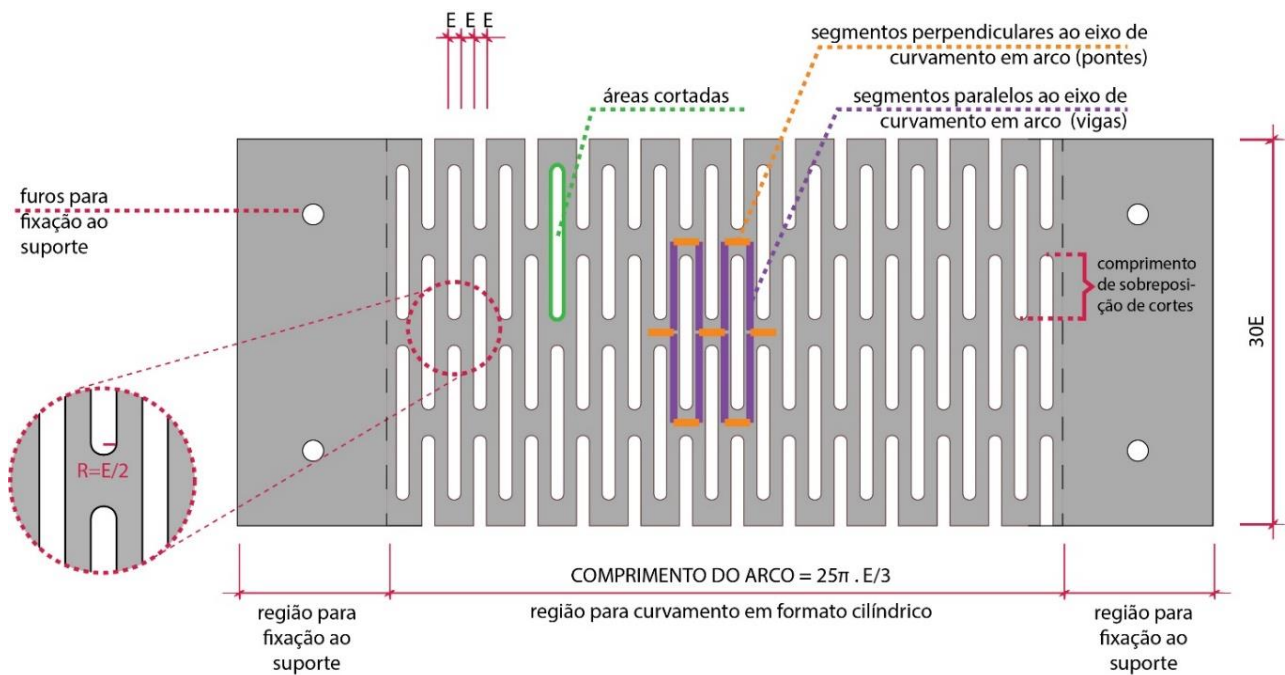
Após a definição dos parâmetros geométricos ideais para o curvamento do MDF de 3 mm de espessura foi feito teste de corte de uma amostra idêntica em equipamento CNC. Esta etapa buscou avaliar se havia diferenças significantes nos resultados fornecidos por cada um e se seriam necessários ajustes no desenho para adaptação ao processo de corte por CNC. O corte por CNC foi necessário visto que para o aumento de escala e consequente espessura dos materiais não seria possível o corte pelo equipamento laser.

Na terceira etapa foi feito teste de ampliação da escala das amostras, no qual foram cortadas amostras de diferentes espessuras, ampliando-se proporcionalmente todos os parâmetros. Após análise de todos os resultados obtidos pelas amostras esses foram comparados, a partir do que foi avaliado o comportamento entre diferentes espessuras e os fenômenos mecânicos que ocorrem.

A geometria-alvo a ser investigada tem formato de meio cilindro, com a curvatura do arco sendo do tipo simples, ou seja, buscou-se a flexão ao redor de um único eixo formando um arco de 180°, configurando uma superfície desenvolvível e assim não sendo necessária a inserção de distorções no material (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019). A curvatura simples foi considerada interessante para ter maior domínio sobre os resultados.

Com relação ao padrão de corte utilizado nos testes esse consiste em incisões paralelas ao eixo de rotação das amostras, contendo segmentos perpendiculares a essas. Os parâmetros geométricos dos cortes que determinam o comportamento da amostra, segundo a literatura, são: a quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de curvatura do material, a largura dos segmentos sem cortes, a largura dos cortes, o comprimento dos cortes e a sobreposição entre esses. De modo a limitar a quantidade de testes e viabilizar o estudo foram fixados os parâmetros de largura dos cortes e dos segmentos, que tem medida igual à espessura de cada amostra, tratando-se de uma medida mínima para o material não apresentar facilidade de ruptura (CAPONE e LANZARA, 2019). Além disso, os cortes foram feitos os cantos arredondados para redução da tensão nesses pontos (ABLAT e QATTAWI, 2019; CHEN et al., 2019; SHYU et al., 2015; ZHANG et al., 2018), arredondamento esse de raio igual à metade da espessura de cada material, visto a viabilidade dessas dimensões pelas fresas utilizadas para corte na fresadora CNC. Na Figura 35 tem-se uma ilustração do modelo genérico da peça com o padrão de corte utilizado.

Figura 35 - Modelo genérico da peça em MDF a ser cortada, sendo E a espessura do material.



Fonte: da autora (2021).

Com relação às características do material em si, segundo a literatura são determinantes no curvamento por cortes padronizados as propriedades intrínsecas desse (em especial o módulo de Young) e sua espessura. De modo a aproximar ao máximo o comportamento das amostras de MDF cortadas no que tange às propriedades intrínsecas do material todas chapas utilizadas são da marca Duratex modelo MaDeFibra. Essa marca foi selecionada por ser a maior produtora de painéis de madeira industrializada do país (Duratex, 2021) e de atuação consagrada no mercado. Amostras de mesma espessura foram sempre obtidas a partir de uma mesma chapa, visando a evitar possíveis variações de dimensões ou demais características do painel. As tolerâncias dimensionais e propriedades dos painéis utilizados constam nas Tabela 1 e Tabela 2, conforme fornecidas pela empresa.

Tabela 1 - Tolerâncias dimensionais dos painéis Duratex.

TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS

VARIÁVEIS	NORMA DE REFERÊNCIA	LIMITES (NBR 15316-2)	
		≤ 9 mm	> 9 mm
Espessura	NBR 15316-2 : 2015	+/- 0,2 mm	+/- 0,3 mm
Comprimento e largura		+/- 5,0 mm	
Esquadro		Máximo 2,0 mm/m	
Retilidade		Máximo 1,5 mm/m	

Fonte: Catálogo técnico: painéis de madeira (Duratex, 2015).

Tabela 2 - Propriedades dos painéis Duratex.

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E HIGROSCÓPICAS - MADEFIBRA (NBR 15316-2 : 2015)

VARIÁVEIS	CONCEITUAÇÃO	UNIDADE	MADEFIBRA											MADEFIBRA ULTRA						
			VALORES, ESPESSURA (mm)											VALORES, ESPESSURA (mm)						
			2,5	3	6	9	12	15	18	20	25	30	35	6	9	15	18	25		
Resistência à tração perpendicular (mínima)	É a resistência que um corpo de prova oferece quando submetido a forças de tração de sentido contrário, aplicadas perpendicularmente às suas superfícies	N/mm ²	0,65			0,60			0,55			0,50		0,70	0,80	0,75				
Resistência à flexão estática (mínima)	É a resistência que um corpo de prova, apoiado em suas extremidades, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro, até a ruptura	N/mm ²	23			22			20		18		17		27		24		22	
Inchamento	É o incremento de espessura que um corpo de prova apresenta após imersão em água a 20°C +/- 1°C, durante 24 h, por +/- 15 minutos	%	50	40	30	17	15			12		10		8		18	12	8		7
Densidade (mínima)	É o quociente da relação entre massa e volume de um corpo de prova	kg/m ³	800			651						800	720	680	670					
Módulo de elasticidade (mínima)	Constante física que expressa o nível de rigidez do material, determinado durante regime elástico, no qual não há alteração de suas características originais	N/mm ²	N/A			2700		2500		2200		2100		1900		2700		2400		2300
Teor de umidade	É a quantidade de água de um corpo de prova eliminada por secagem à temperatura de 105°C +/- 2°C, até atingir massa constante	%	4 a 11											4 a 11						
Inchamento após ensaio cíclico	Incremento em espessura que um corpo de prova apresenta após ensaio de 21 dias incluindo imersão em água, freezer e estufa	%	N/A											25	19	15	15	15		
Tração perpendicular após ensaio cíclico	É a resistência à tração após ensaio de 21 dias incluindo imersão em água, freezer e estufa	N/mm ²	N/A											0,35	0,30	0,20	0,20	0,15		

Fonte: Catálogo técnico: painéis de madeira (Duratex, 2015).

Os testes envolveram a variação de parâmetros da geometria-alvo, do padrão de corte e do material. Visando a organizar e facilitar a compreensão do estudo cada um desses parâmetros recebeu um índice, equivalente a: Índice 1 a quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra em arco; Índice 2 a sobreposição dos cortes (relação entre o comprimento dos cortes/ comprimento dos trechos sem cortes); Índice 3 a largura total da peça; Índice 4 o raio do arco e Índice 5 a espessura da amostra. Cada um desses parâmetros foi variado em um ou mais testes, os quais também receberam nomenclatura por letras em ordem alfabética indicando a sua ordem de ocorrência. Os testes foram incluídos nas etapas pertinentes,

contendo a primeira etapa os testes A, B, C e D, a segunda etapa o teste E e a terceira etapa o teste F. O resumo dos índices, etapas e testes pode ser observado na Tabela 3 e Tabela 4.

Para cada amostra foi criado um código de identificação que é composto pela letra inicial de cada parâmetro e números equivalentes a cada índice em ordem numérica, separados por pontos, e antecedidos pela letra do teste equivalente (Figura 36).

Tabela 3 - Nomenclatura de índices para cada parâmetro das amostras.

ÍNDICE	PARÂMETROS DAS AMOSTRAS
1	Quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra em arco
2	Sobreposição dos cortes (relação entre o comprimento dos cortes/ comprimento dos trechos sem cortes)
3	Largura total da peça, em milímetros
4	Raio do arco, em milímetros
5	Espessura do material, em milímetros

Fonte: da autora (2021).

Tabela 4 - Resumo dos testes envolvidos em cada etapa.

EXPERIMENTOS				
ETAPA	TESTE	OBJETIVO	ÍNDICES FIXOS	ÍNDICES VARIÁVEIS
1	A	Varição do número de segmentos de interrupção de cortes.	3,4 e 5	1 e 2
	B	Varição do comprimento de sobreposição dos cortes.	1,3,4 e 5	2
	C	Mudança de uma das dimensões da geometria-alvo (largura).	1,4 e 5	2 e 3
	D	Mudança de uma das dimensões da geometria-alvo (raio).	1,3 e 5	2 e 4
2	E	Comparação entre o processo de corte a laser e corte por fresadora CNC.	TODOS	-
3	F	Aumento da escala do arco pela mudança da espessura e demais parâmetros proporcionalmente	1 e 2	3,4 e 5

Fonte: da autora (2021).

Figura 36 - Legenda para código das amostras.

A - Q03.S08.L90.R25.E03

teste índice 1 índice 2 índice 3 índice 4 índice 5

Fonte: da autora (2021).

A ordem dos testes foi determinada de acordo com a possibilidade de alteração de cada variável, ou seja, se deu preferência à variação dos parâmetros geométricos dos cortes inicialmente para então, caso não

fosse o suficiente, fazer alterações na geometria-alvo e por fim testar a mudança de espessura da amostra. Isso se deu pensando-se na lógica de projeto, de modo que se considere inicialmente o desenvolvimento de um protótipo para ao final ampliar a escala. Durante as etapas equivalentes à prototipagem se priorizou a adaptação do material ao projeto por intervenções em pequena escala e, caso necessário, alterações em maior escala, mais impactantes para o projeto.

De modo a viabilizar o estudo dos efeitos da mudança de escala do MDF no curvamento permitido por *kerfing* foram fabricadas amostras em 4 espessuras distintas. Essas estão comumente disponíveis na cidade do estudo (Porto Alegre), conforme levantamento feito por este que encontrou as seguintes dimensões disponíveis: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20, 25 e 30 mm. Dentre essas foram selecionadas para este estudo as espessuras de 3, 6, 9 e 18 mm, por contemplarem um intervalo considerável de valores. Apesar de se considerar interessante o teste com chapas mais espessas, essas não estavam disponíveis no local do estudo nas versões cruas (sem laminação nas faces). Previamente ao corte das amostras as chapas de MDF foram medidas em sua espessura para conferência da medida real. A única chapa que demonstrou diferença foi a de 3 mm de espessura nominal, que apresentou espessura real de 2,8 mm (valor dentro do limite de tolerância apresentado na Tabela 1), enquanto as demais apresentaram dimensões equivalentes aos 6, 9 e 18 mm nominais.

3.1 ENSAIO PADRÃO

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios foram padronizados para as três etapas do estudo. Nesse item serão descritos os procedimentos que foram aplicados, podendo haver algumas adaptações em cada etapa decorrentes de suas especificidades.

3.1.1 Simulação da geometria-alvo e planificação

Previamente ao corte das amostras, foi feita simulação do material em arco com aplicação dos cortes em software de modelagem 3D, representando-se o meio cilindro idealizado, sem que se considerasse quaisquer forças ou esforços mecânicos atuantes nele (como a gravidade). A modelagem foi feita no software Rhino e plugin paramétrico Grasshopper, sistema que permite a fácil alteração de parâmetros e planificação de toda a estrutura para fabricação. Os arcos foram planificados e extraídos arquivos em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) para uso nos equipamentos de corte.

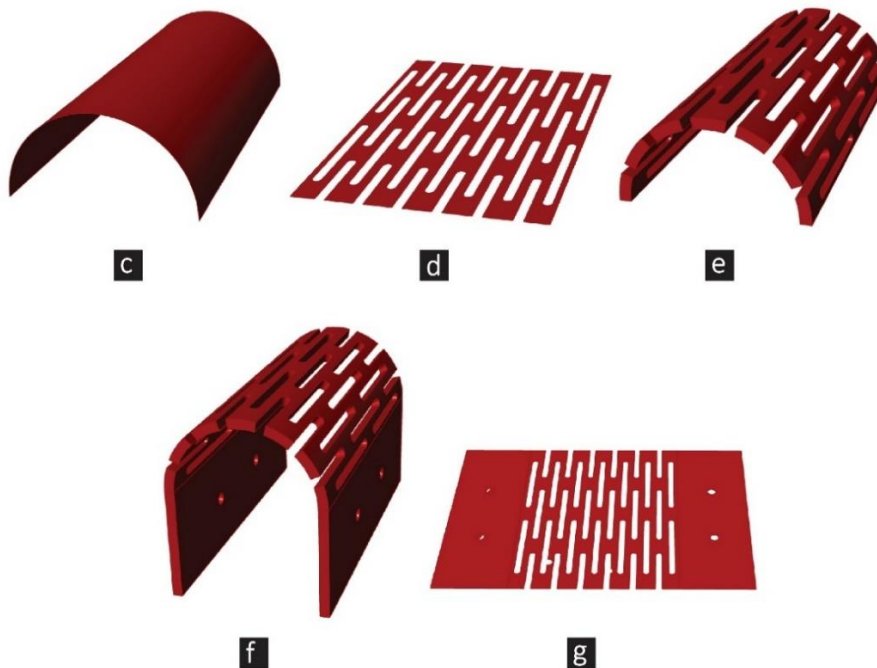
O algoritmo de geração da estrutura se baseou em: desenho da geometria-alvo de meio cilindro e das abas anexas para suporte da geometria, geração do padrão de corte, aplicação do padrão de corte na geometria-alvo e planificação do conjunto para fabricação. Previamente à geração da geometria foram

inseridos os parâmetros numéricos tanto do conjunto da estrutura quanto do padrão de corte visando facilitar mudanças nos dois aspectos e assim a atender às necessidades das etapas de ensaios. O MDF foi representado como uma superfície (sem espessura), visto que para fabricação dos protótipos é necessário um arquivo equivalente a face a ser cortada. A Figura 37 representa o fluxograma de geração do algoritmo, enquanto na Figura 38 pode-se observar o resultado geométrico de cada etapa no Grasshopper e na Figura 39 o algoritmo ampliado.

Figura 37 - Fluxograma do algoritmo de geração da geometria e planificação da amostra.

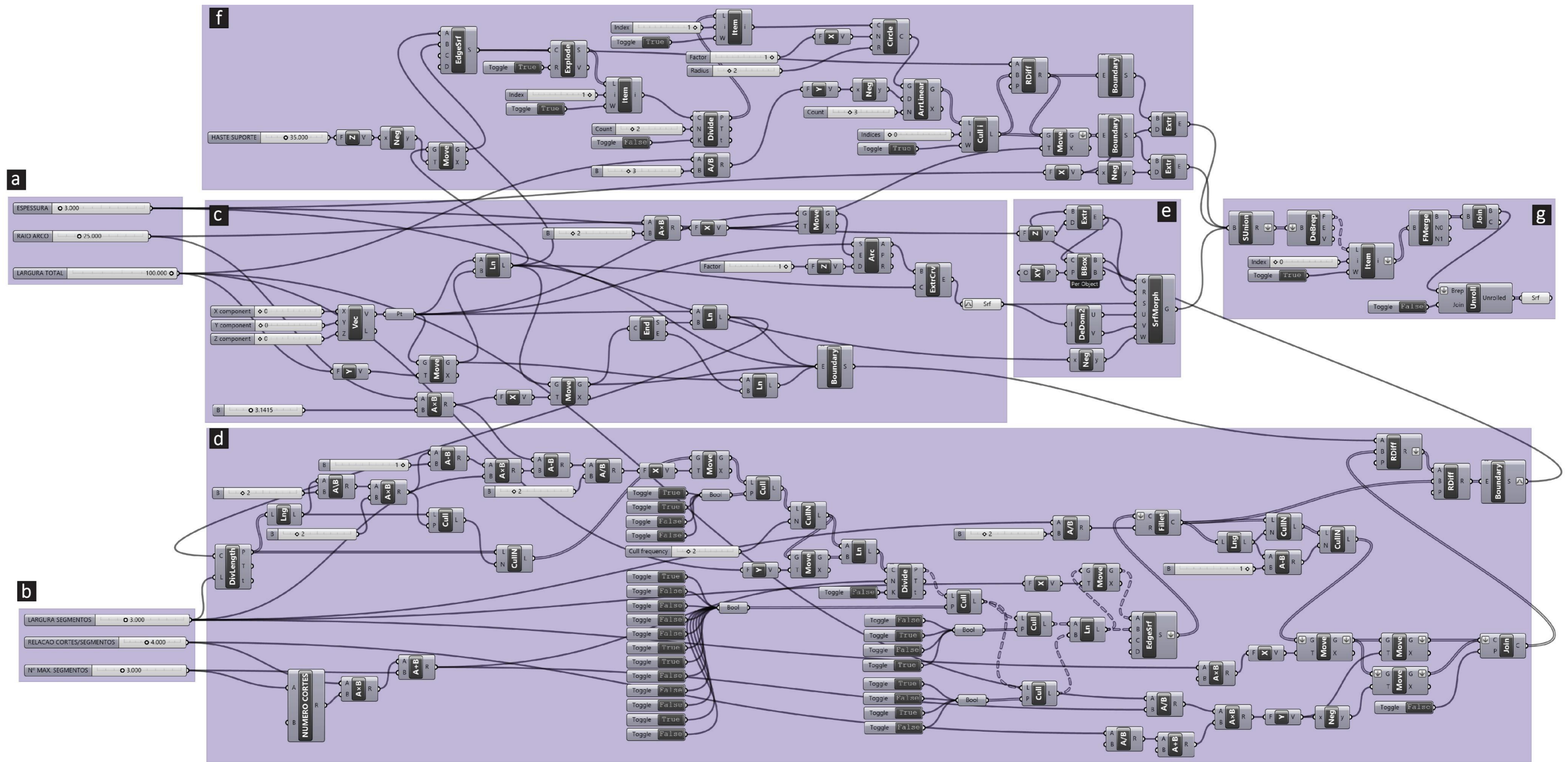


Figura 38 - Imagens da tela do software Rhino/Grasshopper com o modelo resultante de cada etapa.



(a) inserção dos parâmetros numéricos da geometria-alvo e (b) do padrão de corte; (c) geração da geometria-alvo de meio cilindro; (d) geração do padrão de corte; (e) aplicação do padrão de corte na geometria-alvo; (f) geração das hastas de suporte do meio-cilindro; (g) planificação do conjunto para fabricação. Fonte: da autora (2021).

Figura 39 - Ampliação do algoritmo de geração da estrutura com kerfing.



(a) inserção dos parâmetros numéricos da geometria-alvo e (b) do padrão de corte; (c) geração da geometria-alvo de meio cilindro; (d) geração do padrão de corte; (e) aplicação do padrão de corte na geometria-alvo; (f) geração das hastes de suporte do meio-cilindro; (g) planificação do conjunto para fabricação. Fonte: Da autora (2021).

3.1.2 Fabricação de protótipos

De posse dos arquivos oriundos da planificação do arco esses foram importados nos equipamentos para corte. A primeira etapa de ensaios (variação de parâmetros geométricos das amostras) foi feita no equipamento de corte a laser disponível no Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LIFEELAB - UFRGS). As demais etapas tiveram suas amostras cortadas em fresadora CNC de propriedade da empresa Sambi (Porto Alegre, RS). Os equipamentos e parâmetros de corte utilizados serão especificados em cada etapa pertinente.

As amostras cortadas têm a extensão da área com cortes equivalente ao comprimento do raio de arco. Nas extremidades das amostras foram deixadas áreas sem corte para servir de fixação aos dispositivos de curvamento e suporte do arco, conforme já apresentado na Figura 35.

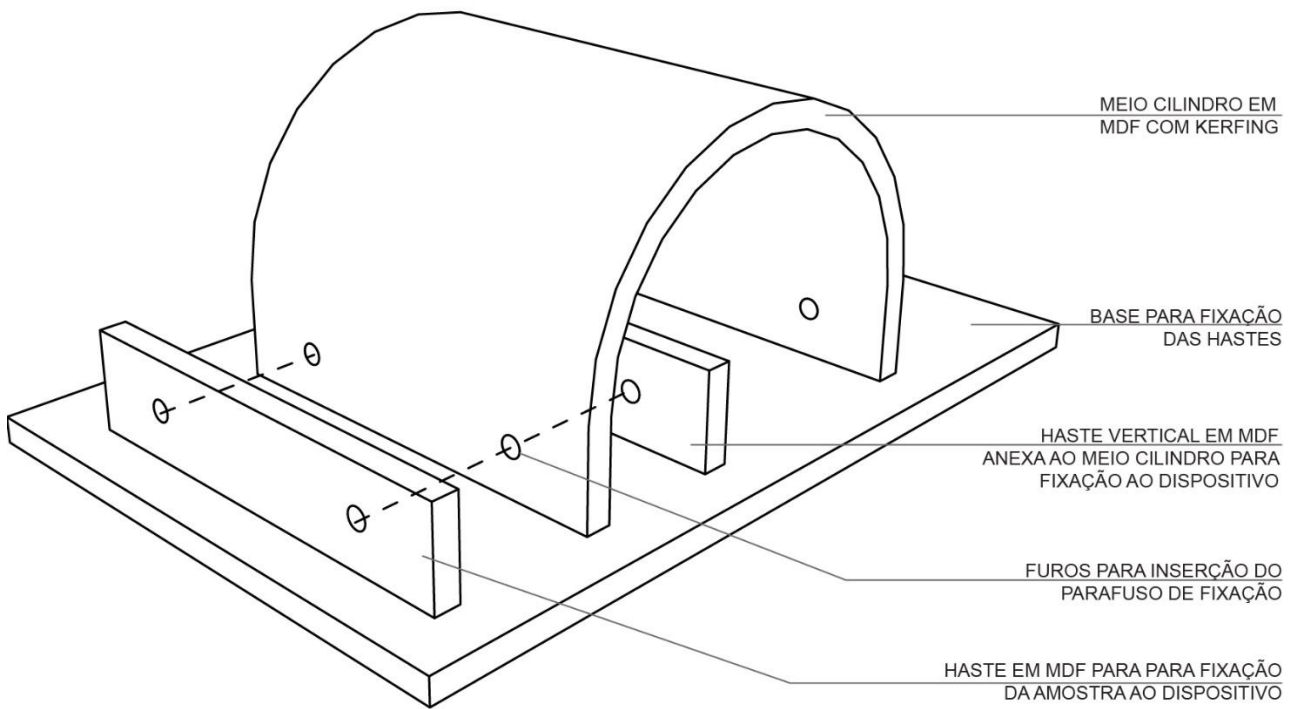
3.1.3 Curvamento em arco

Após cortadas, as amostras foram curvadas em arco de 180°. Tem-se que o tipo de carga (direção da carga, magnitude, tipo de fixação das bordas, etc.) que é aplicada no material para conformá-lo afeta a superfície resultante (GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018). Isso também foi identificado neste estudo por análises manuais com peças cortadas inicialmente. Devido a isso, foram desenvolvidos dispositivos de suporte e fixação das amostras, também com o objetivo de estabilizá-las e permitir a medição.

Em cada etapa de ensaios os dispositivos de suporte e fixação das amostras foram cortados no mesmo equipamento de corte das respectivas amostras, visto que também foi necessário um ajuste na escala desses. Foram projetados alguns detalhes nos dispositivos tanto para evitar o deslizamento lateral das amostras quanto para evitar sua inclinação e consequente alteração do ângulo de encontro do cilindro com a base. Esses detalhes podem ser observados na Figura 40.

No caso da primeira etapa de ensaios, devido a essa envolver testes de variação em parâmetros do meio cilindro (incluindo o raio do arco), o dispositivo de suporte das amostras foi feito com posição regulável para fixação das extremidades da amostra, sendo essa equivalente ao diâmetro da amostra a ser fixada. No caso da segunda etapa de ensaios foi utilizado o mesmo dispositivo, visto se tratar de um ensaio com amostra de mesma espessura. Já para as amostras da terceira etapa foram fabricados dispositivos para cada escala de arco e com posição fixa de fixação das amostras, visto que se buscou o teste de ampliação da geometria com dimensões gerais previamente definidas. Após o curvamento e fixação no dispositivo as amostras foram analisadas visualmente e, quando necessário, digitalizadas.

Figura 40 - Esquema dos dispositivos de fixação das amostras e seus componentes.



Fonte: da autora (2021).

3.1.4 Digitalização 3D

Devido à alta precisão obtida pela digitalização 3D e pela dificuldade em dimensionar por métodos tradicionais as formas estudadas, foi utilizado scanner 3D para analisar os arcos resultantes dos experimentos. Os equipamentos disponíveis no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS são baseados em tecnologia óptica e aquele selecionado será descrito a seguir de modo a compreender seu funcionamento. Algumas das principais vantagens do uso de tecnologias ópticas com relação a outros tipos de medição é a não necessidade de contato com os objetos (REYNO, MARSDEN e WOWK, 2018; RICO et al., 2015), a possibilidade de medição de geometrias pequenas e formas complexas e a alta velocidade na captação de pontos (BLANCO et al., 2015; RICO et al., 2015).

Desse modo, foi selecionado para o estudo o equipamento baseado em holografia conoscópica a laser Digimill 3D, por ser o scanner de maior precisão disponível no local. A holografia conoscópica apresenta as vantagens de apresentar baixo ruído e alcance de captação em campos inacessíveis por outras tecnologias, permitir a medição de orifícios e superfícies inclinadas em até 85°, sendo adequada à medição de cilindros (MALET e SIRAT, 1998).

O equipamento em questão utiliza um cabeçote emissor de laser pontual modelo ConoProbe 1.000 da marca Optimet®. O processo se dá da seguinte forma: o cabeçote é acoplado ao equipamento CNC, que se movimenta nos eixos X e Y, enquanto mede e registra simultaneamente os pontos em Z. O equipamento pode captar até 1.000 pontos por segundo e o comprimento de onda com o qual trabalha é de 655 nm e potência

máxima de 1 mW, sendo possível o acoplamento de lentes de 50, 150 e 250 mm, o que influencia na precisão obtida e na profundidade de campo de aquisição de dados (SILVA, 2006). As propriedades ópticas superficiais dos materiais influenciam na precisão obtida por essa tecnologia, sendo importante ajustar alguns parâmetros referentes à potência e à frequência da digitalização para que seja possível maximizar a relação sinal-ruído (SNR), que representa a qualidade de sinal lido pelo sensor (BLANCO et al., 2015). Nesse sentido, tem-se que quanto mais escura a superfície maior a potência que deve ser utilizada para a captação de pontos (SILVA, 2006).

Há que se considerar a limitação de tamanho das peças que podem ser digitalizadas, visto que essas devem ser contidas no espaço de alcance dos trilhos de deslocamento do laser (x e y), equivalente a 430x330 mm. Além disso, há uma restrição de altura das peças, devido à maior lente disponível (250 mm) ter faixa de captura (z) de 180 mm. Portanto, o tamanho foi considerado um aspecto definidor da grandeza dos raios de arco que seriam estudados, visto que as peças curvadas deveriam ocupar um volume máximo de 430x330x180 mm. Quando por algum motivo as peças fossem maiores que isso deveriam ser passíveis de posicionamento dentro do equipamento para digitalização em mais de uma etapa. O equipamento de digitalização pode ser observado na Figura 41.

Figura 41 - Equipamento de digitalização 3D utilizado.



(a) Conjunto do equipamento de digitalização Digimill 3D (b) cabeçote de digitalização com incidência do laser na peça para captação dos pontos. Fonte: da autora (2021).

Considerando o exposto e visando uniformizar os procedimentos, todas as peças foram digitalizadas com a lente de 250 mm, que possui precisão (em z) de 0,1 mm. A resolução, ou seja, o espaçamento entre pontos (em x e y), foi ajustado de acordo com o tamanho da amostra, tendo-se em conta uma boa relação entre precisão e velocidade total do processo. A potência foi ajustada em 0,5 mW para que fosse possível a captura de todas as superfícies (áreas de coloração natural e áreas de coloração escura relativas às laterais cortadas a laser ou a diferentes tons do MDF), resultando em um valor de SNR (Signal quality) entre 80 e 90%. A resolução (espaçamento entre pontos em x e y), utilizada foi de 0,2 mm.

O equipamento Digimill 3D origina um arquivo no formato de texto que contém os dados da nuvem de pontos (coordenadas de todos os pontos em x,y e z). Cada arquivo foi importado no software Geomagic Qualify para processamento e análise de dados geométricos.

3.1.5 Análise digital comparativa entre geometria-alvo e geometria digitalizada

Na avaliação de formas geométricas, um dos principais indicadores de erros são as tolerâncias formais, uma vez que demonstram o quanto a superfície de um objeto difere da superfície ideal. Nesse sentido, para o controle dimensional e a avaliação de tolerâncias, dois modelos são necessários: o modelo correspondente ao ideal, ou projetado, e o modelo da situação existente, ou real. A identificação de erros e desvios formais da geometria digitalizada com relação à ideal permite compará-los, posteriormente, com as tolerâncias consideradas aceitáveis para dada geometria (YAU, 1996, 1998).

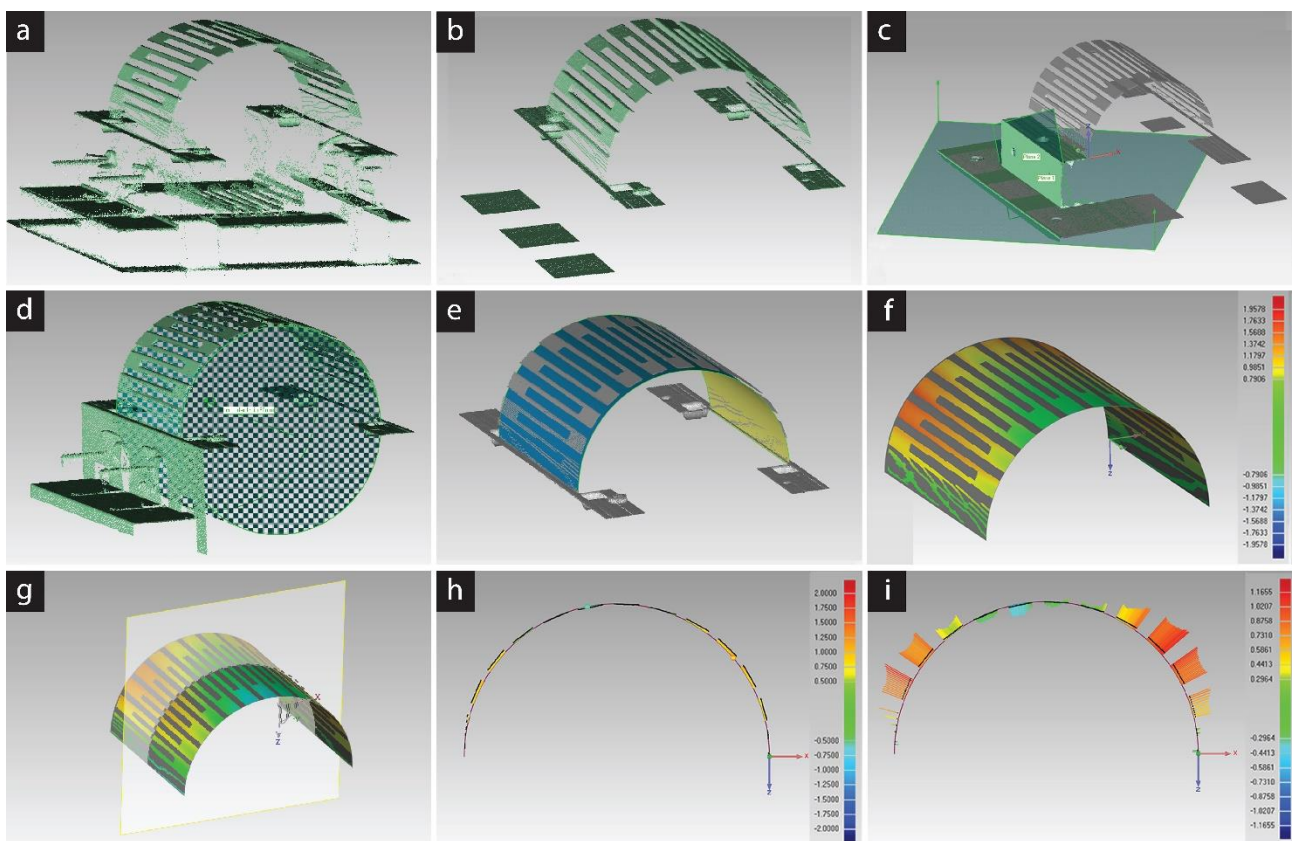
Alguns métodos de análise de geometrias foram investigados em trabalhos mais recentes, em especial os aplicados a geometrias cilíndricas (XIE e LU, 2017; YE et al., 2018; KORUMAZ et al., 2017). Notou-se a recorrência do uso de mapas de desvios geométricos (*deviation maps*), também chamados de mapas de erros. Esses mapas foram utilizados, dentre outros fins, para avaliar desvios de eixo e alterações na seção transversal das geometrias. Também foi constatado o uso de seções transversais da nuvem de pontos em alguns trechos da geometria para avaliar mais precisamente o desvio, comparando-se a seção transversal com uma geometria ideal e utilizando-se magnificação dos erros para aumentar a visibilidade desses. Assim, considerou-se pertinente incluir esses recursos nos métodos de análise deste estudo.

A análise de desvios consiste na disposição de geometrias para comparação, o que é feito pelo cálculo das distâncias entre elas. Essas geometrias podem ser representadas por modelos digitais ou nuvens de pontos, e pela diferenciação das distâncias por cores é possível gerar mapas de desvios. Na etapa de cálculo das distâncias, é possível determinar valores limites considerados, acima e/ou abaixo dos quais os desvios não serão computados, sendo representados na mesma cor dos desvios máximos computadas. Considerando-se que a análise pode conter erros de diferentes magnitudes pode-se efetuar o cálculo diversas vezes, em vista de analisar diferentes tipos de erros. A visualização pode se dar de diferentes maneiras, sendo algumas das mais comuns a indicação de erros com sinalização de direção por cor (sendo positivos os externos à superfície

de referência e negativos os internos, com relação à normal da superfície) e a indicação contínua de erros (por gradiente de cores). A análise específica para diagnóstico da origem e tipos de erros pode contar com o auxílio de outras análises, como fotografias, observação visual etc. (ANIL et al., 2013).

Com isso em vista, de posse dos dados oriundos da digitalização 3D das superfícies, essas foram analisadas no software Geomagic Qualify para averiguar o quanto a superfície se aproximou da geometria esperada. A seguir serão descritas algumas etapas e processos envolvidos nessas análises, que incluem: filtragem dos dados (incluindo ruídos), alinhamento da digitalização com coordenadas globais, simulação de um arco ideal e análise dos desvios geométricos. O processo completo pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 - Imagens do processo feito no Geomagic Qualify.



(a) importação da nuvem de pontos, (b) filtragem de dados, (c) alinhamento com as coordenadas do software, (d) simulação do cilindro ideal, (e) corte e filtro para representação apenas do cilindro 180°, (f) análise de desvios 3D, (g) posicionamento do corte para visualização dos desvios 2D (h) análise de desvios 2D e (i) análise de desvios 2D com magnificação do erro. Fonte: da autora (2021).

Segundo Varady, Martin e Cox (1997), o processamento de dados na engenharia reversa passa por fatores como a eliminação do ruído (que pode ter surgido por vibrações, reflexão etc.), a restauração de dados incompletos e a distribuição estatística das áreas escaneadas para avaliar se elas representam o todo. Assim, na etapa de filtragem de dados foram eliminados manualmente os pontos que não eram do interesse da análise (como a base de suporte do arco), bem como aqueles muitos discordantes do restante (que

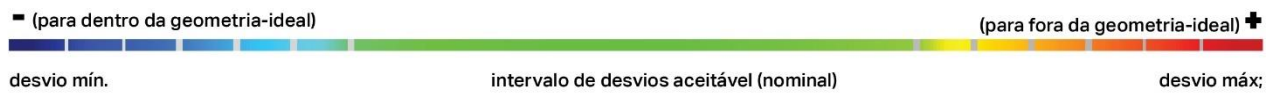
possivelmente foram originados por erros de digitalização), para que não distorcessem as análises. Além disso, foi aplicado o comando específico de filtragem do ruído (*reduce noise*).

Em seguida, foram conduzidas etapas de alinhamento da geometria escaneada em coordenadas globais conhecidas (eixos x, y e z) para facilitar a sobreposição de geometrias. Isso se deu pela detecção de padrões geométricos conhecidos (*features*), os quais foram utilizados como referência para aplicação do comando *feature-based alignment*. Assim, o plano base do equipamento de suporte digitalizado foi alinhado ao plano xy do software, mantendo a seção transversal do arco no plano xz. Foi então criado o cilindro ideal correspondente pelo do comando *feature*, inserindo-se plano de base, eixo central e raio. Os dados foram novamente filtrados de modo a deixar visível apenas a área de interesse: os cilindros. Ao final desse procedimento, foram obtidos os dois cilindros necessários para comparação geométrica: o ideal e o digitalizado.

De posse dos cilindros, foi feita a análise bidimensional de desvios. Essa análise foi feita a partir do seccionamento das duas geometrias (digitalizada e de referência) por um plano vertical perpendicular ao eixo do arco e posicionado ao centro da amostra (na metade de sua largura), tendo o corte uma largura de 1 mm e assim compreendendo os pontos da nuvem contidos nele. Esse seccionamento foi feito pelo comando 2D *Compare*, pelo qual criou-se uma imagem gráfica bidimensional da seção da geometria na qual os dois arcos estão presentes, para então ser feita análise do desvio da curvatura digitalizada com relação à curvatura de referência. A partir desse seccionamento também foram geradas imagens de desvios bidimensionais com magnificação de erros, na qual os desvios foram multiplicados por um fator de 10, deixando mais visível o que estava ocorrendo no material para que os fenômenos pudessem então ser analisados.

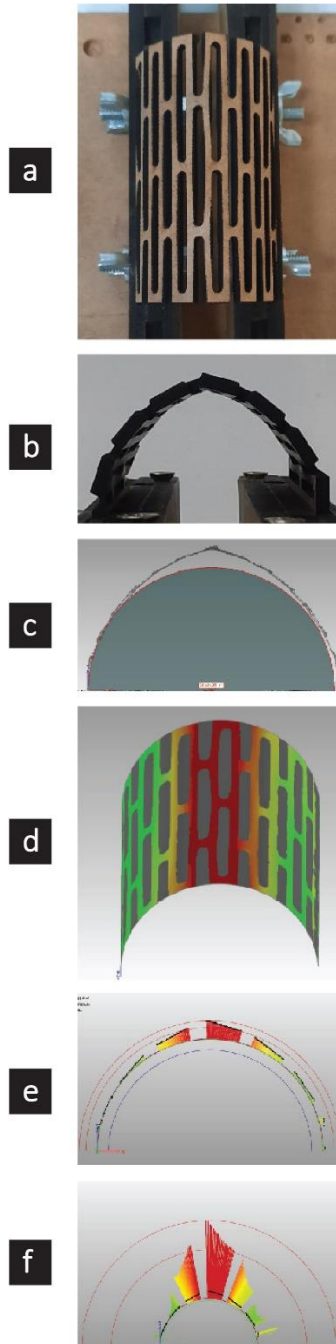
Também foi feita comparação tridimensional dos cilindros pelo comando 3D *Compare*, que gerou mapas de desvios geométricos. Para interpretação das cores dos mapas é fornecida uma escala que ilustra qual a medida de desvio referente a cada cor no gráfico. Essas escalas serão calibradas para possibilitar a comparação entre diferentes resultados, assim como considerando parâmetros de precisão e níveis de tolerância do estudo, pela determinação de valores para desvio máximo (acima do qual os erros não serão computados na representação) e desvio mínimo (abaixo do qual os erros não serão computados na representação), definindo assim o intervalo de erro considerado aceitável, e valores para desvio nominal máximo e mínimo, intervalo no qual o resultado é considerado coincidente com a geometria-alvo. Para cada etapa do estudo foram estabelecidos valores de tolerâncias consideradas adequados de acordo com a escala do arco. Os desvios foram representados por um gradiente de cores, no qual a cor vermelha indica os desvios positivos, ou seja, aqueles pontos da nuvem que se projetaram para o exterior da geometria de referência (a ideal) e a cor azul indica os pontos que se projetaram para o interior dessa geometria, configurando desvios negativos (Figura 43). O padrão de apresentação dos resultados da análise está ilustrado na Figura 44.

Figura 43 - Legenda de desvios.



Fonte: da autora (2021).

Figura 44 - Padrão de apresentação das figuras resultantes das análises.



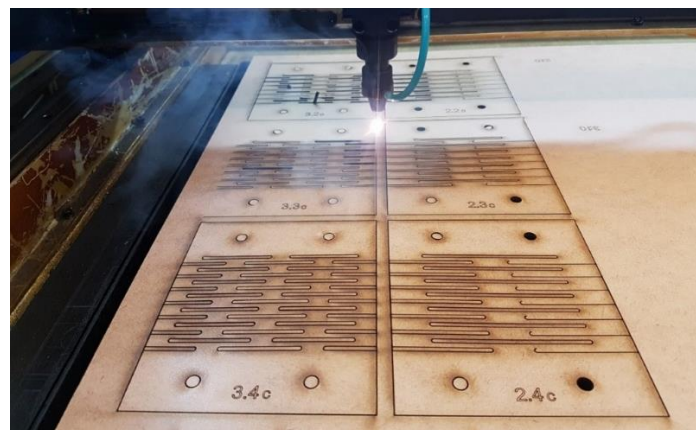
(a) foto superior; (b) foto frontal; (c) corte transversal constando geometria-alvo e geometria obtida; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erro. Fonte: da autora (2021).

3.2 ETAPA 1 DE ENSAIOS: SELEÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PADRÃO DE CORTE

Essa etapa teve como objetivo a busca pela definição dos parâmetros geométricos ideais (ou aproximados a esses) para o curvamento de amostras de MDF de 3 mm de espessura em arco e obtenção de uma geometria precisa, regular e estável de meio cilindro. A partir disso, esperava-se ter um resultado adequado para execução dos testes de ampliação da espessura do material e da escala dos parâmetros geométricos. Os testes envolvidos nessa etapa equivalem aos testes A, B, C e D (Tabela 4).

O corte das amostras de 3 mm (Figura 45) foi feito em equipamento de corte a laser da marca HengXing, modelo 4060SE, do Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da UFRGS (LIFEE), que tem potência nominal 60 W. Utilizou-se os parâmetros de 11 mm/s de velocidade, potência de corte de 85% nas linhas e 80% nos cantos dos cortes (equivalentes a 51 W e 48 W, respectivamente). Os cortes a laser resultantes desse equipamento tiveram aproximadamente 0,25 mm de espessura, de modo que o desenho foi adaptado para que o resultado tivesse as medidas desejadas.

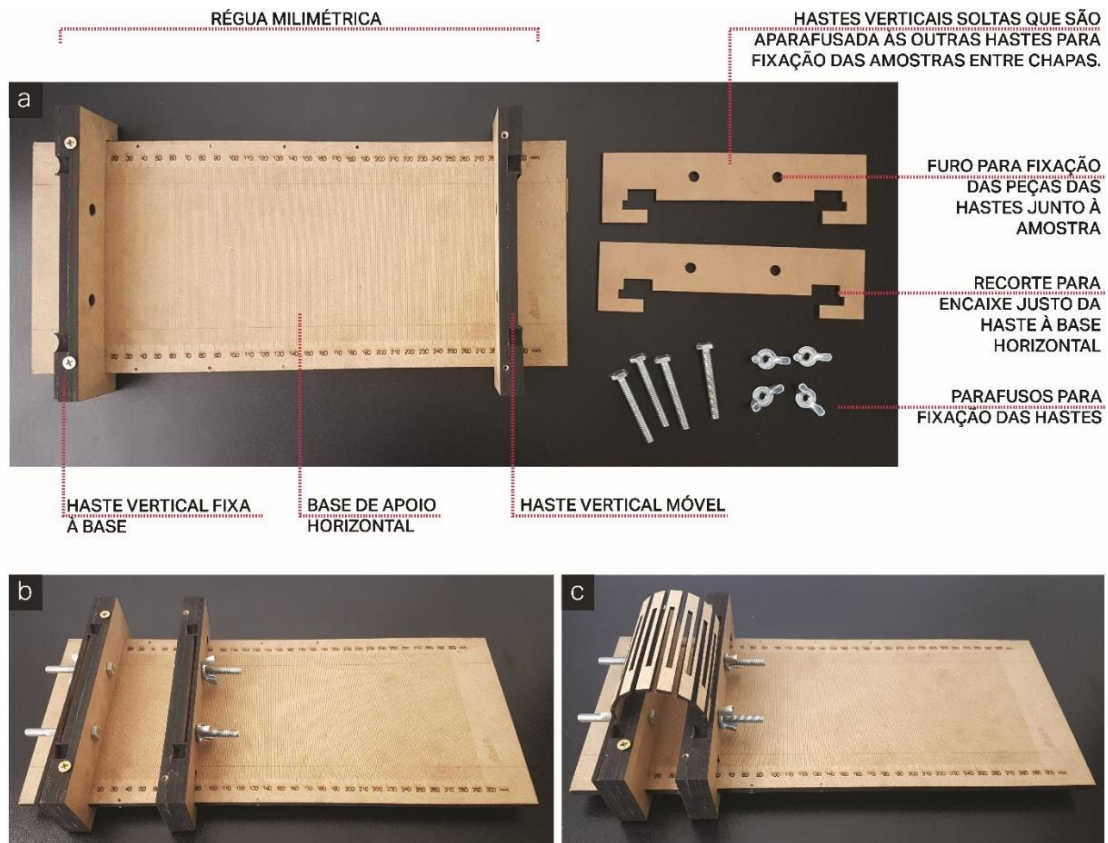
Figura 45 - Corte das amostras em equipamento laser.



Fonte: da autora (2021).

Após o corte das amostras, utilizou-se dispositivo também fabricado em MDF de 3 mm de espessura cortado a laser para curvamento das peças e análise do arco obtido. O dispositivo é composto por uma base e duas hastes de fixação das amostras. Para regulagem da posição de encaixe de cada amostra (equivalente ao diâmetro dessa) foi realizada gravação de escala milimétrica a laser na base. Quanto às hastes, elas possuem dois furos para fixação das amostras e garantem que essas sejam apoiadas em ângulo reto com relação à base horizontal. Uma das hastes é fixa junto ao marco zero do dispositivo enquanto a outra é móvel, para que se possa mover até o comprimento (equivalente ao diâmetro) desejado. Cada haste é composta por dois elementos que são unidos por parafusos e que fazem com que a amostra, encaixada no meio dos dois elementos, fique firme e alinhada, visto que essa é posicionada em um recorte do MDF da haste. O dispositivo pode ser visualizado na Figura 46.

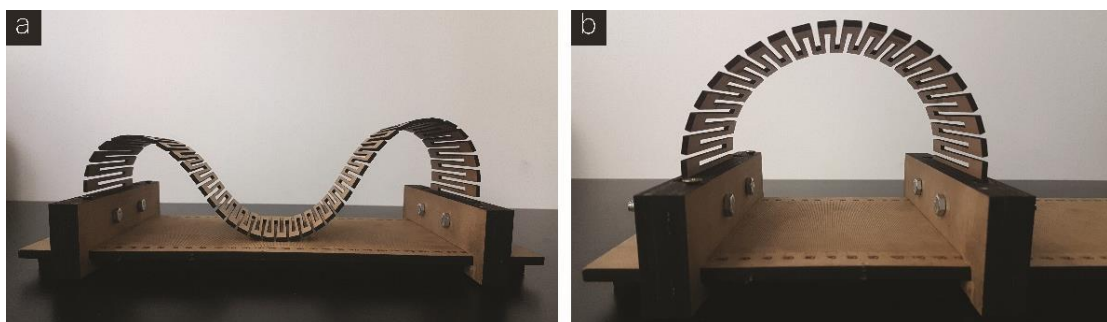
Figura 46 - Dispositivo projetado para suporte e inflexão das amostras em arco 180°.



(a) peças do dispositivo desmontado, (b) dispositivo montado e (c) dispositivo em uso com amostra em arco. Fonte: da autora (2021).

As amostras cortadas foram submetidas a análise visual, que teve como objetivo avaliar seu comportamento e eliminar aquelas que não demonstrassem flexibilidade ou rigidez suficientes para curvamento e permanência em arco da dimensão desejada. As análises visuais permitiram o ajuste fino de parâmetros pela observação da qualidade do arco ou de instabilidades, conforme se nota na Figura 47.

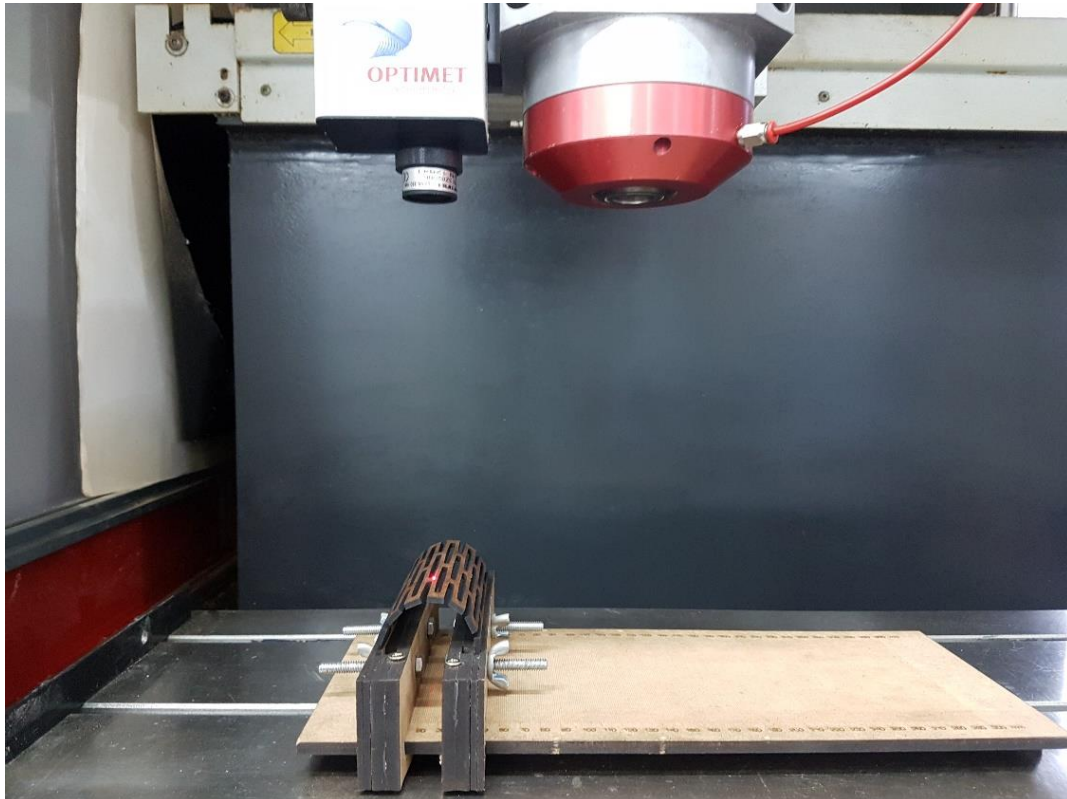
Figura 47 - Análise visual das amostras curvadas em arco.



(a) exemplo de testes preliminares de uma amostra que seria eliminada nesta etapa e em (b) exemplo de uma amostra considerada estável. Fonte: da autora (2021).

A partir do posicionamento das amostras, aquelas que foram capazes de ser curvadas nas geometrias desejadas foram digitalizadas para posterior análise geométrica. Todas as peças digitalizadas utilizaram os mesmos parâmetros já descritos no item 3.1.4. O processo de digitalização pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 - Processo de digitalização de uma amostra.



Fonte: da autora (2021).

A análise de desvios bi e tridimensionais, feita no software Geomagic Qualify, foi feita de forma padronizada para comparação entre os resultados obtidos. O espectro de desvios foi definido pelos parâmetros de 10 mm para os desvios máximos computados, 1,25 mm de desvio nominal máximo, -1,25 mm de desvio nominal mínimo (equivalentes a 5% da dimensão do raio do arco), 2,5 mm de desvio máximo crítico e -2,5 mm de desvio mínimo crítico (equivalente a 10% da dimensão do raio do arco).

Ao final dessa etapa foram selecionadas algumas amostras para prosseguimento dos ensaios. Essas amostras deveriam ser capazes de conformar geometrias de meio cilindro regulares, estáveis e precisas no MDF de 3 mm. Deu-se preferência para a seleção de uma amostra que demonstrasse o máximo de rigidez possível dentre aquelas que obtiveram resultados aceitáveis, visto que essa característica associada à flexibilidade para conformar determinada geometria comumente é desejada. Além dessa, selecionou-se, para efeitos comparativos, a amostra que demonstrasse o máximo de flexibilidade possível e resultados de precisão aceitáveis.

3.3 ETAPA 2 DE ENSAIOS: COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSOS DE CORTE

Antes de prosseguir para os testes de ampliação de escala do arco e conseqüente mudança no equipamento de corte das amostras foram feitos testes com os dois processos de corte (fresamento CNC e corte a laser). Esse teste visou a verificação de possíveis diferenças de resultados devido à interferência de cada processo, e foi denominado teste E. As duas amostras selecionadas na primeira etapa foram então cortadas em MDF de espessura 3 mm na fresadora CNC e passaram por todas as etapas de ensaio padrão para avaliação de sua geometria.

Essa etapa foi considerada necessária devido às diferenças consideráveis de operação e resultados dos dois equipamentos. Quando da geração dos padrões de corte, há que se considerar alguns parâmetros dos processos de fabricação, tendo cada tecnologia os seus limitantes específicos (BIANCONI e FILLIPUCCI, 2019; CAPONE e LANZARA, 2019; HOLTERMAN, 2018). A escolha dentre os processos de corte depende da espessura do material e do tamanho do objeto final (CAPONE e LANZARA, 2019; HOLTERMAN, 2018).

O corte a laser funciona pelo deslocamento de um feixe de laser sobre o material a ser cortado, o que pode ocorrer por diferentes sistemas CNC. Dentre esses, tem-se o denominado sistema de óptica móvel (*flying optics*), no qual a mesa onde está o material permanece imóvel, enquanto o cabeçote que contém o feixe de laser (paralelo ao eixo z) se move nas direções horizontais de x e y (GANEEV, 2014). A qualidade do acabamento é em grande parte medida pela rugosidade da superfície cortada e pela largura do corte, que são, por sua vez, influenciadas por parâmetros como a potência do laser e a velocidade do corte (RAJESH et al., 2019).

Algumas vantagens desse tipo de corte são a alta velocidade do processo, a precisão do feixe de laser (permitindo padrões de corte menores), a ausência de contato da ferramenta com a peça e de vibração do equipamento, o que pode ser útil no corte de materiais frágeis, quebradiços ou muito finos (CAPONE e LANZARA, 2019; HOLTERMAN, 2018; BELFORTE e JAFFERSON, 2016; RAJESH et al., 2019). Segundo os autores, entretanto, há desvantagens, como as laterais escuras do corte, a necessidade de um espaçamento adequado entre cortes para evitar áreas de queima e a limitação da espessura que pode ser cortada sem que se perca qualidade (sendo a máxima normalmente utilizada de 12 mm e de 6 mm para cortes com maior qualidade), visto também que a espessura do material afeta a largura dos cortes.

O fresamento por CNC é um método automatizado de usinagem que opera por subtração, ou seja, o processo de fabricação se dá por remoção de material, e é voltado a dar forma a uma peça. Seu funcionamento se baseia em uma ferramenta cortante (a fresa) que faz movimentos de rotação e translação sobre o material a ser cortado (SILVA, 2011). No caso do fresamento por CNC a precisão também é alta, porém há que se ter atenção aos parâmetros de corte para que o resultado tenha maior qualidade (MALIK et al., 2019). Exemplos de fatores que afetam o acabamento superficial: velocidade de rotação, profundidade de corte, taxa de avanço, formato da fresa, homogeneidade ou não do material a ser cortado e seus defeitos estruturais (como

deflexões), formação de cavacos, perturbações aleatórias (como vibrações), entre outros (ARIAS, 1983; MAHESH, MUTHU e DEVADASAN, 2015). Com relação aos parâmetros de corte, nota-se uma deterioração da superfície proporcional ao aumento da taxa de avanço do corte (ARIAS, 1983), notando-se em materiais como o MDF também a influência da velocidade de corte (DAVIM, CLEMENTE e SILVA, 2009; PRAKASH e PALANIKUMAR, 2010). Nesse sistema, tem-se a vantagem de não haver limitantes de espessura do material e de não haver queima das laterais, porém, além de se considerar os aspectos mencionados, há que se levar em conta o diâmetro da fresa (que pode limitar os padrões de corte viáveis) e o tamanho do padrão com relação à espessura do material (CAPONE e LANZARA, 2019; HOLTERMAN, 2018).

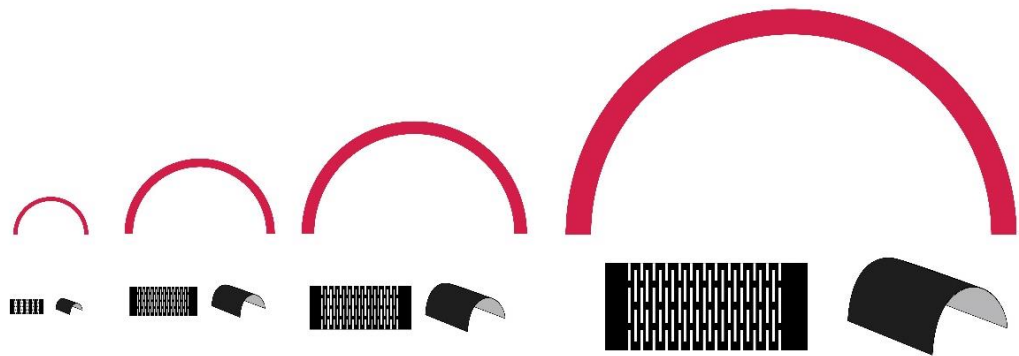
Ao final dessa etapa as geometrias obtidas pelas amostras de MDF de 3 mm cortadas na fresadora CNC foram comparadas àquelas obtidas por amostras de desenho idêntico cortadas no equipamento de corte a laser. Pela comparação dos resultados pôde ser avaliada a necessidade de ajustes no desenho para adequação ao equipamento e prosseguimento dos ensaios de ampliação de escala das amostras.

3.4 ETAPA 3 DE ENSAIOS: DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA CURVATURA DO MDF

Após a definição dos parâmetros geométricos ideais para curvamento do MDF de 3 mm e a comparação entre os processos de corte a laser e fresamento CNC foi feito o teste de ampliação da escala do arco. Esses testes foram denominados testes F e consistiram na alteração da espessura das amostras (denominada Índice 5), adaptando-se os demais parâmetros proporcionalmente a essa. A etapa teve como objetivo a análise dos efeitos decorrentes da ampliação da escala dos arcos na geometria resultante.

Conforme mencionado anteriormente, nessa etapa foram ampliadas duas amostras que resultaram aceitáveis dos ensaios anteriores: a amostra mais rígida a obter um resultado geométrico aceitável e a mais flexível dentro daquelas com parâmetros geométricos similares. Para ampliação da escala foram repetidos os procedimentos do ensaio padrão porém com chapas de MDF de espessuras de 6, 9 e 18 mm, envolvendo simulação, fabricação de protótipos, curvamento, digitalização e análise digital. Nesse caso, todos os parâmetros geométricos foram ampliados proporcionalmente com relação à amostra de 3 mm de espessura nominal (espessura real de 2,8 mm), sendo, portanto, multiplicados por um fator de 2,14, 3,21 e 6,43, respectivamente (visto que as demais chapas de MDF apresentaram precisão com relação à sua espessura nominal). A proporção dos raios, comprimento da área de cortes das amostras e espessuras está representada na Figura 49.

Figura 49 - Esquema da proporção de espessura, comprimento e raio de arco entre amostras de MDF.



ESPESSURA NOMINAL/ REAL (mm)	3/2,8	6/6	9/9	18/18
RAIO DO ARCO (APROXIMADO)	25	50	75	150
FATOR DE AMPLIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PADRÃO DE CORTE	1	2,14	3,21	6,43

Fonte: da autora (2021).

Como as amostras mais espessas não poderiam ser cortadas no equipamento de corte a laser disponível (visto que esse só comporta amostras com espessura de até 6 mm), todas as amostras dessa etapa foram cortadas em uma fresadora CNC. Isso também foi considerado interessante uma vez que em construções de MDF normalmente esse tipo de equipamento é utilizado, de modo que o experimento se aproximaria mais de uma situação real. As amostras de espessura 3 mm e 6 mm, apesar de a primeira espessura já haver sido cortada em equipamento laser e a segunda também apresentar essa possibilidade, foram incluídas para evitar possíveis diferenças de resultados decorrentes da diferença de equipamentos utilizados. Além disso, com relação às amostras selecionadas nos ensaios anteriores, possíveis diferenças que pudessem surgir entre o corte em equipamento laser e fresadora CNC foram analisados na etapa de ensaios anterior.

O equipamento utilizado para corte das amostras foi uma fresadora CNC da marca Jaraguá, modelo Solid 2818, que possui características conforme Tabela 5. Foram utilizadas fresas diferentes para o corte das chapas, proporcionais à largura dos cortes e espessura dessas. O corte de cada chapa foi feito em duas etapas, a primeira sendo os cortes internos da peça e a segunda os externos. Em todos os casos a tolerância utilizada para os cortes foi de 0,025 mm e a velocidade de rotação 12.000 rpm. Na Figura 50 pode ser observado o momento do corte da chapa de 6 mm.

Tabela 5 - Características técnicas da fresadora CNC utilizada: Jaraguá modelo Solid 2818.

Características Técnicas
Velocidade de deslocamento: 15 m/min
Área útil de trabalho (X, Y, Z): 2800x1850x200 mm
Motor Spindle: Spindle 4.7CV – 18.000 RPM
Esquadro: Cilindro de esquadro para encosto da chapa
Motor de movimentação: Easy servo motor 4NM
Sistema de redução: Redutor Planetário com engrenagem helicoidal
Tração eixo X, Y: Cremalheira helicoidal com precisão H7
Tração eixo Z: Fuso de esferas, Precisão C7
Guia linear: 20 mm de alta precisão
Estrutura: Monobloco
Comando Operacional: Eding CNC Plataforma Windows Original
Massa Operacional: 1200 kg

Fonte: Adaptado de <https://jaraguacnc.com.br/solid.php#fichatecnica>.

Figura 50 - Corte das amostras de 6 mm na fresadora CNC.



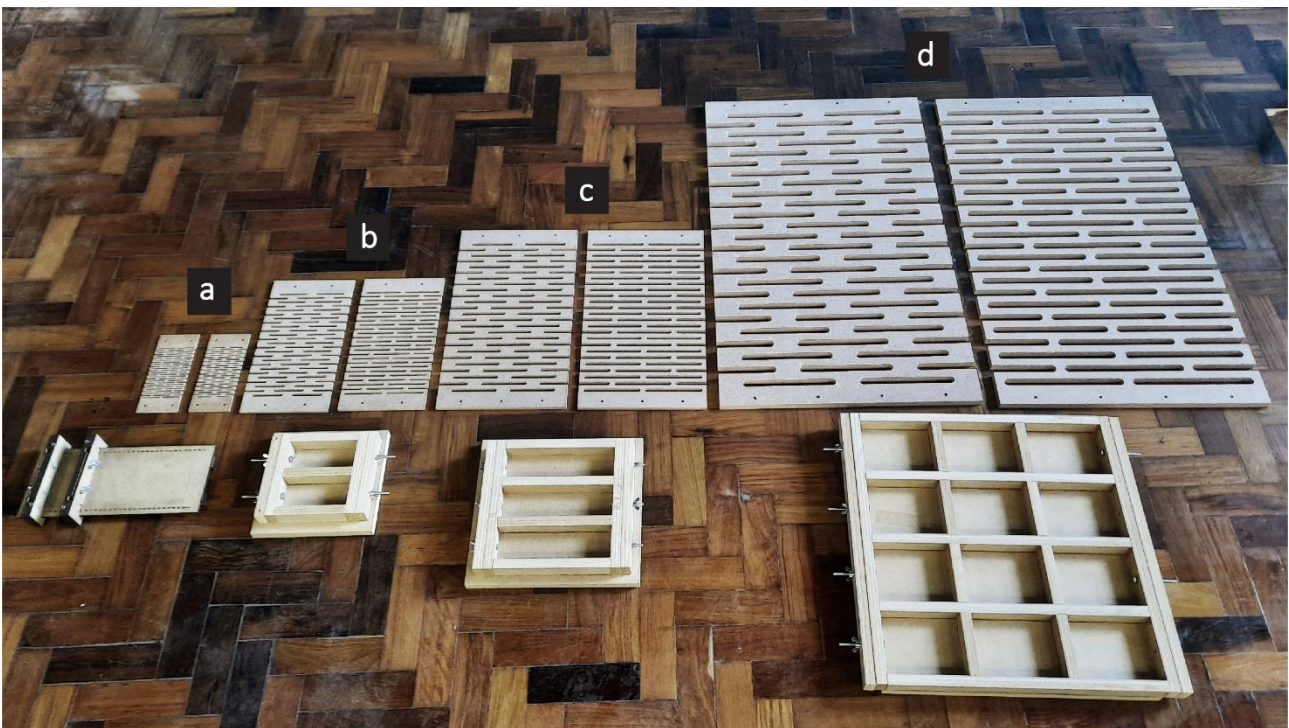
Fonte: da autora (2021).

Para o corte das chapas de 3 mm e 6 mm foi utilizada fresa de 2 mm de diâmetro. O corte da chapa de 3 mm teve profundidade final de 3,1 mm e foi feito em dois passes, enquanto o corte da chapa de 6 mm teve profundidade final de 6,1 mm e foi feito em três passes. A taxa de avanço utilizada foi 1000 mm/min, a

velocidade de mergulho de 1000 mm/min, sendo o passo lateral de 1,4mm e o vertical 2,1 mm. No corte das chapas de 9 mm e 18 mm foi utilizada fresa de diâmetro 6 mm. No caso da chapa de 9 mm os cortes foram feitos em apenas um passe enquanto na chapa de 18 mm foram feitos dois passes. A taxa de avanço utilizada foi 3000 mm/min, a velocidade de mergulho de 1500 mm/min, sendo o passo lateral de 4,2mm e o vertical 10 mm.

Conforme mencionado anteriormente, para o curvamento das peças de 3 mm foi utilizado o mesmo dispositivo das etapas anteriores. Já para as peças das demais espessuras foram fabricados dispositivos de suporte com dimensões adequadas para posicionar as peças configurando os arcos de cada raio desejado. As peças para montagem dos dispositivos também foram cortadas na fresadora CNC, buscando-se a maior precisão possível. Diferentemente do dispositivo para curvamento das peças de 3 mm de espessura, os demais não apresentavam possibilidade de ajuste do raio, visto que se buscava apenas conferir a possibilidade de um raio específico. Na Figura 51 tem-se uma foto dos suportes desenvolvidos para cada peça.

Figura 51 - Dispositivos de suporte desenvolvidos para fixação e curvamento das amostras.



Amostras e abaixo seus respectivos dispositivos de suporte: (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm e (d) 18 mm. Fonte: da autora (2021).

A partir do posicionamento das amostras em seus respectivos suportes (Figura 52), aquelas que foram capazes de ser curvadas nas geometrias desejadas foram digitalizadas para posterior análise geométrica. A resolução (espaçamento entre pontos em x e y) foi ajustada de acordo com o tamanho das peças para otimização do tempo de processo, utilizando-se 0,2 mm para as amostras de 3 e 6 mm, 0,25 mm para a

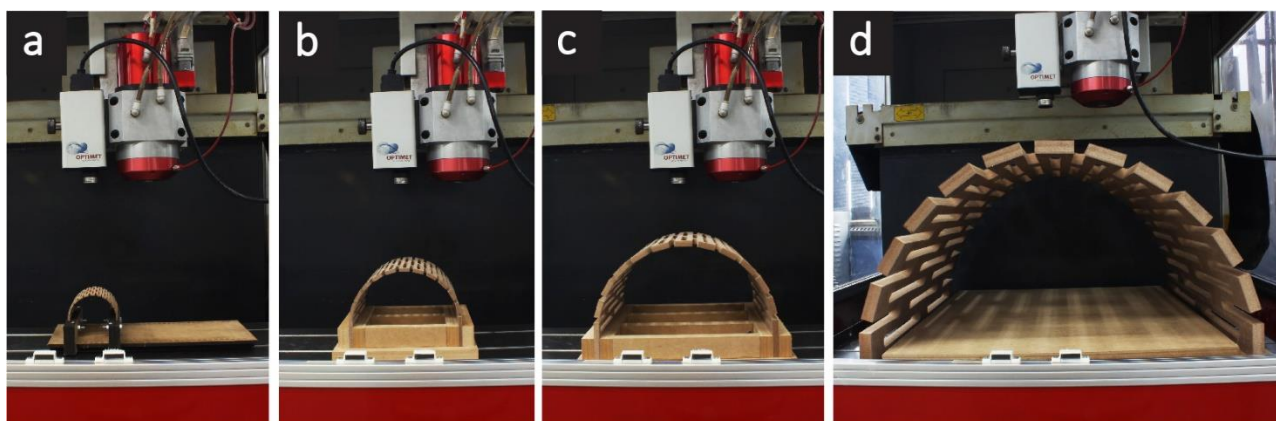
amostra de 9 mm e 0,3 mm para a de 18 mm. O processo de digitalização de cada peça pode ser observado na Figura 53.

Figura 52 - Foto de uma amostra de cada espessura do teste F posicionada no seu respectivo suporte.



Amostras posicionadas em seus dispositivos: (a) amostra de 18 mm; (b) 9 mm; (c) 6 mm; (d) 3 mm. Fonte: da autora (2021).

Figura 53 - Fotos da digitalização 3D das peças do teste F.



Digitalização das peças: (a) amostra de 3 mm, (b) amostra de 6 mm, (c) amostra de 9 mm e (d) amostra de 18 mm. Fonte: da autora (2021).

A análise de desvios bi e tridimensionais também foi feita de forma padronizada e com tolerâncias proporcionais para que se pudesse comparar os resultados obtidos entre amostras. O espectro de desvios foi definido pelos parâmetros de 5% da dimensão do raio do arco para desvio nominal e 10% da dimensão do raio do arco para o desvio máximo crítico, ambos tanto para desvios positivos quanto negativos. Desse modo, as tolerâncias para as amostras de cada espessura resultaram em valores conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tolerâncias de desvios utilizados nas análises digitais para cada uma das amostras.

ESPESSURA AMOSRA (mm)	TOLERÂNCIAS DE DESVIOS (mm)			
	DESVIO MÁXIMO (-)	DESVIO NOMINAL (-)	DESVIO NOMINAL (+)	DESVIO MÁXIMO (+)
3	-4,5	-2,5	2,5	4,5
6	-9,63	-4,81	4,81	9,63
9	-14,44	-7,22	7,22	14,44
18	-28,93	-14,47	14,47	28,93

Fonte: da autora (2021).

As análises de desvios seguiram os mesmos procedimentos das análises das etapas anteriores, resultando em três imagens: seção de 1 mm de espessura no centro da geometria-alvo e geometria obtida para análise bidimensional de desvios, análise bidimensional com magnificação de erro em 10 vezes e análise tridimensional. Os desvios foram representados por um gradiente de 13 cores.

A partir da análise digital dos arcos de todas as espessuras com suas respectivas geometrias-alvo, puderam ser levantadas hipóteses sobre os fenômenos mecânicos que ocorrem no material quando do curvamento. Além disso, pela comparação entre os resultados de arcos de diferentes escalas pôde ser inferida a influência da espessura como fator influenciador do curvamento do MDF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

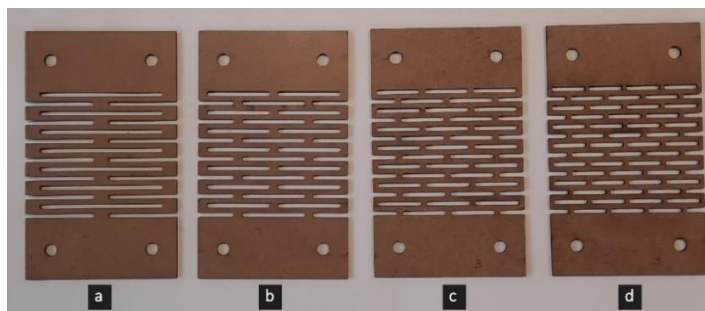
Neste capítulo os objetivos, dados e procedimentos de cada teste são descritos, bem como os resultados obtidos. Ao final do capítulo é apresentada uma discussão com base nesses resultados, analisando-os tendo como base a literatura existente e buscando identificar fenômenos e tendências de comportamento do material com *kerfing*.

4.1 ETAPA 1 DE ENSAIOS: SELEÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO PADRÃO DE CORTE

4.1.1 TESTE A

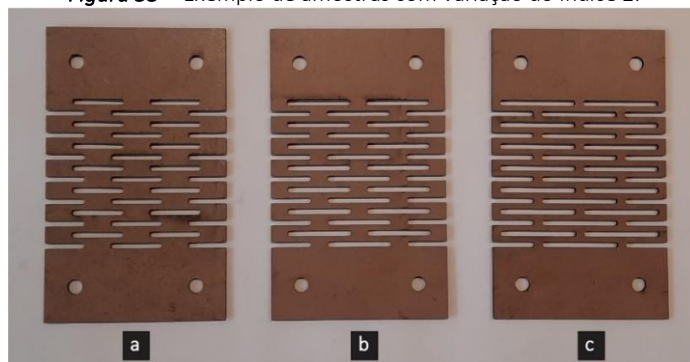
Nesses testes buscou-se inicialmente a aproximação de um arco de raio 25 mm a partir da variação dos Índices 1 e 2 (quantidade máxima de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra e percentual de sobreposição dos cortes), e teve por objetivo obter um panorama geral do comportamento das amostras. A variação do Índice 1 está ilustrada na Figura 54 e do Índice 2 na Figura 55. Ao total foram testadas quatro variações do índice 1: 2, 3, 4 e 5 e nove variações para o índice 2: cortes 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 vezes maiores do que o comprimento dos segmentos entre cortes, equivalentes a percentuais de sobreposição dos cortes de 50, 67, 75, 80, 83, 86, 88, 89 e 90%. Os dados geométricos das amostras constam na Tabela 7.

Figura 54 - Exemplo de amostras com variação do índice 1.



Amostras com número de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão do conjunto igual a (a) dois; (b) três; (c) 4 e (d) 5. Fonte: da autora (2021).

Figura 55 - Exemplo de amostras com variação do Índice 2.



Amostras com comprimento dos cortes com relação ao dos segmentos sem cortes de: (a) 2; (b) 6; (c) 10. Fonte: da autora (2021).

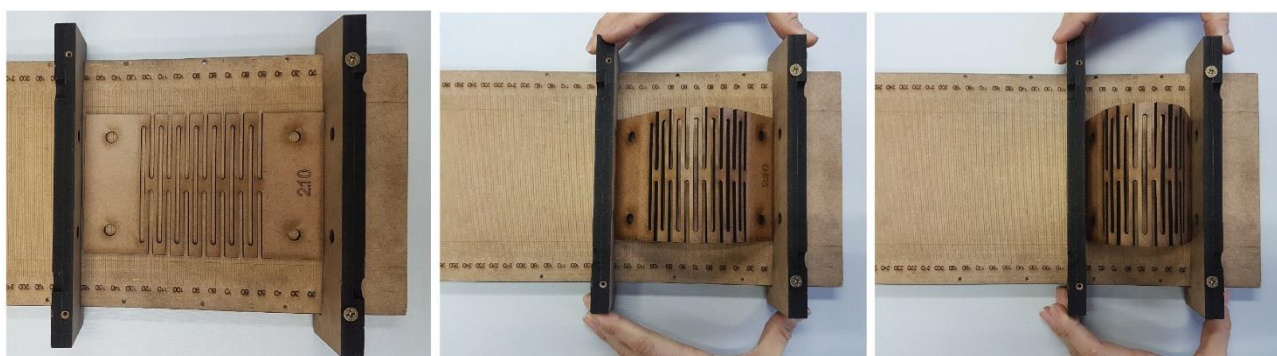
Tabela 7 - Dados geométricos das amostras do teste A.

TESTES A						
CÓDIGO DA AMOSTRA	ÍNDICE 1 QUANT.MÁXIMA DE SEGMENTOS PERPENDICULARES AO EIXO DE FLEXÃO DO ARCO POR LINHA DE CORTE	ÍNDICE 2 SOBREPOSIÇÃO DOS CORTES		ÍNDICE 3 LARGURA TOTAL DA PEÇA (mm)	ÍNDICE 4 RAIO DE ARCO DESEJADO (mm)	ÍNDICE 5 ESPESSURA NOMINAL DA AMOSTRA (mm)
		RELAÇÃO COMPRIMENTO DOS CORTES/ COMPRIMENTO DOS SEGMENTOS	(%)			
A-Q02.S02.L90.R25.E03	2	2	50,0	90	25	3
A-Q02.S03.L90.R25.E03	2	3	66,7	90	25	3
A-Q02.S04.L90.R25.E03	2	4	75,0	90	25	3
A-Q02.S05.L90.R25.E03	2	5	80,0	90	25	3
A-Q02.S06.L90.R25.E03	2	6	83,3	90	25	3
A-Q02.S07.L90.R25.E03	2	7	85,7	90	25	3
A-Q02.S08.L90.R25.E03	2	8	87,5	90	25	3
A-Q02.S09.L90.R25.E03	2	9	88,9	90	25	3
A-Q02.S10.L90.R25.E03	2	10	90,0	90	25	3
A-Q03.S02.L90.R25.E03	3	2	50,0	90	25	3
A-Q03.S03.L90.R25.E03	3	3	66,7	90	25	3
A-Q03.S04.L90.R25.E03	3	4	75,0	90	25	3
A-Q03.S05.L90.R25.E03	3	5	80,0	90	25	3
A-Q03.S06.L90.R25.E03	3	6	83,3	90	25	3
A-Q03.S07.L90.R25.E03	3	7	85,7	90	25	3
A-Q03.S08.L90.R25.E03	3	8	87,5	90	25	3
A-Q03.S09.L90.R25.E03	3	9	88,9	90	25	3
A-Q03.S10.L90.R25.E03	3	10	90,0	90	25	3
A-Q04.S02.L90.R25.E03	4	2	50,0	90	25	3
A-Q04.S03.L90.R25.E03	4	3	66,7	90	25	3
A-Q04.S04.L90.R25.E03	4	4	75,0	90	25	3
A-Q04.S05.L90.R25.E03	4	5	80,0	90	25	3
A-Q04.S06.L90.R25.E03	4	6	83,3	90	25	3
A-Q04.S07.L90.R25.E03	4	7	85,7	90	25	3
A-Q04.S08.L90.R25.E03	4	8	87,5	90	25	3
A-Q04.S09.L90.R25.E03	4	9	88,9	90	25	3
A-Q04.S10.L90.R25.E03	4	10	90,0	90	25	3
A-Q05.S02.L90.R25.E03	5	2	50,0	90	25	3
A-Q05.S03.L90.R25.E03	5	3	66,7	90	25	3
A-Q05.S04.L90.R25.E03	5	4	75,0	90	25	3
A-Q05.S05.L90.R25.E03	5	5	80,0	90	25	3
A-Q05.S06.L90.R25.E03	5	6	83,3	90	25	3
A-Q05.S07.L90.R25.E03	5	7	85,7	90	25	3
A-Q05.S08.L90.R25.E03	5	8	87,5	90	25	3
A-Q05.S09.L90.R25.E03	5	9	88,9	90	25	3
A-Q05.S10.L90.R25.E03	5	10	90,0	90	25	3

Fonte: da autora (2021).

Visando à análise da flexibilidade, após o corte as amostras foram posicionadas no dispositivo apresentado no item 3.2, porém, ao invés de fixá-las nas hastes essas foram utilizadas para comprimir as amostras. Esse processo foi feito por movimento manual de deslizamento horizontal de uma das hastes. Esse movimento de aproximação se deu gradualmente de modo a formar um arco (Figura 56) até o rompimento ou fratura da amostra (o que ocorresse antes), medindo-se a distância mínima atingida por cada uma (ponto de deslocamento máximo da amostra). As amostras foram deslocadas até a distância mínima de 50 mm, que corresponde ao raio de arco de 25 mm que se desejava obter.

Figura 56 - Simulação do movimento de curvamento das amostras.



Fonte: da autora (2021).

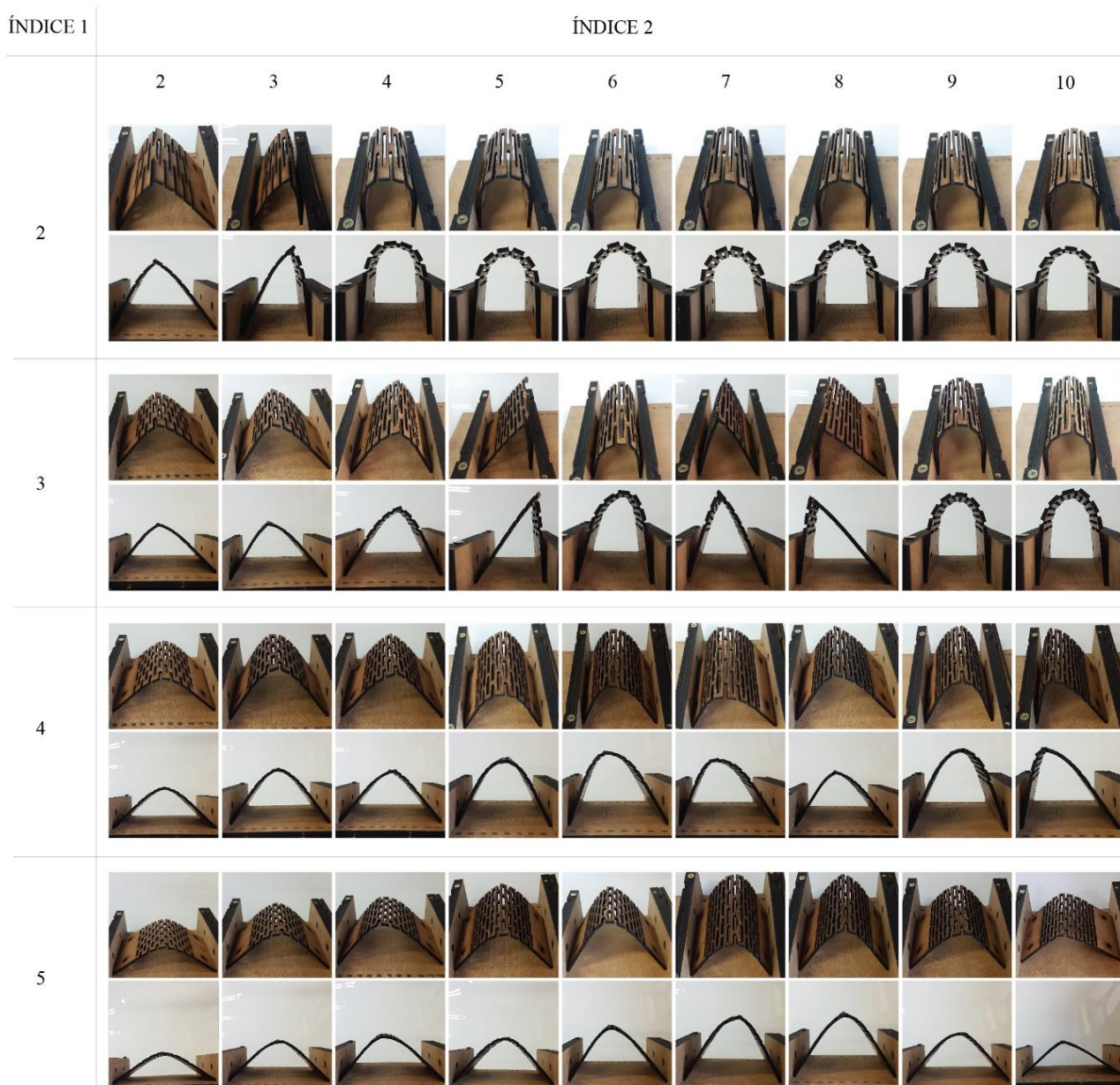
Por esse processo visou-se eliminar as amostras que não tivessem capacidade de atingir o arco de raio ideal e que, portanto, não seriam mais utilizadas nas análises. Além disso, a partir do experimento foi possível observar fenômenos e confirmar tendências de comportamento do material com relação aos parâmetros geométricos de corte. Os resultados dos testes constam na Tabela 8, Quadro 1, Gráfico 1 e Gráfico 2.

Tabela 8 - Resultados teste A: distância mínima obtida entre as extremidades das amostras quando da aproximação (em milímetros).

TESTES A: RESULTADOS							
DISTÂNCIA MÍNIMA OBTIDA ENTRE AS DUAS EXTREMIDADES DA AMOSTRA (mm)							
ÍNDICE 1 = 2		ÍNDICE 1 = 3		ÍNDICE 1 = 4		ÍNDICE 1 = 5	
CÓDIGO AMOSTRA		CÓDIGO AMOSTRA		CÓDIGO AMOSTRA		CÓDIGO AMOSTRA	
A-Q02.S02.L90.R25.E03	92	A-Q03.S02.L90.R25.E03	109	A-Q04.S02.L90.R25.E03	117	A-Q05.S02.L90.R25.E03	129
A-Q02.S03.L90.R25.E03	57	A-Q03.S03.L90.R25.E03	99	A-Q04.S03.L90.R25.E03	101	A-Q05.S03.L90.R25.E03	117
A-Q02.S04.L90.R25.E03	50	A-Q03.S04.L90.R25.E03	81	A-Q04.S04.L90.R25.E03	105	A-Q05.S04.L90.R25.E03	113
A-Q02.S05.L90.R25.E03	50	A-Q03.S05.L90.R25.E03	69	A-Q04.S05.L90.R25.E03	87	A-Q05.S05.L90.R25.E03	114
A-Q02.S06.L90.R25.E03	50	A-Q03.S06.L90.R25.E03	50	A-Q04.S06.L90.R25.E03	82	A-Q05.S06.L90.R25.E03	100
A-Q02.S07.L90.R25.E03	50	A-Q03.S07.L90.R25.E03	51	A-Q04.S07.L90.R25.E03	88	A-Q05.S07.L90.R25.E03	89
A-Q02.S08.L90.R25.E03	50	A-Q03.S08.L90.R25.E03	79	A-Q04.S08.L90.R25.E03	99	A-Q05.S08.L90.R25.E03	94
A-Q02.S09.L90.R25.E03	50	A-Q03.S09.L90.R25.E03	64	A-Q04.S09.L90.R25.E03	76	A-Q05.S09.L90.R25.E03	109
A-Q02.S10.L90.R25.E03	50	A-Q03.S10.L90.R25.E03	59	A-Q04.S10.L90.R25.E03	76	A-Q05.S10.L90.R25.E03	124

Planilha de resultados de distância mínima alcançada entre as extremidades de cada amostra quando do curvamento manual dessas, em função do Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) e Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra). Valores em milímetros. Fonte: da autora (2021).

Quadro 1 - Resultados teste A: fotos do curvamento e distância mínima obtida pela aproximação das extremidades das amostras.



Quadro de fotografias do curvamento máximo de cada amostra com variações do Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) e Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra). Fonte: da autora (2021).

Gráfico 1 - Resultados teste A: Influência do Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) no curvamento manual das amostras.

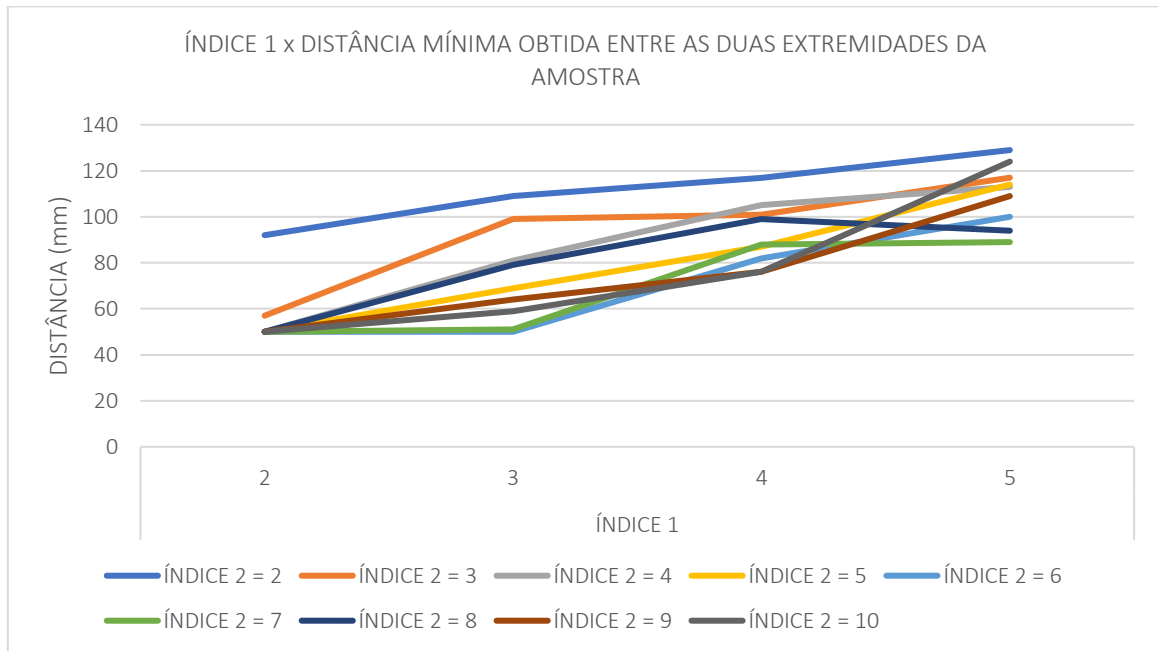


Gráfico da relação entre a distância mínima obtida entre as duas extremidades da amostra X Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) para amostras de amostras de Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 2,3,4,5,6,7,8,9 e 10. Fonte: da autora (2021).

Gráfico 2 - Resultados teste A: Influência do Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra) no curvamento manual das amostras.

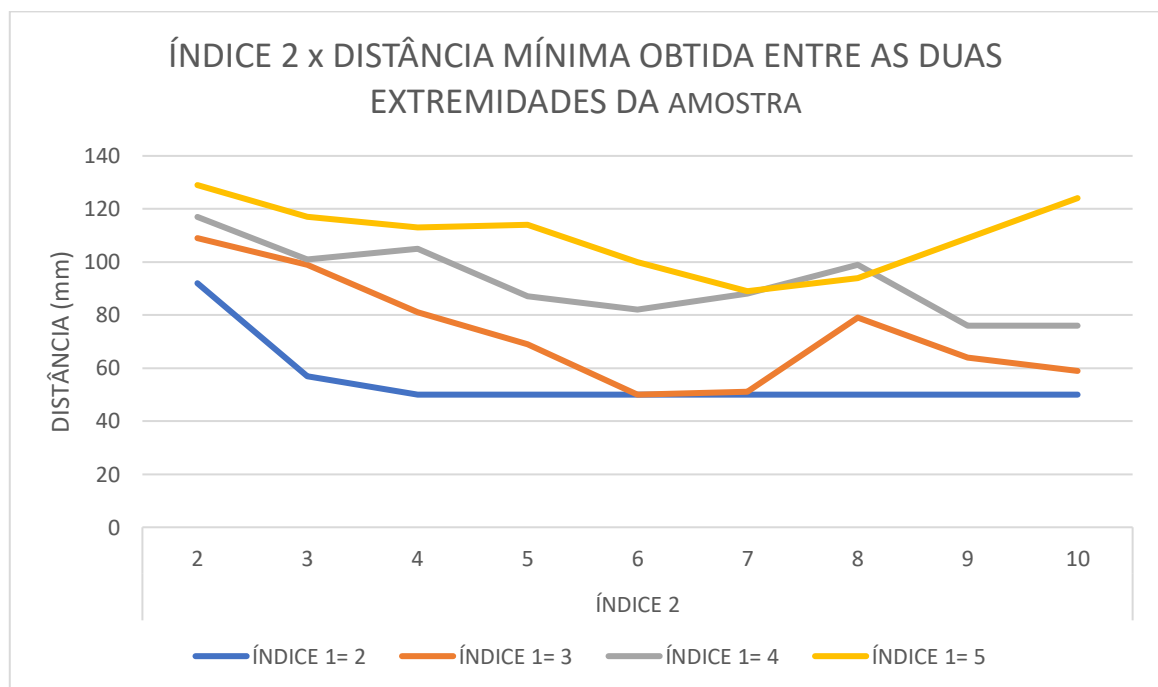


Gráfico da relação entre a distância mínima obtida entre as duas extremidades da amostra X Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra) para amostras de amostras de Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) = 2,3,4 e 5. Fonte: da autora (2021).

Pela observação dos resultados, pode-se inferir algumas tendências e compará-las com o relatado pela literatura. Foi observado, conforme apontado por (DELIMONT, 2014; GUTOWSKI, 2017; MATINI e RAMTIN, 2018; NELSON et al., 2016a), uma tendência à maior rigidez das amostras com maior número de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão (índice 1), de modo que na medida em que se aumenta esse valor as amostras não conseguem atingir a distância desejada entre suas extremidades. Isso se justifica, pois, mantendo-se a largura da peça e ao aumentar a quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão do conjunto se está reduzindo o comprimento dos segmentos paralelos a esse eixo. Assim, a capacidade de torção desses segmentos é reduzida e, considerando que esse esforço é o principal responsável pelo curvamento do conjunto, esse se torna significativamente mais rígido.

A partir desses testes, foi observado que as únicas amostras que resultaram flexíveis o suficiente para atingir o deslocamento até a distância de 50 mm (equivalente ao diâmetro do meio cilindro desejado) foram aquelas com no máximo dois segmentos perpendiculares ao eixo de flexão do conjunto (índice 1=2). Apesar disso, notou-se que essas amostras também resultaram mais suscetíveis a movimentos parasíticos (Figura 57) o que condiz com o observado por Delimont (2014).

Figura 57 - Fotografia ilustrativa dos movimentos parasíticos existentes em amostras com Índice 1=2.



Fonte: da autora (2021).

Além disso, há uma tendência de que quanto maior o comprimento de sobreposição dos cortes maior a capacidade de aproximação das extremidades da amostra. Isto ficou mais evidente no caso das amostras de Índice 1= 2 e 3, que apresentaram maior flexibilidade, em alguns casos inclusive atingindo a distância mínima desejada. No caso das amostras de Índice 1 = 4 e 5 essa tendência também existe, porém, de maneira menos evidente.

Em alguns casos foi observado um comportamento aleatório na relação entre o comprimento de sobreposição dos cortes (índice 2) e a distância máxima de deslocamento das amostras, ou seja, o aumento da sobreposição dos cortes não acompanhou necessariamente a maior flexibilidade dessas. Ademais, em muitos casos o rompimento das peças ocorreu de modo abrupto e de modo localizado em algumas partes da peça (Figura 58). Assim, as peças acabaram por tornar-se imprevisíveis e aparentemente frágeis, de fácil, ou rápido, rompimento. Essas características foram relacionadas ao possível excesso de rigidez e concentração de tensões das peças quando flexionadas. Esse fator pode ter sido agravado ainda pelo fato de que, na medida em que se aumenta o comprimento de sobreposição dos cortes, se reduz o comprimento dos segmentos perpendiculares ao eixo de flexão, o que poderia ter contribuído para a redução da resistência da peça ao rompimento.

Figura 58 - Fotos do momento de rompimento de algumas amostras.



Fonte: da autora (2021).

Além disso, também foi confirmada a necessidade de fixação das amostras às hastes para evitar desvios do material quando conformado em arco, o que condiz com a literatura, que afirma que os modos de aplicação de carga e fixação podem influenciar no resultado (GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; KALANTAR e BORHANI, 2018). Isso se deu pela observação da irregularidade dos arcos resultantes desse experimento, que ora pendiam para um lado e ora para outro (Figura 59). Porém, visto que essa etapa de testes visava apenas analisar se as amostras podiam ser conformadas em arcos de raio de 25 mm, sem necessidade de regularidade ou precisão desses arcos, essa característica não foi considerada determinante para esses testes.

Figura 59 - Fotos de amostras que conformaram diferentes geometrias de arcos.

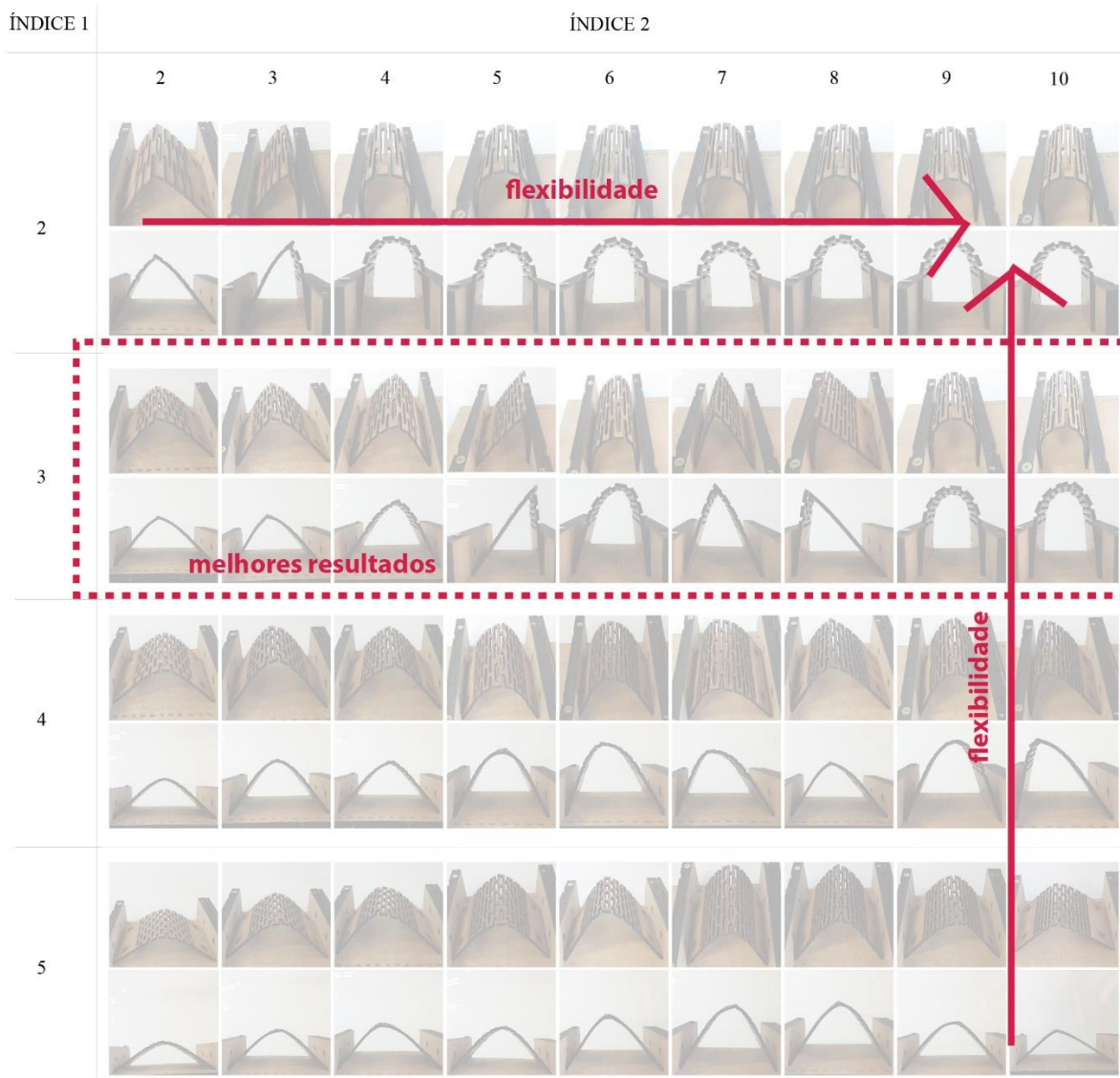


Fonte: da autora (2021).

Considerando-se que nenhuma das peças de Índice 4 e 5 resultaram suficientemente flexíveis para atingir a distância desejada e devido à aparente suscetibilidade das peças de índice 1=2 a movimentos indesejados, foi considerado prudente desenvolver mais testes com índice 1=3. Esse valor apresenta suficiente resistência a esses movimentos, ao mesmo tempo em que não resulta em demasiada rigidez. Essas amostras demonstraram capacidade de aproximar-se do arco de raio de 25 mm e em alguns casos até mesmo o fizeram, porém sempre com fissuras. Portanto, considerou-se que ainda é necessário aumentar sua flexibilidade para atingir esse objetivo com segurança. Na Figura 60 estão ilustradas as tendências observadas nos resultados de curvamento das amostras e o intervalo selecionado para prosseguimento dos testes.

Figura 60 - Tendências observadas pelas análises dos testes A.

TESTE A: IMAGEM DO DESLOCAMENTO MÁXIMO E/OU ROMPIMENTO



Fonte: da autora (2021).

4.1.2 TESTE B

Nessa etapa os testes se deram apenas nas amostras de índice 1=3, ou seja, com um número máximo de 3 segmentos perpendiculares ao eixo de flexão. As amostras foram cortadas no mesmo material dos testes A (MDF de espessura nominal 3 mm e real 2,8mm).

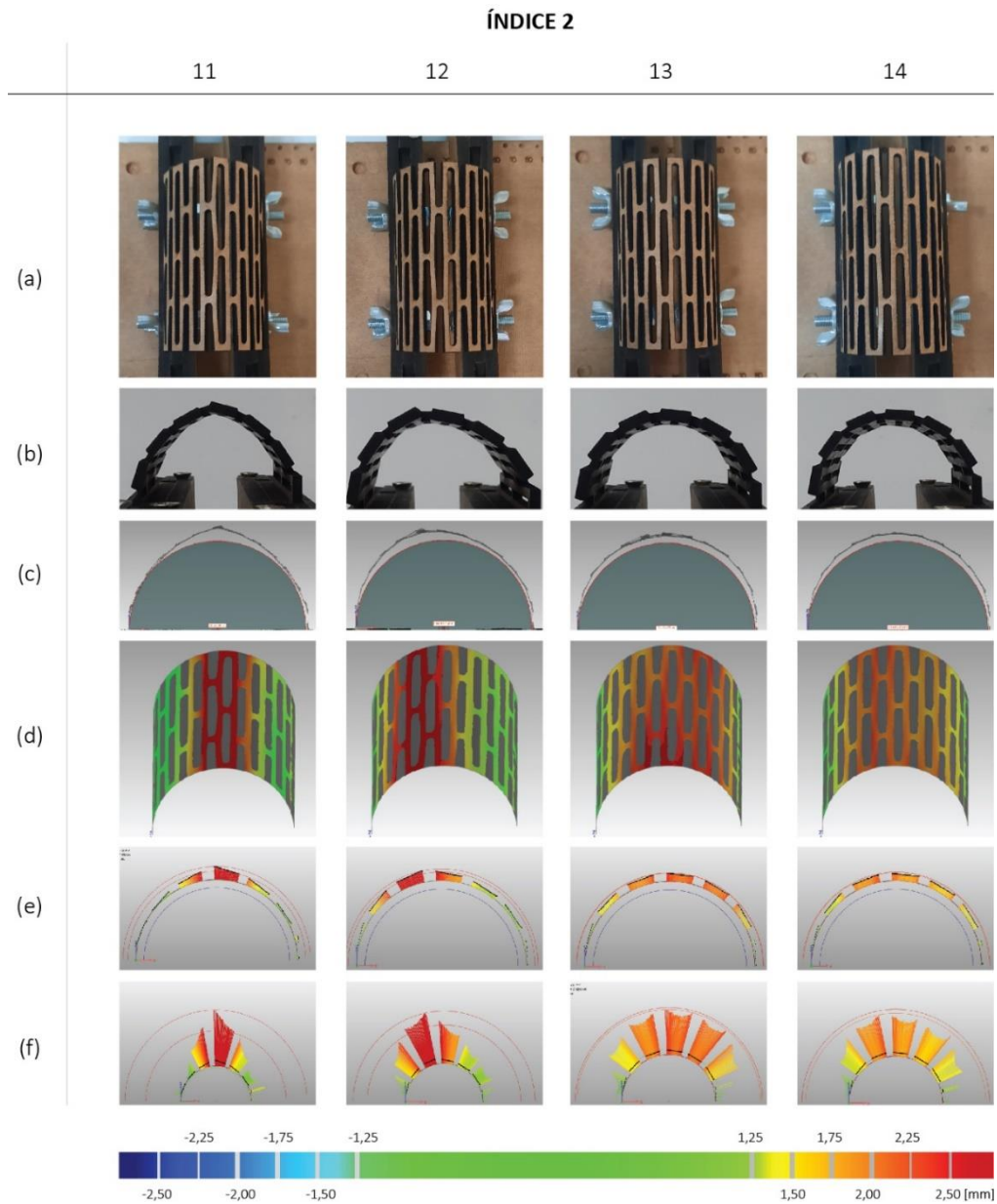
Como esta etapa teve por objetivo buscar tornar as amostras de índice 1=3 mais flexíveis para conformar um arco de raio 25 mm, decidiu-se por testar uma maior variação no índice 2 (comprimento de sobreposição dos cortes). Considerando-se que nos testes A já foram testadas amostras com índice 2 de valores de 2 a 10, para esta etapa foram testados valores maiores que esses, aumento que foi feito até que o comprimento dos segmentos entre cortes atingisse medida igual ou minimamente inferior à espessura da amostra (2,8 mm). Isso resultou em amostras com índices 2 = 11, 12, 13 e 14, equivalentes a 90,9, 91,7, 92,3 e 92,9% de sobreposição dos cortes. Os dados das peças podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados geométricos das amostras dos testes B.

TESTES B						
CÓDIGO DA AMOSTRA	ÍNDICE 1 QUANT.MÁXIMA DE SEGMENTOS PERPENDICULARES AO EIXO DE FLEXÃO DO ARCO POR LINHA DE CORTE	ÍNDICE 2 SOBREPOSIÇÃO DOS CORTES		ÍNDICE 3 LARGURA TOTAL DA PEÇA (mm)	ÍNDICE 4 RAIO DE ARCO DESEJADO (mm)	ÍNDICE 5 ESPESSURA NOMINAL DA AMOSTRA (mm)
		RELAÇÃO COMPRIMENTO DOS CORTES/ COMPRIMENTO DOS SEGMENTOS	(%)			
		B-Q03.S11.L90.R25.E03	3			
B-Q03.S12.L90.R25.E03	3	12	91,7	90	25	3
B-Q03.S13.L90.R25.E03	3	13	92,3	90	25	3
B-Q03.S14.L90.R25.E03	3	14	92,9	90	25	3

Fonte: da autora (2021).

A análise visual das amostras permite afirmar que o material com os parâmetros descritos é capaz se curvar, aproximando suas duas extremidades a uma distância de 50 mm sem ocorrer o rompimento. Entretanto, para que a precisão da geometria pudesse ser avaliada fez-se necessário a análise por digitalização 3D. Posteriormente à digitalização, foi feita análise geométrica digital comparando-se a geometria ideal (meio-cilindro de raio 25 mm e largura 90 mm) com a geometria obtida. Os resultados das análises, representados por desvios 2D com e sem magnificação de erro e 3D constam no Quadro 2 e os resultados numéricos na Tabela 10 e Gráfico 3.

Quadro 2 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste B.

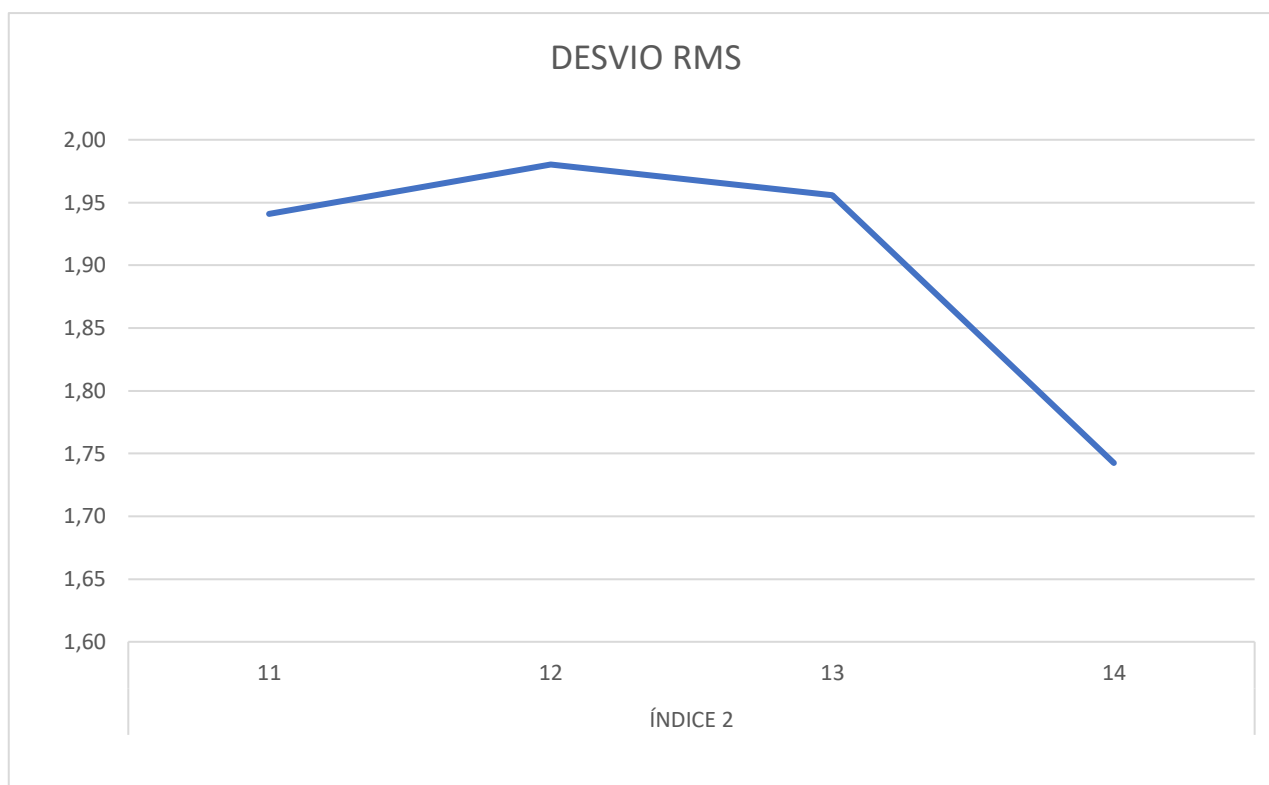
(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) vista frontal 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Tabela 10 - Resultados das análises de desvios para as amostras dos testes B, em milímetros.

TESTES B: RESULTADOS						
DESVIOS GEOMÉTRICOS RESULTANTES DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A GEOMETRIA OBTIDA E A GEOMETRIA IDEAL (mm).						
CÓDIGO AMOSTRA	DESVIO MÁXIMO (+)	DESVIO MÁXIMO (-)	MÉDIA (+)	MÉDIA (-)	DESVIO PADRÃO	DESVIO RMS
B-Q03.S11.L90.R25.E03	4,26	-0,38	1,64	-0,12	1,14	1,94
B-Q03.S12.L90.R25.E03	4,46	-0,32	1,78	-0,12	0,89	1,98
B-Q03.S13.L90.R25.E03	2,96	-0,31	1,89	-0,11	0,54	1,96
B-Q03.S14.L90.R25.E03	2,47	-0,32	1,69	-0,13	0,47	1,74

Fonte: da autora (2021).

Gráfico 3 - Resultado testes B: Desvio RMS para as amostras com relação ao Índice 2.

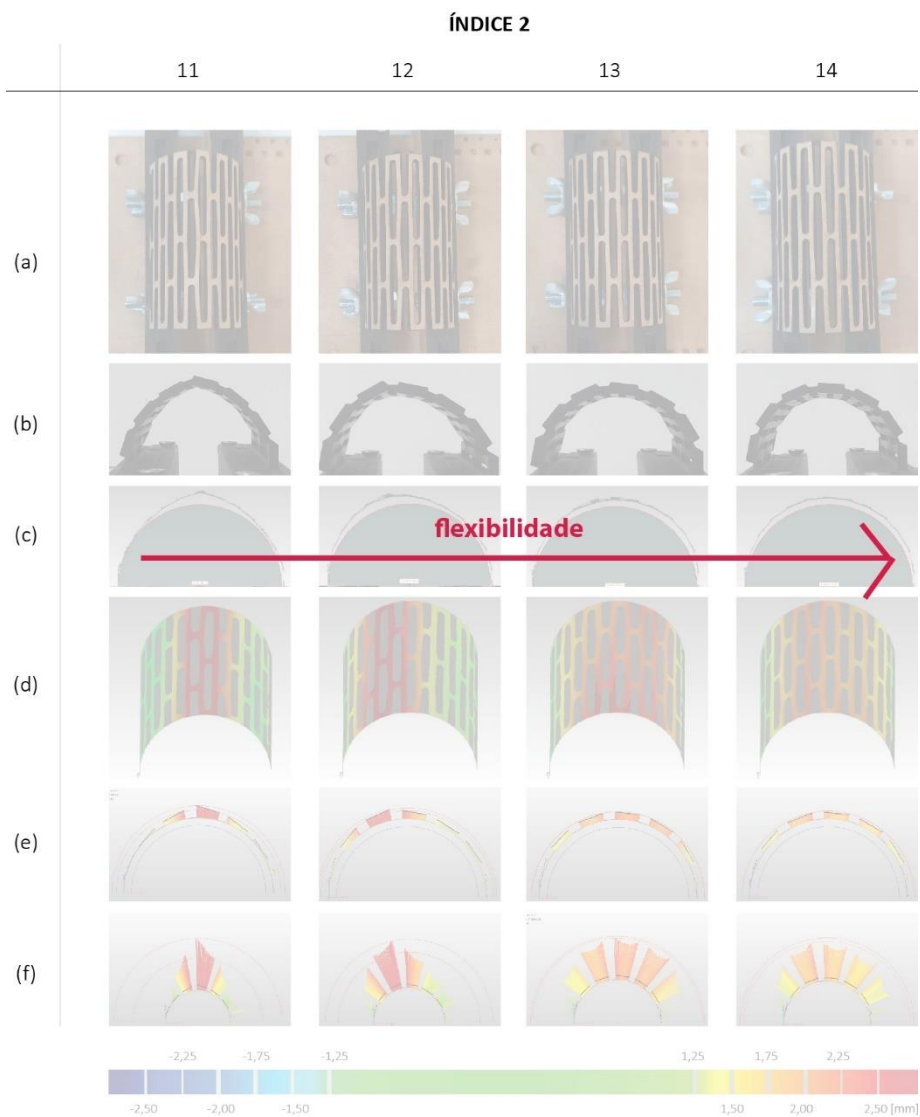


Resultados em milímetros. Fonte: da autora (2021).

Não foi possível notar nenhuma tendência muito evidente a partir dos resultados para desvios RMS das amostras, porém nas análises 2D e 3D de desvios pode ser notada uma diferença de comportamento das amostras na medida em que o índice 2 é aumentado. Foi possível reforçar a tendência de que quanto maior o índice 2 mais flexível se torna a peça de modo que, o aumento desse acompanhou uma maior uniformidade na geometria do arco (Figura 61). Isso se dá pois ao ser aumentado o comprimento de sobreposição dos cortes naturalmente se aumenta o comprimento dos segmentos paralelos ao eixo de curvatura do material, aumentando assim sua capacidade de torção. Além disso, com o aumento desse comprimento se reduz a largura dos segmentos em flexão, aumentando também a capacidade de curvamento do conjunto (Nelson et al., 2016).

As peças de índice 2 menor, por serem mais rígidas, se deformam de modo não uniforme, pendendo o arco para um dos lados e formando pontos de maior deformação, ou seja, maior concentração de tensão. Entretanto, mesmo as peças mais uniformes se projetaram para fora do arco ideal, apresentando em quase toda a amostra desvios positivos.

Figura 61 - Tendências observadas pelas análises dos testes B.



Fonte: da autora (2021).

Considerando-se que as amostras ainda conformam geometrias com desvios significativos com relação à geometria ideal, não estando contidos no intervalo de desvios considerado aceitável por esse estudo, fez-se necessário desenvolver mais testes. Tendo-se que todas as variáveis de escala menor já foram testadas ao seu limite, ou seja, os índices 1 e 2 sofreram as variações limite possíveis para que obtivessem maior flexibilidade, é possível constatar que a geometria desejada no material especificado não é possível de ser obtida com precisão e sem que ela seja suscetível a movimentos parasíticos ou resulte em demasia frágil. Ou seja, nessas condições o MDF de espessura 2,8 mm especificado não é capaz de conformar um meio cilindro de raio 25 mm e largura 90 mm.

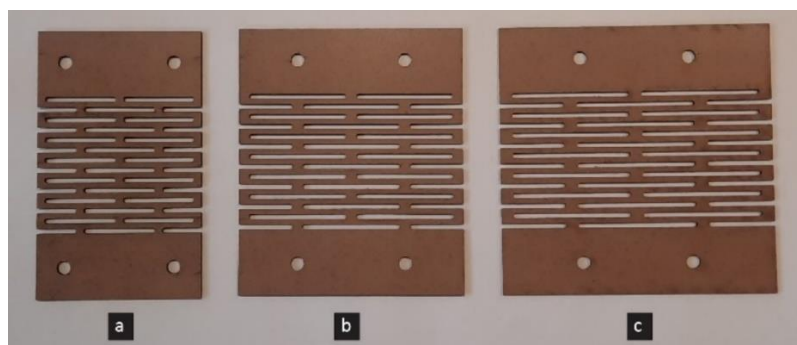
Desse modo, parte-se para as alternativas de alterações macro da geometria que, numa lógica projetual, seria equivalente a adaptar o projeto às limitações de execução. Serão então testadas alterações nos índices 3 e 4.

4.1.3 TESTE C

Essa etapa de testes buscou aumentar a largura total da peça (Índice 3) para ampliar a flexibilidade aparente dessa com a aplicação dos cortes. Isso ocorre dado que na medida em que se aumenta a largura total da peça e se mantém a proporção entre o comprimento dos cortes e dos segmentos entre cortes, aumenta-se por consequência o comprimento dos cortes. Assim, aumenta-se a capacidade de torção dos segmentos, que se deve em grande parte a seu comprimento (Nelson et al, 2016).

Com isso em vista, foram fabricadas amostras com Índice 1 = 3 e Índice 3 = 125 mm e 150 mm, representando um aumento em, respectivamente, aproximadamente 40% e 66% na largura da peça. O índice 2, considerando o limite mínimo estabelecido para o comprimento do segmento de material (2,80 mm), foi recalculado para as novas larguras totais da peça (125 mm e 150 mm). A partir desse cálculo, para as amostras de Índice 3 = 125 mm foram incluídos os valores testados anteriormente para o Índice 2 (2 a 14) e acrescentados os de 15 a 20 (equivalentes a sobreposição de cortes de 93,30; 93,80; 94,10; 94,40; 94,70 e 95%). Já para as amostras de Índice 3 = 150 mm foram testadas amostras de Índice 2 = 15 a 24 (equivalentes a sobreposição de cortes de 93,3; 93,8; 94,1; 94,4; 94,7; 95; 95,20; 95,50; 95,7 e 95,8%). Na Figura 62 nota-se a diferença entre as larguras das peças envolvidas nos testes C com relação às dos testes A e B.

Figura 62 - Exemplo de amostras com variação no Índice 3.



Amostras com largura total da peça de (a) 90; (b) 125 e (c) 150 mm. Fonte: da autora (2021).

A fabricação das peças com diferentes valores para índice 2 foi considerada pertinente uma vez que o resultado de flexibilidade da peça não é totalmente linear quando do aumento da sobreposição dos cortes e também porque não seria possível definir qual o comprimento de sobreposição seria mais adequado para as novas larguras das peças. Os dados dimensionais das amostras cortadas constam na Tabela 11.

As peças foram submetidas aos mesmos procedimentos dos testes B. Elas foram analisadas visualmente, eliminando-se aquelas que se mostrassem demasiadamente irregulares ou que rompessem no curvamento. As demais foram digitalizadas e analisadas. O resultado numérico de desvios geométricos para todas as amostras digitalizadas consta na Tabela 12. Já os resultados de análise de desvios bi e tridimensionais consta no Quadro 3. No Gráfico 4 é possível observar a evolução dos resultados de desvios RMS.

Tabela 11 - Dados geométricos das amostras dos testes C.

TESTES C						
CÓDIGO DA AMOSTRA	ÍNDICE 1 QUANT.MÁXIMA DE SEGMENTOS PERPENDICULARES AO EIXO DE FLEXÃO DO ARCO POR LINHA DE CORTE	ÍNDICE 2 SOBREPOSIÇÃO DOS CORTES		ÍNDICE 3 LARGURA TOTAL DA PEÇA (mm)	ÍNDICE 4 RAIO DE ARCO DESEJADO (mm)	ÍNDICE 5 ESPESSURA NOMINAL DA AMOSTRA (mm)
		RELAÇÃO COMPRIMENTO DOS CORTES/ COMPRIMENTO DOS SEGMENTOS	(%)			
C-Q03.S02.L125.R25.E03	3	2	50,0	125	25	3
C-Q03.S03.L125.R25.E03	3	3	66,7	125	25	3
C-Q03.S04.L125.R25.E03	3	4	75,0	125	25	3
C-Q03.S05.L125.R25.E03	3	5	80,0	125	25	3
C-Q03.S06.L125.R25.E03	3	6	83,3	125	25	3
C-Q03.S07.L125.R25.E03	3	7	85,7	125	25	3
C-Q03.S08.L125.R25.E03	3	8	87,5	125	25	3
C-Q03.S09.L125.R25.E03	3	9	88,9	125	25	3
C-Q03.S10.L125.R25.E03	3	10	90,0	125	25	3
C-Q03.S11.L125.R25.E03	3	11	90,9	125	25	3
C-Q03.S12.L125.R25.E03	3	12	91,7	125	25	3
C-Q03.S13.L125.R25.E03	3	13	92,3	125	25	3
C-Q03.S14.L125.R25.E03	3	14	92,9	125	25	3
C-Q03.S15.L125.R25.E03	3	15	93,3	125	25	3
C-Q03.S16.L125.R25.E03	3	16	93,8	125	25	3
C-Q03.S17.L125.R25.E03	3	17	94,1	125	25	3
C-Q03.S18.L125.R25.E03	3	18	94,4	125	25	3
C-Q03.S19.L125.R25.E03	3	19	94,7	125	25	3
C-Q03.S20.L125.R25.E03	3	20	95,0	125	25	3
C-Q03.S02.L150.R25.E03	3	2	50,0	150	25	3
C-Q03.S03.L150.R25.E03	3	3	66,7	150	25	3
C-Q03.S04.L150.R25.E03	3	4	75,0	150	25	3
C-Q03.S05.L150.R25.E03	3	5	80,0	150	25	3
C-Q03.S06.L150.R25.E03	3	6	83,3	150	25	3
C-Q03.S07.L150.R25.E03	3	7	85,7	150	25	3
C-Q03.S08.L150.R25.E03	3	8	87,5	150	25	3
C-Q03.S09.L150.R25.E03	3	9	88,9	150	25	3
C-Q03.S10.L150.R25.E03	3	10	90,0	150	25	3
C-Q03.S11.L150.R25.E03	3	11	90,9	150	25	3
C-Q03.S12.L150.R25.E03	3	12	91,7	150	25	3
C-Q03.S13.L150.R25.E03	3	13	92,3	150	25	3
C-Q03.S14.L150.R25.E03	3	14	92,9	150	25	3
C-Q03.S15.L150.R25.E03	3	15	93,3	150	25	3
C-Q03.S16.L150.R25.E03	3	16	93,8	150	25	3
C-Q03.S17.L150.R25.E03	3	17	94,1	150	25	3
C-Q03.S18.L150.R25.E03	3	18	94,4	150	25	3
C-Q03.S19.L150.R25.E03	3	19	94,7	150	25	3
C-Q03.S20.L150.R25.E03	3	20	95,0	150	25	3
C-Q03.S21.L150.R25.E03	3	21	95,2	150	25	3
C-Q03.S22.L150.R25.E03	3	22	95,5	150	25	3
C-Q03.S23.L150.R25.E03	3	23	95,7	150	25	3
C-Q03.S24.L150.R25.E03	3	24	95,8	150	25	3

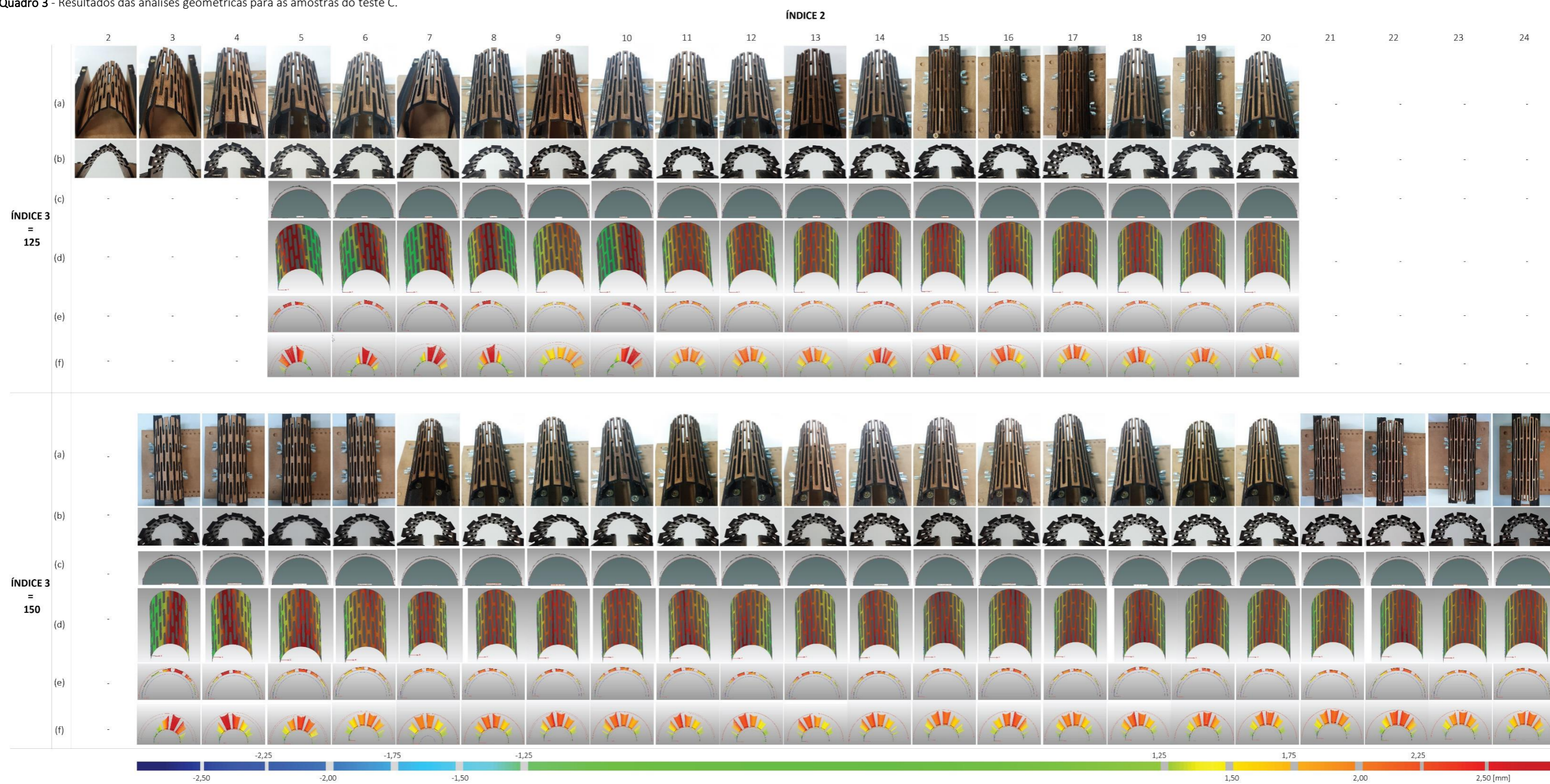
Fonte: da autora (2021).

Tabela 12 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste C, em milímetros.

TESTES C: RESULTADOS						
DESVIOS GEOMÉTRICOS RESULTANTES DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A GEOMETRIA OBTIDA E A GEOMETRIA IDEAL (mm).						
CÓD. AMOSTRA	DESVIO MÁXIMO (+)	DESVIO MÁXIMO (-)	MÉDIA (+)	MÉDIA (-)	DESVIO PADRÃO	RMS
C-Q03.S02.L125.R25.E03	-	-	-	-	-	-
C-Q03.S03.L125.R25.E03	-	-	-	-	-	-
C-Q03.S04.L125.R25.E03	-	-	-	-	-	-
C-Q03.S05.L125.R25.E03	3,63	-0,94	1,98	-0,35	1,22	2,06
C-Q03.S06.L125.R25.E03	3,91	-1,19	1,89	-0,18	1,11	2,10
C-Q03.S07.L125.R25.E03	3,67	-1,21	1,92	-0,13	1,14	2,02
C-Q03.S08.L125.R25.E03	3,71	-0,24	1,65	-0,06	0,97	1,90
C-Q03.S09.L125.R25.E03	2,42	-0,83	1,64	-0,06	0,42	1,69
C-Q03.S10.L125.R25.E03	3,59	-1,88	2,02	-0,34	1,26	2,02
C-Q03.S11.L125.R25.E03	2,78	-0,69	1,82	-0,13	0,53	1,88
C-Q03.S12.L125.R25.E03	2,77	-0,77	1,76	-0,13	0,59	1,83
C-Q03.S13.L125.R25.E03	2,71	-0,58	1,71	-0,12	0,53	1,77
C-Q03.S14.L125.R25.E03	3,12	-0,51	1,99	-0,15	0,70	2,09
C-Q03.S15.L125.R25.E03	3,00	-1,75	1,89	-0,14	0,60	1,96
C-Q03.S16.L125.R25.E03	2,87	-0,92	1,86	-0,11	0,60	1,94
C-Q03.S17.L125.R25.E03	2,88	-0,37	1,79	-0,14	0,59	1,87
C-Q03.S18.L125.R25.E03	2,74	-1,76	1,78	-0,18	0,62	1,86
C-Q03.S19.L125.R25.E03	2,68	-1,08	1,80	-0,13	0,59	1,87
C-Q03.S20.L125.R25.E03	2,75	-0,74	1,70	-0,13	0,56	1,77
C-Q03.S02.L150.R25.E03	-	-	-	-	-	-
C-Q03.S03.L150.R25.E03	3,48	-0,35	1,76	-0,14	0,92	1,98
C-Q03.S04.L150.R25.E03	3,48	-1,06	1,89	-0,15	0,73	2,02
C-Q03.S05.L150.R25.E03	3,16	-0,30	1,93	-0,11	0,59	2,01
C-Q03.S06.L150.R25.E03	2,77	-1,15	1,76	-0,12	0,47	1,81
C-Q03.S07.L150.R25.E03	2,92	-0,28	1,89	-0,08	0,56	1,96
C-Q03.S08.L150.R25.E03	2,70	-0,49	1,82	-0,10	0,53	1,89
C-Q03.S09.L150.R25.E03	2,88	-0,36	1,94	-0,13	0,55	2,00
C-Q03.S10.L150.R25.E03	2,78	-0,43	1,90	-0,18	0,50	1,95
C-Q03.S11.L150.R25.E03	2,98	-0,44	1,90	-0,17	0,55	1,96
C-Q03.S12.L150.R25.E03	3,04	-0,45	1,81	-0,16	0,58	1,89
C-Q03.S13.L150.R25.E03	2,87	-0,60	1,80	-0,09	0,50	1,86
C-Q03.S14.L150.R25.E03	2,79	-0,64	1,85	-0,14	0,50	1,91
C-Q03.S15.L150.R25.E03	2,88	-0,37	1,85	-0,07	0,55	1,92
C-Q03.S16.L150.R25.E03	2,83	-0,56	1,88	-0,08	0,54	1,95
C-Q03.S17.L150.R25.E03	2,59	-0,37	1,76	-0,13	0,52	1,82
C-Q03.S18.L150.R25.E03	3,02	-0,93	1,88	-0,17	0,54	1,94
C-Q03.S19.L150.R25.E03	2,67	-0,45	1,81	-0,19	0,60	1,89
C-Q03.S20.L150.R25.E03	2,65	-0,41	1,73	-0,14	0,59	1,81
C-Q03.S21.L150.R25.E03	2,73	-0,28	1,83	-0,10	0,56	1,90
C-Q03.S22.L150.R25.E03	2,90	-0,37	1,82	-0,11	0,62	1,91
C-Q03.S23.L150.R25.E03	2,86	-0,65	1,75	-0,10	0,61	1,83
C-Q03.S24.L150.R25.E03	2,65	-0,28	1,85	-0,09	0,52	1,91

Fonte: da autora (2021).

Quadro 3 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste C.



(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Gráfico 4 - Resultados testes C: Relação entre o RMS e o Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e o comprimento dos segmentos entre cortes da amostra) no curvamento das amostras.

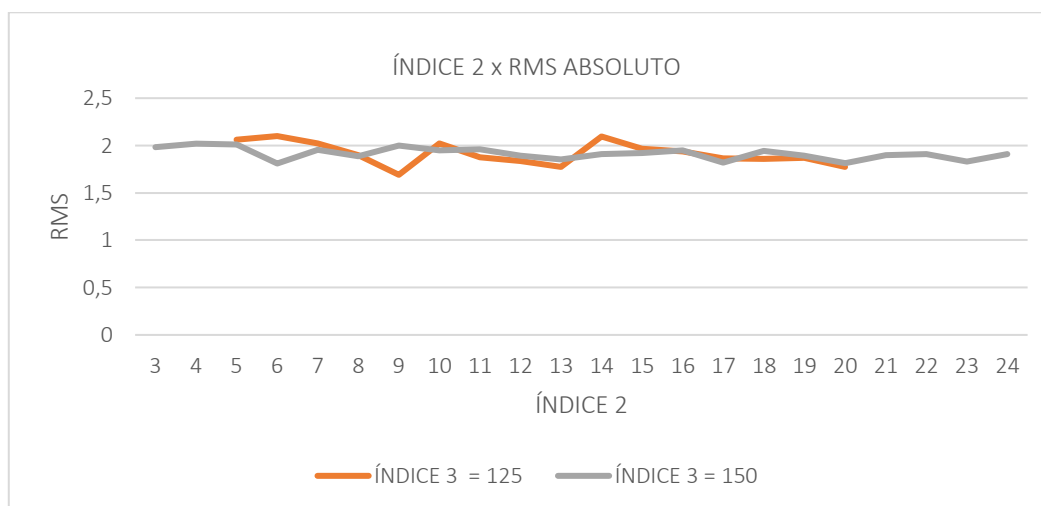


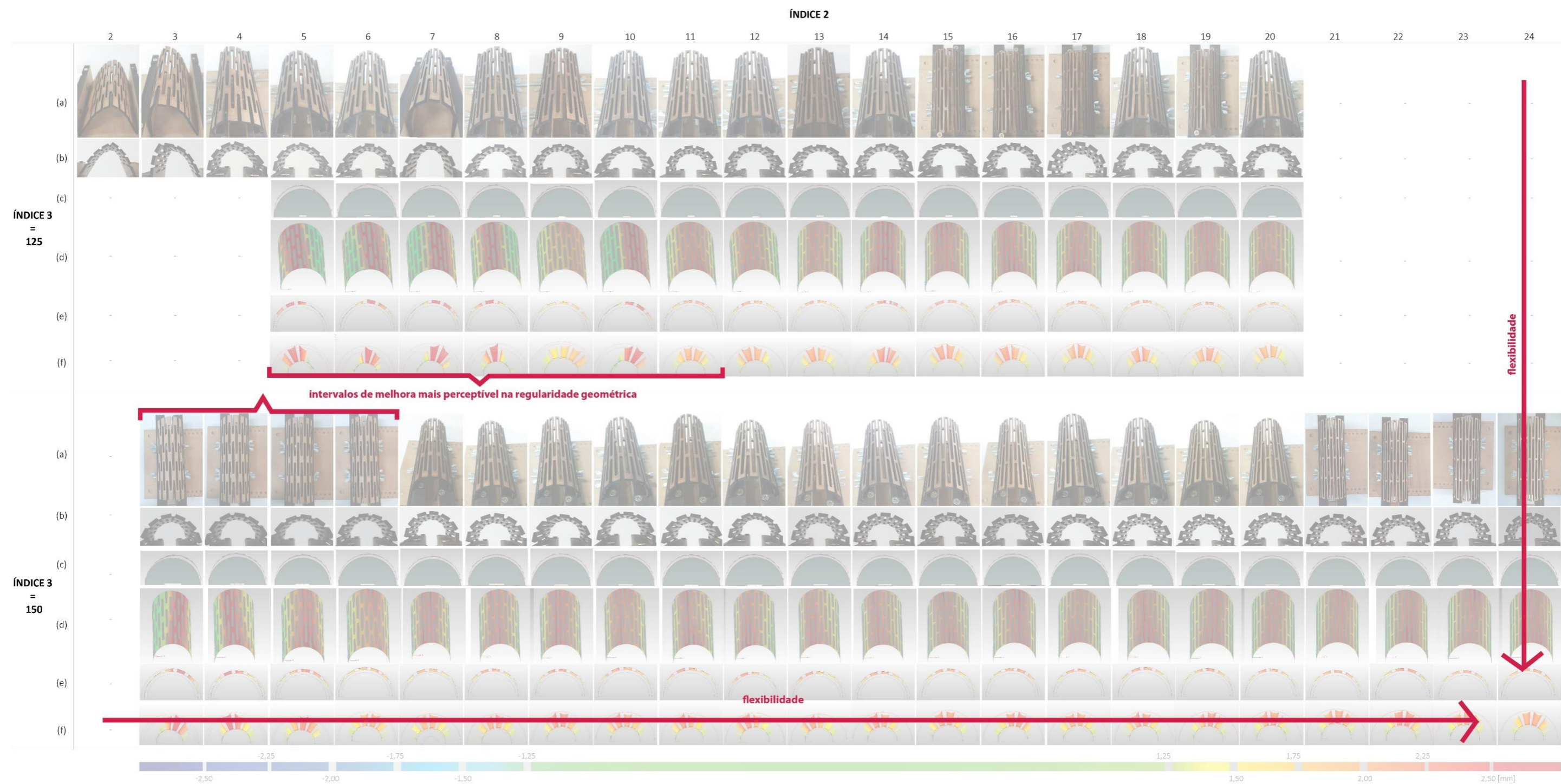
Gráfico da relação entre o desvio RMS (resultante da análise de desvios da geometria digitalizada com relação à geometria-alvo) X Índice 2 (sobreposição dos cortes) para amostras de Índice 3 (largura total da amostra) = 125 e 150 e Índice 1 (quantidade máxima de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão da amostra) = 3. Fonte: da autora (2021).

Na comparação entre os dois grupos de amostras envolvidos nesse teste e as amostras do teste B, cada uma com diferentes valores para índice 3, notou-se que os resultados numéricos para desvio RMS não demonstraram uma diferença significativa. Entretanto, é possível afirmar que o aumento na largura total da peça decorreu em um resultado mais homogêneo de desvios entre amostras com diferentes valores de Índice 2. Isso pode ser observado no gráfico RMS, uma vez que a diferença entre os resultados de desvios para as amostras de Índice 3 = 125 mm foi maior do que para as amostras de Índice 3 = 150 mm. Essa linearidade pode ser justificada pela maior rigidez das peças com menor largura, o que faz com que elas resultem mais tensionadas e apresentem desvios mais agudos. Já nas peças de maior largura, a distribuição de erros ocorreu de modo similar entre a maioria das amostras.

Assim, é possível afirmar que o aumento da largura total acarretou em uma maior flexibilidade das peças. Isto pode ser justificado pelo maior comprimento dos cortes, uma vez que o Índice 2 (relação entre o comprimento dos cortes e comprimento dos segmentos entre cortes) foi mantido, acarretando em uma maior capacidade de torção dos segmentos.

Já com relação à distribuição dos desvios nas peças, não foi observada diferença significativa entre os dois conjuntos de amostras. Pode-se notar uma evolução muito semelhante entre os dois conjuntos na medida em que se aumenta o Índice 2, ficando os desvios distribuídos de modo mais homogêneo com o aumento desse, o que é mais evidente no intervalo entre as amostras mais rígidas e as intermediárias (Figura 63). As geometrias de meio cilindro obtidos com Índice 2 menor tenderam a pender para um dos lados e apresentar desvios mais agudos em algumas áreas, enquanto as amostras com esse índice maior apresentaram desvios positivos similares ao longo de toda a peça.

Figura 63 - Tendências observadas pelos resultados dos testes C.



(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

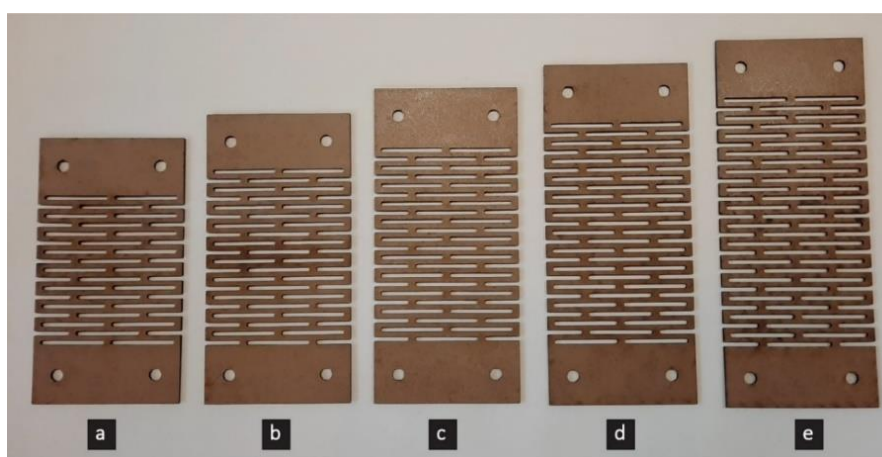
Apesar de se notar uma influência do Índice 3 na homogeneidade dos desvios entre amostras, os resultados desses testes foram considerados insatisfatórios para a obtenção de arcos com a precisão desejada, uma vez que o RMS obtido foi superior a 1,25 mm (desvio nominal aceitável). Além disso, por observação da grandeza dos desvios ainda presentes nas amostras de Índice 3 = 150, pode-se prever que seria necessário um aumento muito significativo na largura da geometria-alvo para que fosse possível obtê-la com a precisão desejada a partir do material e parâmetros especificados. Devido a isso, considerou-se pertinente a busca por alteração do Índice 4 (raio do arco). Essa medida também equivaleria a uma alteração do projeto em escala macro, porém com a vantagem de que o resultado tenha proporções mais aproximadas às desejadas inicialmente.

4.1.4 TESTE D

Esta etapa de testes consistiu na busca por alteração do raio de arco da geometria-alvo (Índice 4). Considerando-se que a geometria inicial foi projetada com largura de 90 mm, essa foi mantida, buscando-se alterar apenas o raio do arco (anteriormente definido em 25 mm). Foram fabricadas amostras com Índice 4 = 30, 35, 40, 45 e 50. Pelos fatores explicados anteriormente foi mantido o Índice 1 = 3. Já para o Índice 2 foram fabricadas amostras com valores de 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14 (equivalentes a percentuais de sobreposição de cortes de 50, 67, 75, 80, 83, 86, 88, 89,90, 90,9, 91,7, 92,3 e 92,9, sendo o último igual a um segmento entre cortes de comprimento aproximado ao valor da espessura da amostra: 2,80 mm). Na Figura 64 tem-se uma imagem representativa de cada grupo de amostras cortadas e na Tabela 13 seus dados dimensionais.

Os resultados obtidos para cada amostra estão ilustrados na Tabela 14, no Quadro 4 e no Gráfico 5 e Gráfico 6. Para as amostras que romperam no momento da flexão os resultados não puderam ser analisados e não foram representados no quadro.

Figura 64 - Exemplo de amostras com variação do índice 4.



Amostras para curvamento em arco de raio: (a) 30; (b) 35; (c) 40; (d) 45 e (e) 50 mm. Fonte: da autora (2021).

Tabela 13 - Dados geométricos das amostras do teste D.

CÓDIGO DA AMOSTRA	TESTES D					
	ÍNDICE 1 - QUANT.MÁX. DE SEGMENTOS PERPEND. AO EIXO DE FLEXÃO DO ARCO POR LINHA DE CORTE	ÍNDICE 2 - SOBREPÓSICÃO DOS CORTES		ÍNDICE 3 LARGURA TOTAL DA PEÇA (mm)	ÍNDICE 4 RAIOS DE ARCO DESEJADO (mm)	ÍNDICE 5 ESPESURA NOMINAL DA AMOSTRA (mm)
		RELAÇÃO COMPRIM. CORTES/ COMPRIM. SEGMENTOS	(%)			
D-Q03.S02.L90.R30.E03	3	2	50,0	90	30	3
D-Q03.S03.L90.R30.E03	3	3	66,7	90	30	3
D-Q03.S04.L90.R30.E03	3	4	75,0	90	30	3
D-Q03.S05.L90.R30.E03	3	5	80,0	90	30	3
D-Q03.S06.L90.R30.E03	3	6	83,3	90	30	3
D-Q03.S07.L90.R30.E03	3	7	85,7	90	30	3
D-Q03.S08.L90.R30.E03	3	8	87,5	90	30	3
D-Q03.S09.L90.R30.E03	3	9	88,9	90	30	3
D-Q03.S10.L90.R30.E03	3	10	90,0	90	30	3
D-Q03.S11.L90.R30.E03	3	11	90,9	90	30	3
D-Q03.S12.L90.R30.E03	3	12	91,7	90	30	3
D-Q03.S13.L90.R30.E03	3	13	92,3	90	30	3
D-Q03.S14.L90.R30.E03	3	14	92,9	90	30	3
D-Q03.S02.L90.R35.E03	3	2	50,0	90	35	3
D-Q03.S03.L90.R35.E03	3	3	66,7	90	35	3
D-Q03.S04.L90.R35.E03	3	4	75,0	90	35	3
D-Q03.S05.L90.R35.E03	3	5	80,0	90	35	3
D-Q03.S06.L90.R35.E03	3	6	83,3	90	35	3
D-Q03.S07.L90.R35.E03	3	7	85,7	90	35	3
D-Q03.S08.L90.R35.E03	3	8	87,5	90	35	3
D-Q03.S09.L90.R35.E03	3	9	88,9	90	35	3
D-Q03.S10.L90.R35.E03	3	10	90,0	90	35	3
D-Q03.S11.L90.R35.E03	3	11	90,9	90	35	3
D-Q03.S12.L90.R35.E03	3	12	91,7	90	35	3
D-Q03.S13.L90.R35.E03	3	13	92,3	90	35	3
D-Q03.S14.L90.R35.E03	3	14	92,9	90	35	3
D-Q03.S02.L90.R40.E03	3	2	50,0	90	40	3
D-Q03.S03.L90.R40.E03	3	3	66,7	90	40	3
D-Q03.S04.L90.R40.E03	3	4	75,0	90	40	3
D-Q03.S05.L90.R40.E03	3	5	80,0	90	40	3
D-Q03.S06.L90.R40.E03	3	6	83,3	90	40	3
D-Q03.S07.L90.R40.E03	3	7	85,7	90	40	3
D-Q03.S08.L90.R40.E03	3	8	87,5	90	40	3
D-Q03.S09.L90.R40.E03	3	9	88,9	90	40	3
D-Q03.S10.L90.R40.E03	3	10	90,0	90	40	3
D-Q03.S11.L90.R40.E03	3	11	90,9	90	40	3
D-Q03.S12.L90.R40.E03	3	12	91,7	90	40	3
D-Q03.S13.L90.R40.E03	3	13	92,3	90	40	3
D-Q03.S14.L90.R40.E03	3	14	92,9	90	40	3
D-Q03.S02.L90.R45.E03	3	2	50,0	90	45	3
D-Q03.S03.L90.R45.E03	3	3	66,7	90	45	3
D-Q03.S04.L90.R45.E03	3	4	75,0	90	45	3
D-Q03.S05.L90.R45.E03	3	5	80,0	90	45	3
D-Q03.S06.L90.R45.E03	3	6	83,3	90	45	3
D-Q03.S07.L90.R45.E03	3	7	85,7	90	45	3
D-Q03.S08.L90.R45.E03	3	8	87,5	90	45	3
D-Q03.S09.L90.R45.E03	3	9	88,9	90	45	3
D-Q03.S10.L90.R45.E03	3	10	90,0	90	45	3
D-Q03.S11.L90.R45.E03	3	11	90,9	90	45	3
D-Q03.S12.L90.R45.E03	3	12	91,7	90	45	3
D-Q03.S13.L90.R45.E03	3	13	92,3	90	45	3
D-Q03.S14.L90.R45.E03	3	14	92,9	90	45	3
D-Q03.S02.L90.R50.E03	3	2	50,0	90	50	3
D-Q03.S03.L90.R50.E03	3	3	66,7	90	50	3
D-Q03.S04.L90.R50.E03	3	4	75,0	90	50	3
D-Q03.S05.L90.R50.E03	3	5	80,0	90	50	3
D-Q03.S06.L90.R50.E03	3	6	83,3	90	50	3
D-Q03.S07.L90.R50.E03	3	7	85,7	90	50	3
D-Q03.S08.L90.R50.E03	3	8	87,5	90	50	3
D-Q03.S09.L90.R50.E03	3	9	88,9	90	50	3
D-Q03.S10.L90.R50.E03	3	10	90,0	90	50	3
D-Q03.S11.L90.R50.E03	3	11	90,9	90	50	3
D-Q03.S12.L90.R50.E03	3	12	91,7	90	50	3
D-Q03.S13.L90.R50.E03	3	13	92,3	90	50	3
D-Q03.S14.L90.R50.E03	3	14	92,9	90	50	3

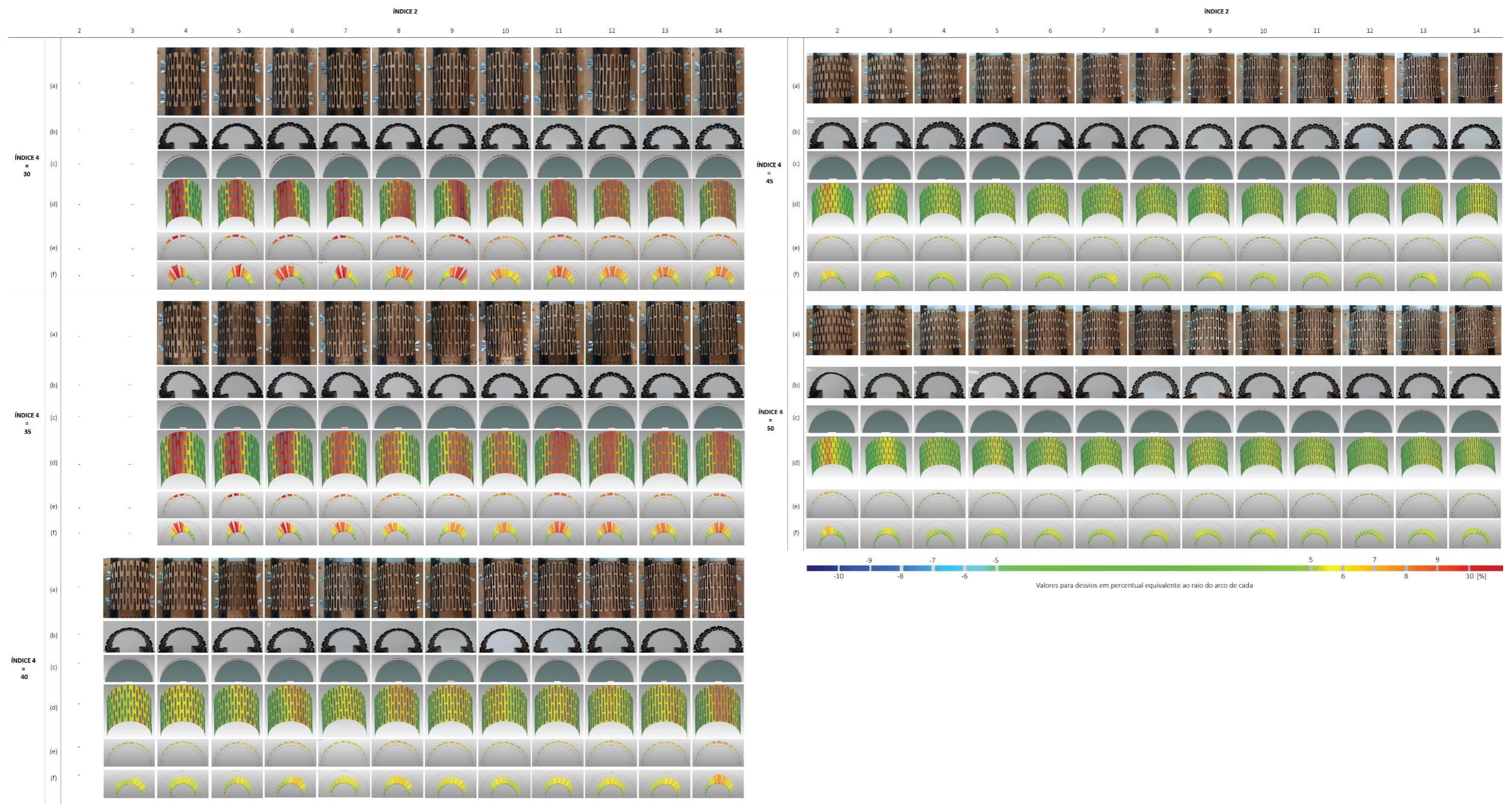
Fonte: da autora (2021).

Tabela 14 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste D, em milímetros.

TESTES D: RESULTADOS (mm)						
DESVIOS GEOMÉTRICOS RESULTANTES DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A GEOMETRIA OBTIDA E A GEOMETRIA IDEAL (mm).						
CÓD. AMOSTRA	DESVIO MÁXIMO (+)	DESVIO MÁXIMO (-)	MÉDIA (+)	MÉDIA (-)	DESVIO PADRÃO	RMS
D-Q03.S02.L90.R30.E03	-	-	-	-	-	-
D-Q03.S03.L90.R30.E03	-	-	-	-	-	-
D-Q03.S04.L90.R30.E03	4,10	-0,31	1,86	-0,12	1,07	2,13
D-Q03.S05.L90.R30.E03	3,38	-0,52	1,95	-0,16	0,77	2,08
D-Q03.S06.L90.R30.E03	3,75	-0,43	1,92	-0,10	0,93	2,12
D-Q03.S07.L90.R30.E03	4,16	-0,42	1,98	-0,10	0,99	2,20
D-Q03.S08.L90.R30.E03	3,12	-0,46	1,98	-0,11	0,76	2,10
D-Q03.S09.L90.R30.E03	3,77	-0,30	1,90	-0,10	0,97	2,13
D-Q03.S10.L90.R30.E03	3,11	-0,32	1,90	-0,11	0,51	1,96
D-Q03.S11.L90.R30.E03	3,16	-0,34	2,00	-0,12	0,75	2,13
D-Q03.S12.L90.R30.E03	2,88	-0,41	2,03	-0,15	0,63	2,10
D-Q03.S13.L90.R30.E03	2,87	-0,37	1,95	-0,13	0,62	2,03
D-Q03.S14.L90.R30.E03	2,90	-0,35	1,90	-0,12	0,66	1,99
D-Q03.S02.L90.R35.E03	-	-	-	-	-	-
D-Q03.S03.L90.R35.E03	-	-	-	-	-	-
D-Q03.S04.L90.R35.E03	4,41	-0,24	2,06	-0,04	1,07	2,32
D-Q03.S05.L90.R35.E03	4,61	-0,46	1,93	-0,09	1,36	2,32
D-Q03.S06.L90.R35.E03	4,15	-0,27	2,10	-0,10	1,08	2,35
D-Q03.S07.L90.R35.E03	3,44	-0,14	2,05	-0,06	0,89	2,23
D-Q03.S08.L90.R35.E03	3,06	-0,17	1,92	-0,05	0,71	2,04
D-Q03.S09.L90.R35.E03	3,25	-0,39	1,98	-0,11	0,95	2,14
D-Q03.S10.L90.R35.E03	3,34	-0,38	1,94	-0,11	0,77	2,08
D-Q03.S11.L90.R35.E03	3,88	-0,32	2,23	-0,13	1,00	2,42
D-Q03.S12.L90.R35.E03	3,53	-0,28	2,06	-0,09	0,94	2,25
D-Q03.S13.L90.R35.E03	3,32	-0,63	2,05	-0,09	0,82	2,19
D-Q03.S14.L90.R35.E03	3,46	-0,35	2,05	-0,10	0,90	2,21
D-Q03.S02.L90.R40.E03	-	-	-	-	-	-
D-Q03.S03.L90.R40.E03	2,79	-0,32	1,90	-0,10	0,43	1,95
D-Q03.S04.L90.R40.E03	2,74	-0,28	2,01	-0,10	0,45	2,05
D-Q03.S05.L90.R40.E03	2,77	-0,52	1,76	-0,19	0,56	1,83
D-Q03.S06.L90.R40.E03	2,96	-0,41	1,96	-0,12	0,67	2,07
D-Q03.S07.L90.R40.E03	2,56	-0,18	1,86	-0,18	0,42	1,90
D-Q03.S08.L90.R40.E03	3,03	-0,40	2,12	-0,15	0,65	2,20
D-Q03.S09.L90.R40.E03	2,87	-0,30	2,03	-0,12	0,50	2,08
D-Q03.S10.L90.R40.E03	2,96	-0,27	1,92	-0,11	0,45	1,97
D-Q03.S11.L90.R40.E03	2,68	-0,41	1,98	-0,20	0,55	2,04
D-Q03.S12.L90.R40.E03	2,87	-0,31	2,00	-0,15	0,45	2,04
D-Q03.S13.L90.R40.E03	2,87	-0,18	2,00	-0,11	0,49	2,05
D-Q03.S14.L90.R40.E03	3,33	-0,32	2,23	-0,10	0,80	2,36
D-Q03.S02.L90.R45.E03	3,46	-0,41	1,83	-0,16	0,84	2,00
D-Q03.S03.L90.R45.E03	3,11	-0,51	1,83	-0,17	0,63	1,93
D-Q03.S04.L90.R45.E03	2,67	-0,29	1,67	-0,10	0,51	1,73
D-Q03.S05.L90.R45.E03	2,46	-0,42	1,68	-0,05	0,39	1,73
D-Q03.S06.L90.R45.E03	2,49	-0,25	1,77	-0,09	0,38	1,80
D-Q03.S07.L90.R45.E03	2,68	-0,40	1,67	-0,14	0,50	1,74
D-Q03.S08.L90.R45.E03	2,36	-0,58	1,63	-0,19	0,35	1,66
D-Q03.S09.L90.R45.E03	2,73	-0,47	1,66	-0,13	0,70	1,78
D-Q03.S10.L90.R45.E03	2,42	-0,47	1,59	-0,13	0,48	1,64
D-Q03.S11.L90.R45.E03	2,19	-0,59	1,62	-0,12	0,42	1,66
D-Q03.S12.L90.R45.E03	2,04	-0,36	1,56	-0,13	0,32	1,59
D-Q03.S13.L90.R45.E03	2,70	-0,33	1,72	-0,09	0,54	1,79
D-Q03.S14.L90.R45.E03	2,62	-0,19	1,83	-0,08	0,58	1,91
D-Q03.S02.L90.R50.E03	4,21	-0,42	2,03	-0,09	0,98	2,23
D-Q03.S03.L90.R50.E03	3,10	-0,28	1,74	-0,09	0,76	1,90
D-Q03.S04.L90.R50.E03	2,48	-0,25	1,63	-0,09	0,35	1,66
D-Q03.S05.L90.R50.E03	2,84	-1,20	1,68	-0,08	0,71	1,82
D-Q03.S06.L90.R50.E03	2,72	-0,37	1,71	-0,06	0,61	1,81
D-Q03.S07.L90.R50.E03	2,45	-0,23	1,67	-0,09	0,50	1,74
D-Q03.S08.L90.R50.E03	2,65	-0,63	1,74	-0,08	0,62	1,84
D-Q03.S09.L90.R50.E03	2,82	-0,35	1,94	-0,10	0,51	1,99
D-Q03.S10.L90.R50.E03	2,73	-0,51	1,77	-0,09	0,61	1,86
D-Q03.S11.L90.R50.E03	2,53	-0,34	1,85	-0,10	0,46	1,89
D-Q03.S12.L90.R50.E03	2,30	-0,30	1,56	-0,10	0,44	1,60
D-Q03.S13.L90.R50.E03	2,70	-0,24	1,78	-0,08	0,54	1,84
D-Q03.S14.L90.R50.E03	2,44	-0,32	1,70	-0,09	0,49	1,75

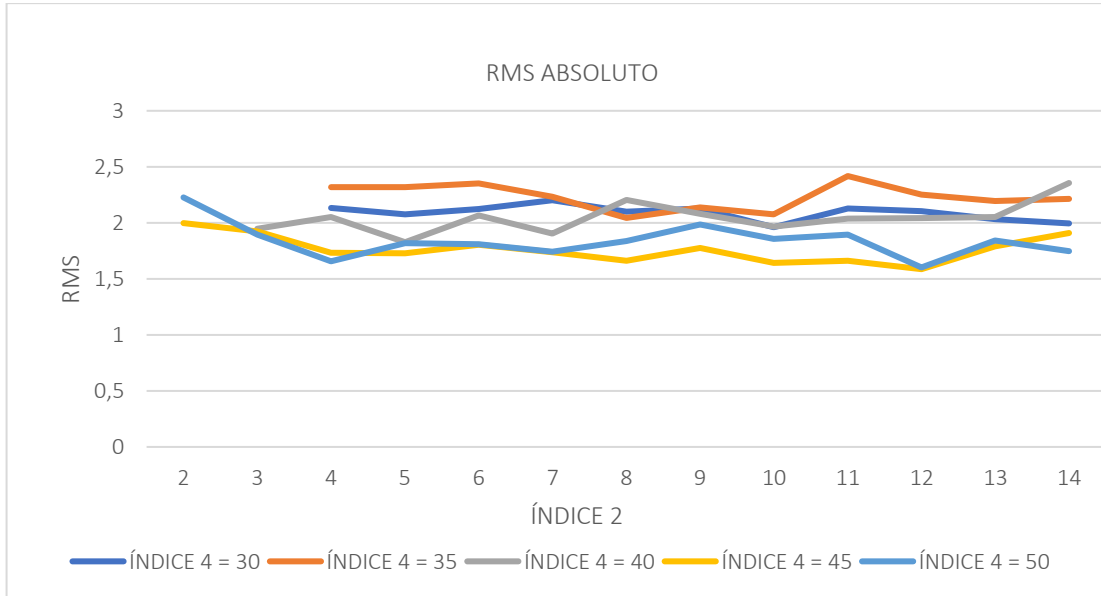
Fonte: da autora (2021).

Quadro 4 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste D.



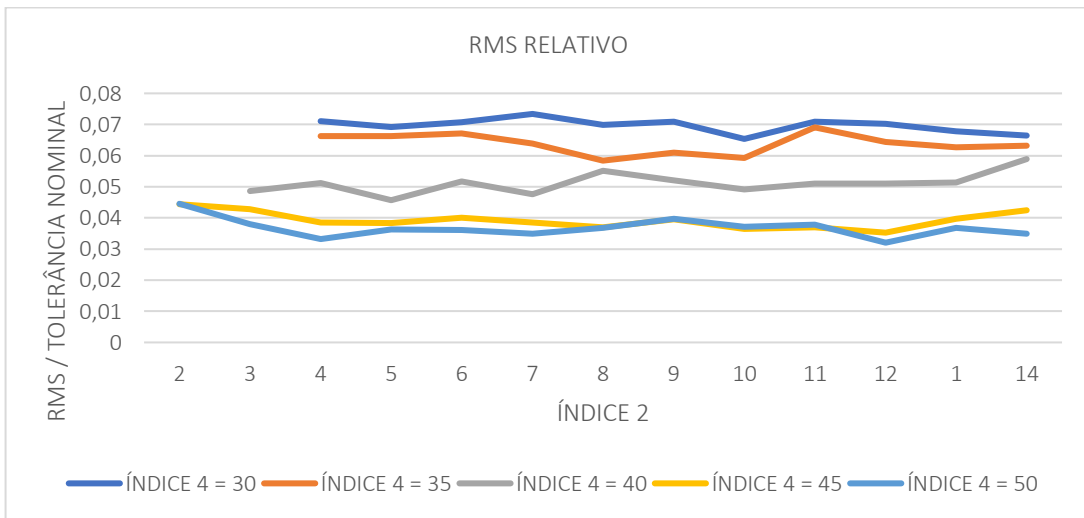
(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Gráfico 5 - Resultados testes D: Relação entre o RMS Absoluto e o Índice 2 (sobreposição dos cortes) no curvamento das amostras.



Fonte: da autora (2021).

Gráfico 6 - Resultados testes D: Relação entre o RMS Relativo e o Índice 2 (sobreposição dos cortes) no curvamento das amostras.



Fonte: da autora (2021).

Em vista das diferentes dimensões dos arcos testados nessa etapa foram adotadas diferentes tolerâncias de desvios para cada raio. As tolerâncias foram ampliadas proporcionalmente com relação ao arco inicial de raio 25 mm, equivalendo portanto a 10% do raio do arco para os desvios máximos e 5% para a tolerância nominal de desvios, ambos negativos e positivos. Esses percentuais equivaleram às seguintes tolerâncias para cada raio de arco, de desvios máximos e nominais: 3 mm e 1,5 mm para o arco de raio 30 mm; 3,5 mm e 1,75 mm para o raio de arco 35 mm; 4 mm e 2 mm para o raio de arco 40 mm; 4,5 mm e 2,25 mm para o arco de raio 45 mm; 5 mm e 2,5 mm para o arco de raio 50 mm.

Pela análise das imagens do Quadro 4 é possível observar que o resultado de precisão geométrica quando do curvamento das peças foi se tornando melhor na medida em que o Índice 4 (raio do arco) foi aumentado (Figura 65). Tanto pelas imagens do Quadro 4 quanto pelo Gráfico 5 e Gráfico 6 pode-se notar que, juntamente com o aumento do raio do arco, os desvios geométricos com relação às projeções dos arcos ideais foram sendo reduzidos, tanto os desvios RMS absolutos (sem considerar as tolerâncias de desvios aceitáveis) quanto os desvios RMS relativos (considerando tolerâncias proporcionais a cada raio de arco).

Esse fenômeno se justifica pois ao se tentar curvar a amostra em determinado raio os segmentos em torção são solicitados a vencer certo ângulo (Nelson et al., 2016). Conforme se aumenta o raio de arco esse ângulo que necessita ser vencido por cada segmento é reduzido, assim como o esforço de torção e, por consequência, a tensão no material.

Pode-se notar que nesses testes a evolução dos desvios com relação ao Índice 2 ficou evidente apenas entre as amostras com esse índice muito reduzido e as amostras intermediárias. Isso pode ser observado tanto nos gráficos de evolução do RMS quando no quadro de análises 2D e 3D. É possível que com o aumento do Índice 4 as amostras tenham se mostrado mais flexíveis, apresentando desvios mais regulares de um modo geral e sendo essa mudança menos perceptível.

Nas amostras em que buscou-se conformar um raio de 30 mm e de 35 mm a flexibilidade das peças ainda não era suficiente para atingir a geometria desejada, de modo que houve deformação visível para fora da projeção do arco ideal em todas as unidades. Devido a essa rigidez nessas peças não foi possível obter um cilindro de curvatura uniforme havendo, na maioria delas, algumas áreas que se projetaram mais intensamente para fora da projeção e indicando assim que o cilindro estava inclinado para um dos lados. Nas peças de raio 40 mm também houve deformação para fora da projeção do arco ideal, porém essa se mostrou mais homogênea e de menor intensidade. Essas observações são confirmadas no Gráfico 6, no qual se pode observar que nas amostras de raio 30 e 35 mm os desvios RMS obtidos encontraram-se acima da tolerância admitida, enquanto nas amostras de 40 mm esses estavam mais próximos e muitas vezes abaixo da tolerância.

Já nas peças de raio 45 mm e 50 mm os arcos obtidos apresentaram geometria bastante uniforme, resultando alguns pontos de projeção para fora do cilindro ideal porém coincidindo com esse na maioria da superfície. Além das imagens se mostrarem similares, os resultados numéricos, visíveis no gráfico de RMS absoluto e RMS relativo, foram muito aproximados entre os dois conjuntos de amostras. Os desvios RMS obtidos para todas as amostras desses raios estão contidos nas tolerâncias aceitáveis (5% do raio do arco), porém observou-se que as amostras com sobreposição de cortes superior a 4 obtiveram geometrias mais regulares (Figura 65).

Figura 65 - Tendências observadas pelas análises dos testes D.



Fonte: da autora (2021).

Para prosseguimento dos testes de ampliação da espessura do MDF e da escala do arco foi necessário selecionar as amostras que seriam ampliadas. Como todas as amostras de raio 45 e 50 mm obtiveram desvios RMS aceitáveis dentro das tolerâncias admitidas, optou-se pelo conjunto de raio 45 mm e foram selecionadas duas amostras: uma mais rígida e outra mais flexível (com diferente sobreposição dos cortes). A relação entre flexibilidade para conformar a geometria e rigidez para ter maior resistência e estabilidade foi considerada desejada, por isso foi escolhida a amostra mais rígida do conjunto de raio menor. Já a amostra mais flexível foi também ampliada para efeitos de comparação.

Para a escolha da amostra de maior rigidez levou-se em conta a observação tanto do RMS quanto das análises de desvios. A evolução do RMS sofreu uma queda inicial nas duas amostras mais rígidas (de índice 2 = 2 e 3), estabilizando-se após a amostra de índice 2 = 4. Esse efeito foi observado também na uniformidade da geometria, que também aumentou a partir dessa amostra. Devido a isso, essa amostra foi selecionada como a mais rígida a ser testada, por sua maior homogeneidade. A amostra mais flexível, de índice 2 = 14, obteve resultados satisfatórios tanto numéricos quanto geométricos, portanto também prosseguiu os testes.

4.2 ETAPA 2 DE ENSAIOS: COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE CORTE

4.2.1 TESTE E

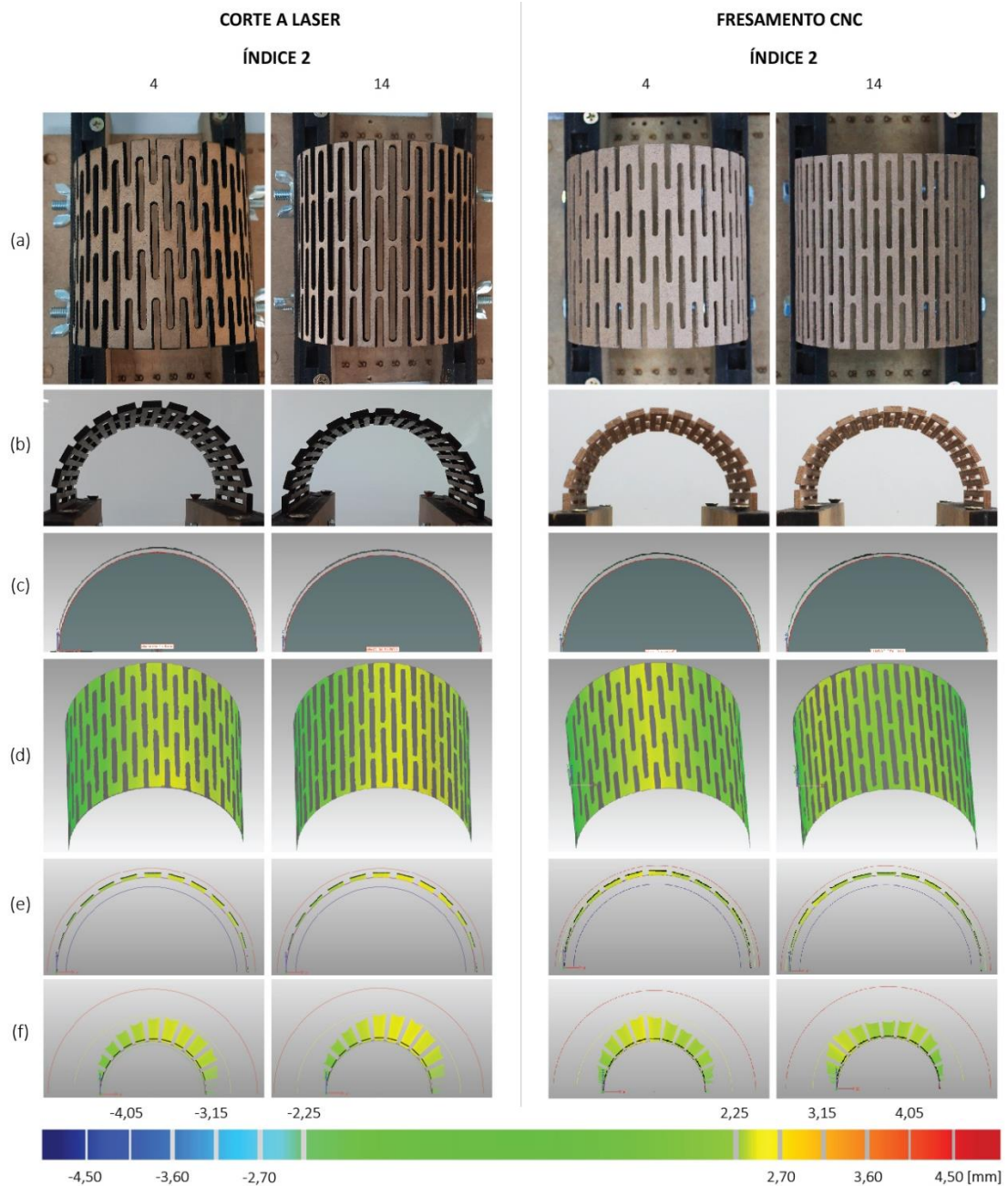
Essa etapa de teste se baseou na comparação entre as amostras selecionadas no teste D, que foram cortadas à laser, e amostras idênticas a essas porém cortadas em fresadora CNC. Esse ensaio foi denominado teste E, e visou a averiguar se o uso de diferentes equipamentos poderia acarretar em interferências significantes no resultado. O resultado numérico dos testes consta na Tabela 15 e as análises de desvios no Quadro 5.

Tabela 15 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste E, em milímetros.

TESTES E: RESULTADOS						
DESVIOS GEOMÉTRICOS DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A GEOMETRIA OBTIDA E A GEOMETRIA IDEAL (mm).						
CÓD. AMOSTRA	DESVIO MÁXIMO (+)	DESVIO MÁXIMO (-)	MÉDIA (+)	MÉDIA (-)	DESVIO PADRÃO	RMS
D-Q03.S04.L90.R45.E03	2,67	-0,29	1,67	-0,10	0,51	1,73
D-Q03.S14.L90.R45.E03	2,62	-0,19	1,83	-0,08	0,58	1,91
E-Q03.S04.L90.R45.E03	4,14	-0,94	1,69	-0,27	0,43	1,74
E-Q03.S14.L90.R45.E03	2,45	-0,23	1,49	-0,16	0,39	1,54

Fonte: da autora (2021).

Quadro 5 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste E.



(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (C) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (D) análise de desvios 3D; (E) análise de desvios 2D; (F) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Não foram observadas diferenças significativas nos resultados, de modo que as amostras cortadas nos dois equipamentos tiveram resultados aceitáveis dentro das tolerâncias estipuladas e resultados geométricos muito aproximados. Entretanto, pode-se notar uma diferença de aspecto das amostras, tendo a amostra cortada a laser as laterais escuras pela queima decorrente do processo, enquanto a amostra cortada no equipamento CNC tem coloração homogênea.

Devido à equivalência de resultados geométricos e de desvios numéricos considerou-se que não seria necessário fazer ajustes no desenho da amostra para adequação ao corte na fresadora CNC das demais espessuras. Assim, procedeu-se para o teste de ampliação de escala.

4.3 ETAPA 3 DE ENSAIOS: DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA CURVATURA DO MDF

4.3.1 TESTE F

Essa etapa consistiu no teste de ampliação de escala dos arcos das amostras escolhidas na primeira etapa de testes. Nesses testes os índices que se mantiveram fixos foram o Índice 1 (quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão do arco) = 3 e Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 4 e 14, equivalentes a percentuais de sobreposição dos cortes de 75 e 92,9, respectivamente. Foi testada a variação do índice 5 e os demais índices foram adaptados proporcionalmente a esse. Na Tabela 16 pode-se observar os dados dimensionais das amostras, enquanto na Figura 66 tem-se imagens delas.

Tabela 16 - Dados geométricos das amostras do teste F.

TESTES F						
CÓDIGO DA AMOSTRA	ÍNDICE 1 QUANT.MÁXIMA DE SEGMENTOS PERPENDICULARES AO EIXO DE FLEXÃO DO ARCO POR LINHA DE CORTE	ÍNDICE 2 SOBREPOSIÇÃO DOS CORTES		ÍNDICE 3 LARGURA TOTAL DA PEÇA (mm)	ÍNDICE 4 RAIO DE ARCO DESEJADO (mm)	ÍNDICE 5 ESPESSURA NOMINAL DA AMOSTRA (mm)
		RELAÇÃO COMPRIMENTO DOS CORTES/ COMPRIMENTO DOS SEGMENTOS	(%)			
E-Q03.S04.L90.R45.E03	3	4	75,0	90	45	3
E-Q03.S14.L90.R45.E03	3	14	92,9	90	45	3
F-Q03.S04.L192.R96.E06	3	4	75,0	192,6	96,3	6
F-Q03.S14.L192.R96.E06	3	14	92,9	192,6	96,3	6
F-Q03.S04.L288.R144.E09	3	4	75,0	288,9	144,45	9
F-Q03.S14.L288.R144.E09	3	14	92,9	288,9	144,45	9
F-Q03.S04.L578.R289.E18	3	4	75,0	578,7	289,35	18
F-Q03.S14.L578.R289.E18	3	14	92,9	578,7	289,35	18

Fonte: da autora (2021).

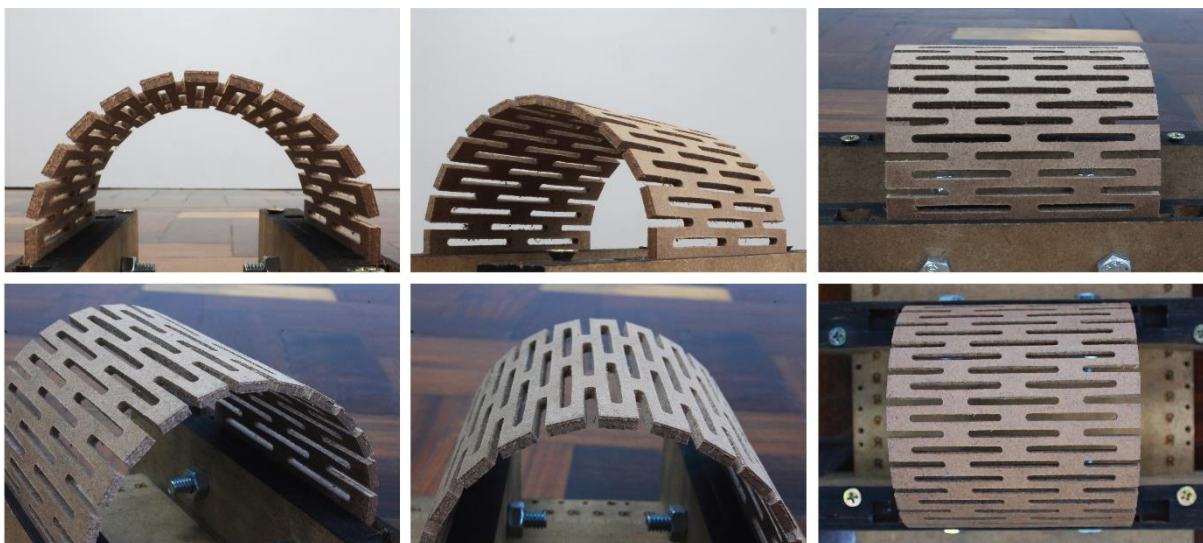
Figura 66 - Foto do conjunto das amostras do teste F.



Duplas de amostras de 3,6,9 e 18 mm para testes, com sobreposição de cortes de 75 e 92,9%. Fonte: da autora (2021).

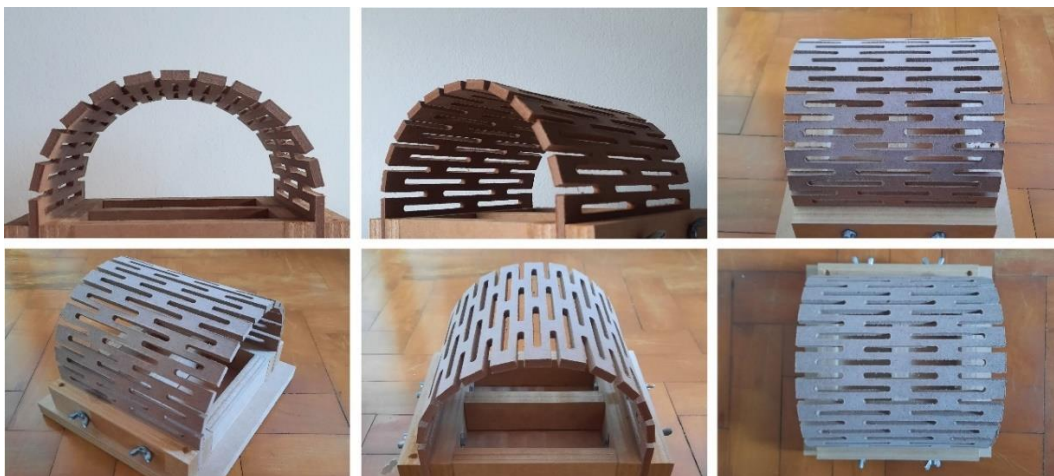
As amostras foram posicionadas cada uma em seu respectivo suporte. No momento de curvamento e fixação uma das amostras de Índice 2=4 apresentou ponto de ruptura por ser excessivamente rígida. Nesse caso essa amostra também foi digitalizada e analisada para que se pudesse observar com mais precisão o ocorrido. Nas Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70 tem-se o registro fotográfico de cada uma das amostras de Índice 2 =4.

Figura 67 - Registro fotográfico da amostra de 3mm Índice 2 = 4



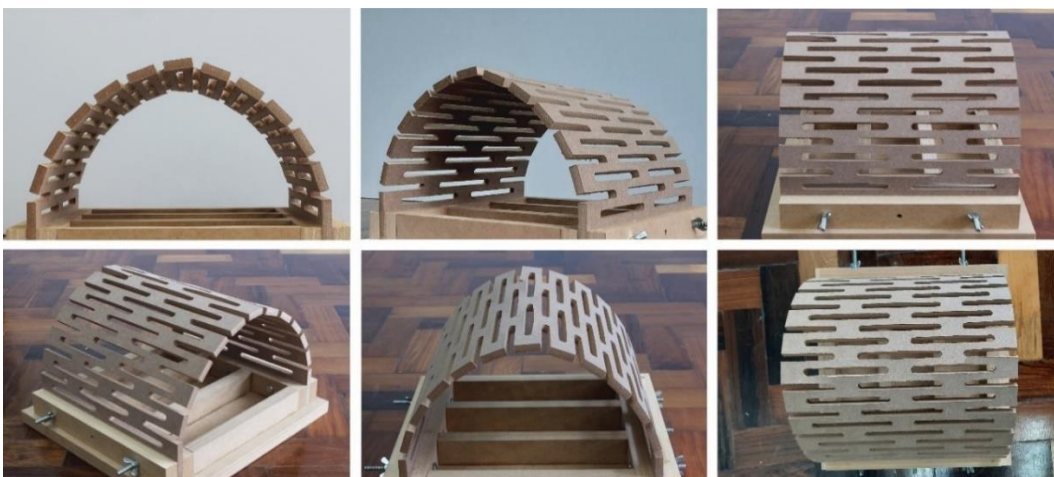
Fonte: da autora (2021).

Figura 68 - Registro fotográfico da amostra de 6mm Índice 2 = 4.



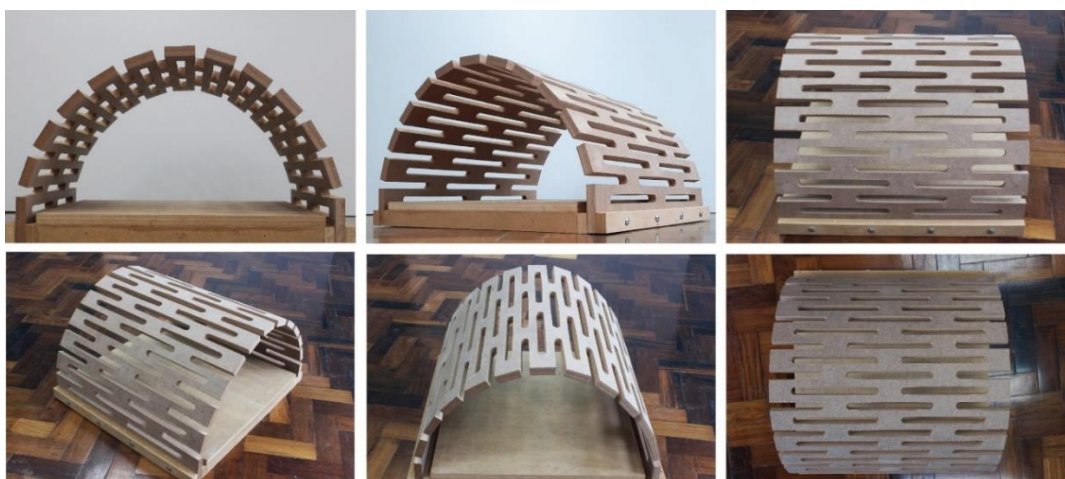
Fonte: da autora (2021).

Figura 69 - Registro fotográfico da amostra de 9mm Índice 2 = 4.



Fonte: da autora (2021).

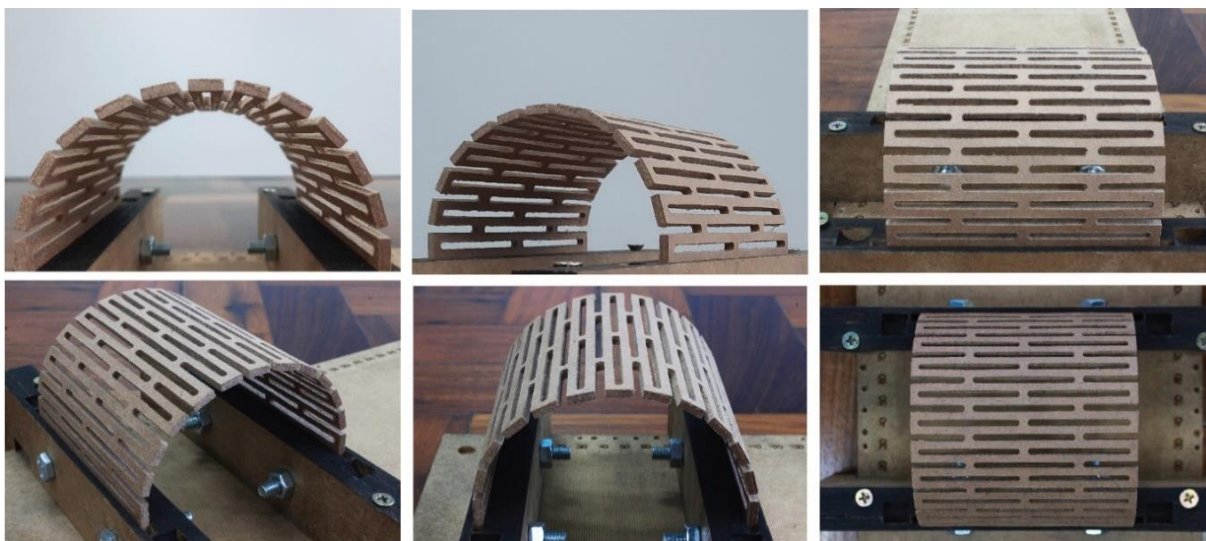
Figura 70 - Registro fotográfico da amostra de 18mm Índice 2 = 4.



Fonte: da autora (2021).

Já as amostras de Índice 2=14 de todas as espessuras apresentaram possibilidade de curvamento e fixação sem ruptura. Na Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 pode-se observar fotos de cada amostra e o conjunto dessas amostras pode ser observado nas Figura 75, Figura 76 e Figura 77.

Figura 71 - Registro fotográfico da amostra de 3mm Índice 2 = 14.



Fonte: da autora (2021).

Figura 72 - Registro fotográfico da amostra de 6mm Índice 2 = 14.



Fonte: da autora (2021).

Figura 73 - Registro fotográfico da amostra de 9mm Índice 2 = 14.



Fonte: da autora (2021).

Figura 74 - Registro fotográfico da amostra de 18mm Índice 2 = 14.



Fonte: da autora (2021).

Figura 75 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.



Amostras de espessura (a) 18 mm; (b) 9 mm; (c) 6 mm; (d) 3 mm. Fonte: da autora (2021).

Figura 76 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.



Fonte: da autora (2021).

Figura 77 - Conjunto de amostras do teste F de Índice 2=14.



Amostras de espessura (a) 18 mm; (b) 9 mm; (c) 6 mm; (d) 3 mm. Fonte: da autora (2021).

Os resultados numéricos de todas as amostras constam na Tabela 17 e os resultados gráficos das análises no Quadro 6. A partir dos resultados foram gerados gráficos de desvios RMS absoluto e relativo (com relação à tolerância de cada amostra), que constam no Gráfico 7 e Gráfico 8.

Tabela 17 - Resultados das análises de desvios para as amostras do teste F, em milímetros.

TESTES F: RESULTADOS						
DESVIOS GEOMÉTRICOS RESULTANTES DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A GEOMETRIA OBTIDA E A GEOMETRIA IDEAL (mm).						
CÓD. AMOSTRA	DESVIO MÁXIMO (+)	DESVIO MÁXIMO (-)	MÉDIA (+)	MÉDIA (-)	DESVIO PADRÃO	RMS
E-Q03.S04.L90.R45.E03	4,14	-0,94	1,69	-0,27	0,43	1,74
E-Q03.S14.L90.R45.E03	2,45	-0,23	1,49	-0,16	0,39	1,54
F-Q03.S04.L192.R96.E06	7,66	-0,35	4,34	-0,04	1,03	4,46
F-Q03.S14.L192.R96.E06	6,32	-1,09	4,21	-0,11	1,39	4,43
F-Q03.S04.L288.R144.E09	18,08	-8,18	7,44	-0,21	4,77	8,83
F-Q03.S14.L288.R144.E09	8,86	-3,33	6,09	-0,26	1,77	6,33
F-Q03.S04.L578.R289.E18	28,95	-29,00	9,65	-2,39	8,29	10,70
F-Q03.S14.L578.R289.E18	28,98	-28,05	6,78	-0,65	5,24	8,21

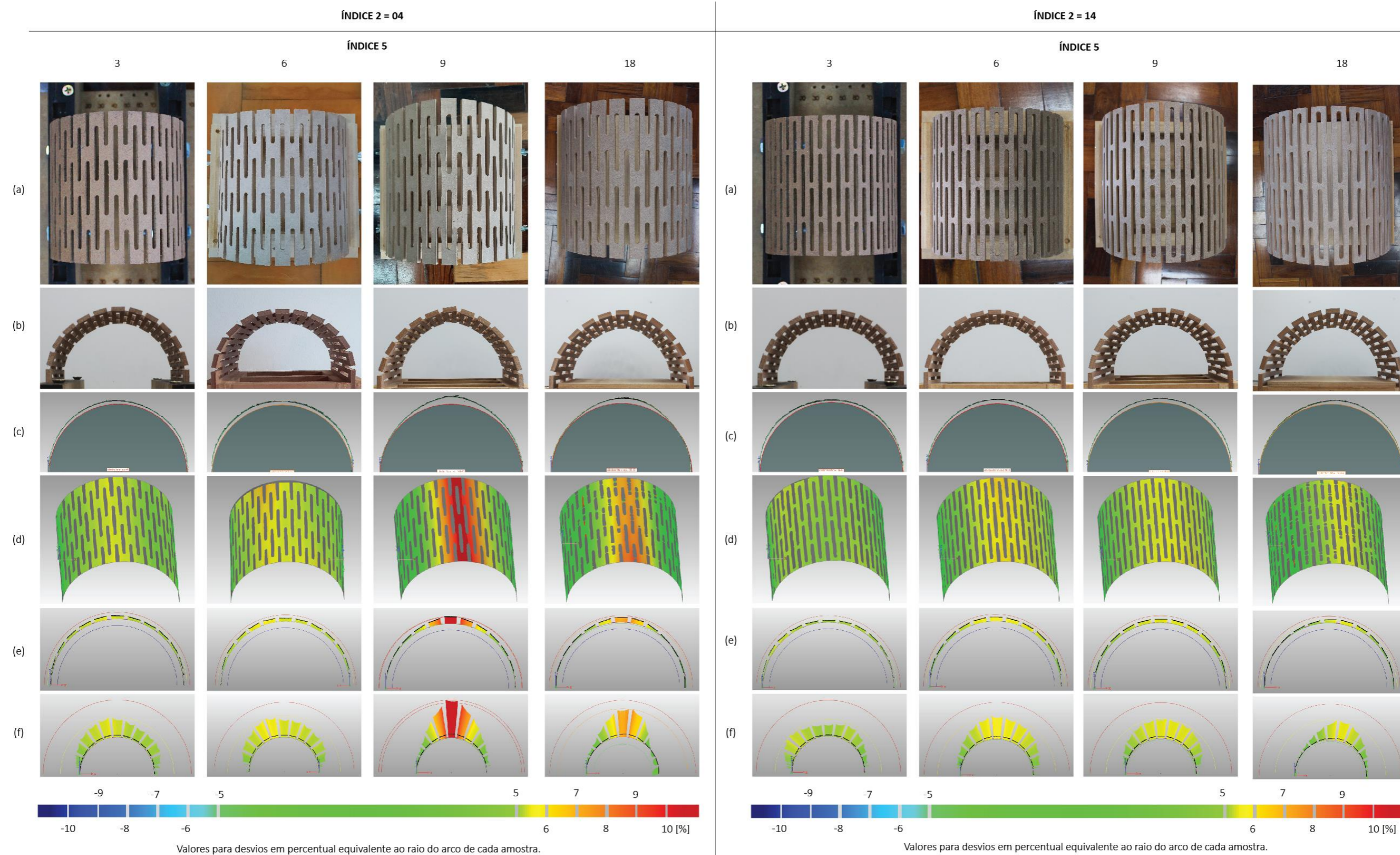
Fonte: da autora (2021).

Observa-se que, no caso das amostras com Índice 2=4 o resultado para a espessura de 9 mm não foi aceitável, apresentando as peças pontos de ruptura no MDF e regiões de deformações intensas no arco, além do RMS acima da tolerância. Já no caso das amostras de 6 e 18 mm de mesmo desenho foi possível o curvamento sem ruptura e com RMS dentro da tolerância, representando esses resultados considerados aceitáveis. Entretanto, pela análise de desvios das amostras é possível notar diferenças entre os resultados das geometrias.

Na análise das amostras de índice 2=4 é possível notar uma graduação na qualidade da geometria obtida, de modo que na medida que a espessura foi aumentando a geometria obtida foi ficando mais deformada. Isso é constatado ao se observar que tanto as de 3 quando de 6 mm obtiveram arcos bastante regulares projetados para fora da geometria-alvo, porém a de menor espessura projetou-se com menor intensidade. Já as amostras de 9 e 18 mm resultaram em arcos bastante deformados, formando áreas pontiagudas no cilindro, surgindo inclusive fissuras nessa região na amostra de 9 mm.

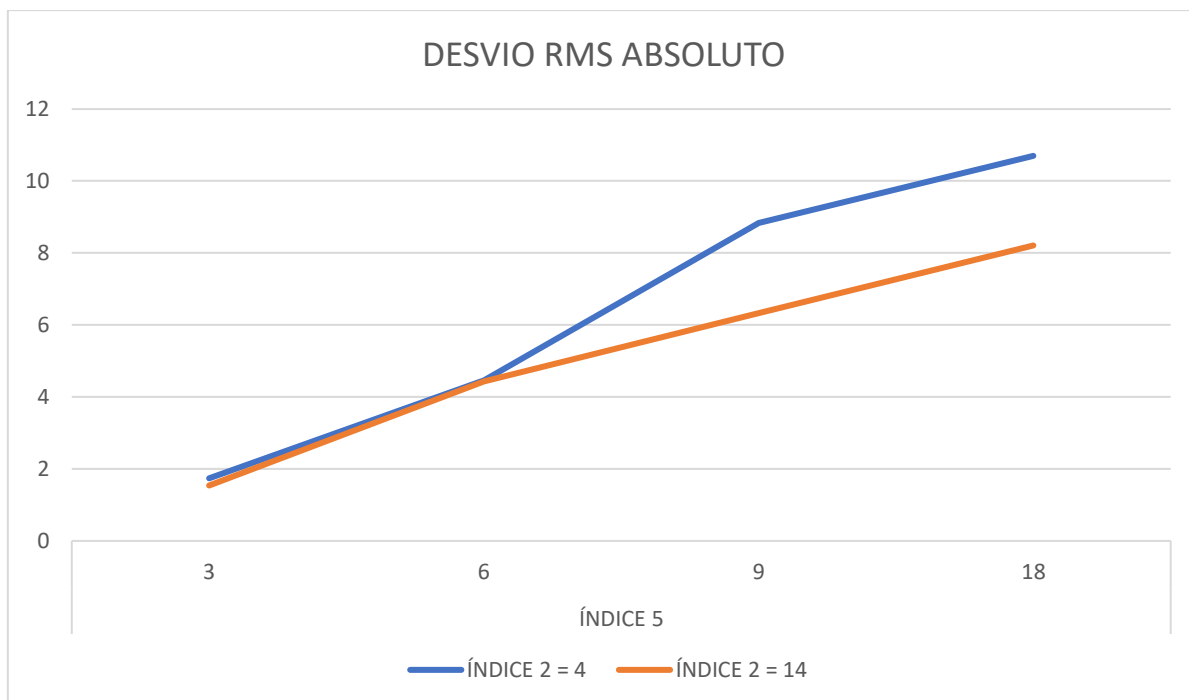
Além disso, com excessão de alguns segmentos da peça de 9 mm, os demais parecem nada ou quase nada deformados (ou seja, planos) em todas as peças. Isso pode indicar um rompimento abrupto devido ao excesso de rigidez das peças, uma vez que a flexão do conjunto não chegou a ser absorvida ou amortecida pelos demais segmentos.

Quadro 6 - Resultados das análises geométricas para as amostras do teste F.



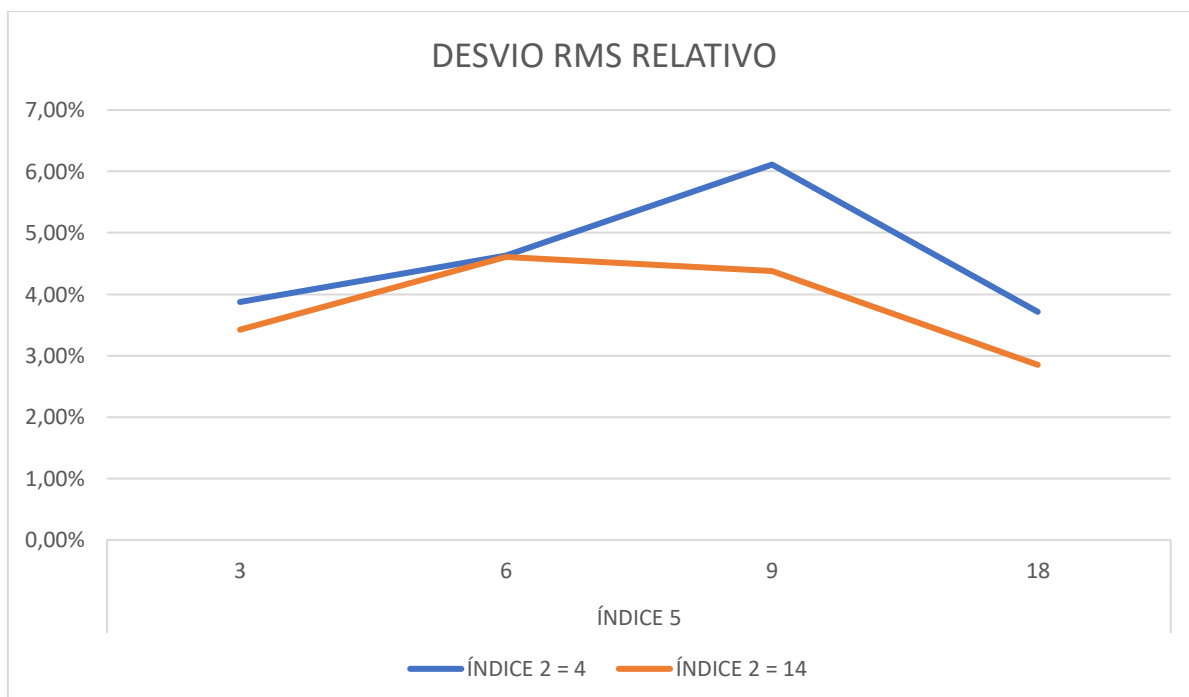
(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Gráfico 7 - Resultados testes F: Relação entre o RMS Absoluto e o Índice 5 (espessura da amostra) no curvamento das amostras, para Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 4 e 14.



Fonte: da autora (2021).

Gráfico 8 - Resultados testes F: Relação entre o RMS Relativo e o Índice 5 (espessura da amostra) no curvamento das amostras, para Índice 2 (sobreposição dos cortes) = 4 e 14.



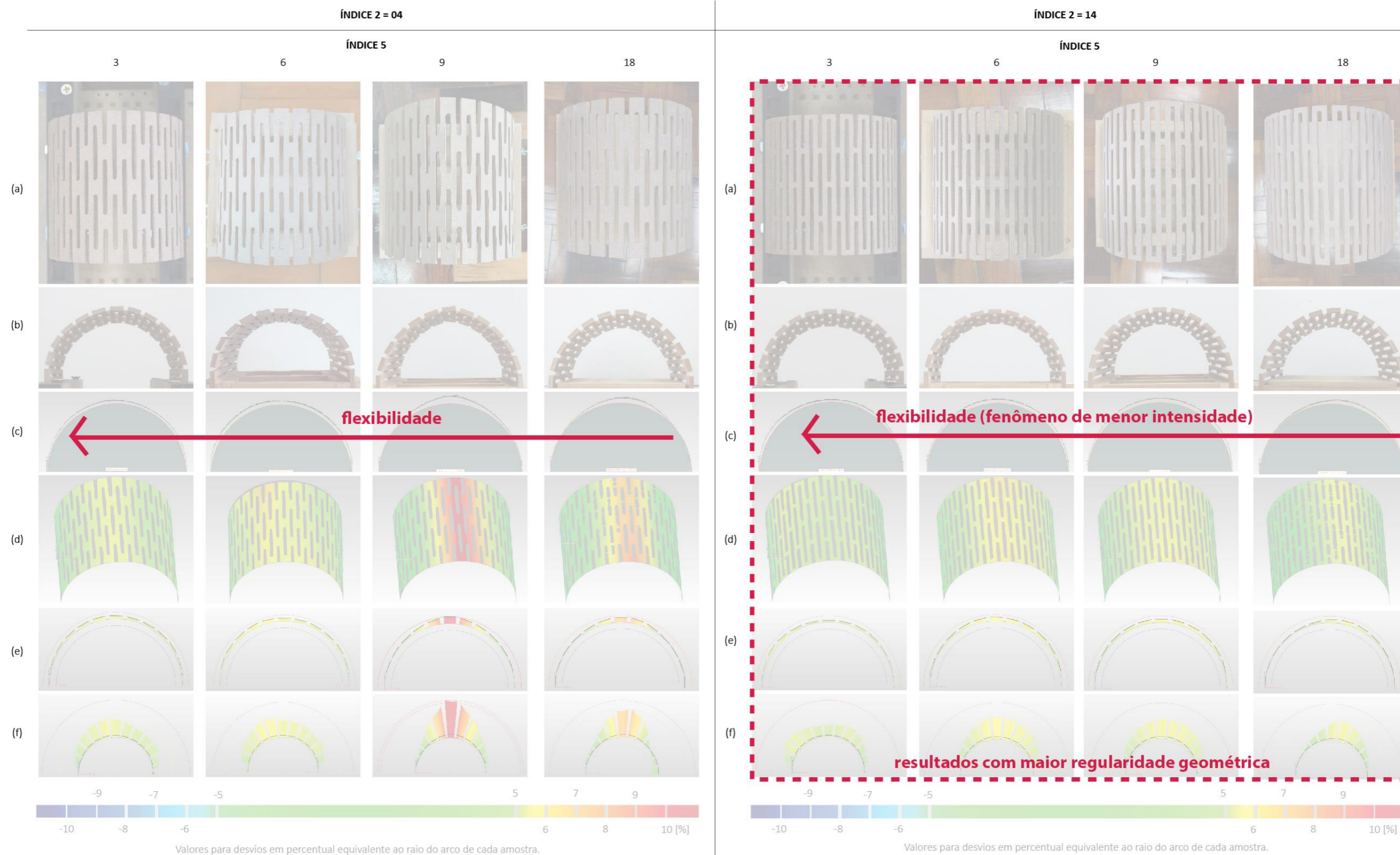
Fonte: da autora (2021).

Devido ao fato de ter sido escolhida a amostra mais rígida de 3 mm de espessura que conseguiu ser curvada no raio desejado (Índice $2 = 4$), quando se tentou ampliar a escala do padrão de corte da amostra essa ampliação possivelmente resultou em demasiada rigidez para as espessuras de 9 e 18 mm. No caso da amostra de 18 mm não houve rompimento, entretanto notou-se uma zona de maior deformação e possivelmente de tensão. Além disso, nessa peça também é muito pouco visível a deformação dos segmentos, parecendo esses absolutamente planos, o que confirma a falta de amortecimento da curvatura ao longo do material, por excesso de rigidez desse. Com isso conclui-se que, apesar do material poder ter sido curvado, esse não apresentava a flexibilidade necessária para a obtenção de uma geometria precisa e regular.

Nas amostras de índice $2=14$ as tendências observadas para as outras foram notadas porém com menor intensidade (Figura 78). Nesse caso os arcos de 6 e 9 mm resultaram bastante regulares, apesar de terem se projetado para fora da geometria-alvo com mais intensidade e com desvios mais concentrados do que a amostra de 3 mm. Já na amostra de 18 mm nota-se uma maior irregularidade e concentração de desvios mais intensa em uma região. Apesar disso, para o índice $2=14$ os resultados para as amostras de todas as espessuras foram aceitáveis dentro das tolerâncias estipuladas, além de não haver ruptura em nenhuma delas. Esta observação reforça a relevância da sobreposição de cortes para a flexibilidade da peça.

Os gráficos de desvio RMS absoluto e relativo para os dois tipos de amostras apontaram para tendências similares de comportamento. No caso do RMS absoluto tem-se um aumento quase linear dos desvios para todas as amostras, e que acompanha o aumento das espessuras. Esse comportamento já era esperado, visto a mudança de escala dos experimentos e possibilidade de erros intrínsecos a esse. Ao analisar o gráfico de desvio RMS relativo não há uma tendência evidente, podendo-se notar, porém, que os desvios relativos para as duas amostras de 18 mm se mostraram menores com relação às outras amostras. Apesar dessa constatação, ao analisarmos esses valores juntamente aos gráficos de desvios nota-se que a deformação desses arcos se deu de maneira mais concentrada, o que pode ter contribuído para que o restante da amostra coincidissem com a geometria-alvo. Isso pode ter interferido no resultado de desvios RMS relativos que, analisado isoladamente indica um resultado muito positivo para as amostras de 18 mm. Assim, é enfatizada a necessidade de diferentes tipos de análises para que se chegue a uma conclusão correta do comportamento das amostras.

Figura 78 - Tendências observadas pelas análises dos testes F.



(a) e (b) amostras posicionadas em arco no dispositivo; (c) imagem 2D da nuvem de pontos resultante da digitalização sobreposta ao cilindro de raio de arco ideal; (d) análise de desvios 3D; (e) análise de desvios 2D; (f) análise de desvios 2D com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Pode-se supor que há algum fator que faz com que as peças mais espessas apresentem maior rigidez, visto que o arco foi tendo seus desvios aumentados com relação à peça inicial e foi notado o surgimento de deformações nas geometrias. Entretanto, esse comportamento pode não ser linear ou exclusivamente dependente da espessura, uma vez que mesmo a peça mais rígida de 18 mm pôde ser curvada sem romper (diferente da peça de 9 mm). Isto pode se dar pela redução observada no Módulo de Elasticidade e na Resistência à flexão com o aumento da espessura do painel, conforme a tabela de propriedades do fabricante (Tabela 2). Esses dados indicam que os painéis de MDF mais espessos são originalmente mais flexíveis, o que poderia justificar a possibilidade de curvamento da chapa de 18 mm.

Se levarmos em conta apenas as tolerâncias admitidas nessas análises, com exceção à peça de 9 mm de espessura e índice $2=4$, os resultados obtidos poderiam ser considerados aceitáveis. Porém, pelas análises de desvios tridimensionais para essas amostras e pelos resultados obtidos para as amostras de Índice $2 = 4$, nota-se que os resultados de curvamento obtidos a partir do aumento de espessura não são iguais aos resultados para a amostra de 3 mm. Assim, o aumento de escala não pode ser considerado confiável sem que sejam feitos testes prévios levando em conta os fatores que influenciam na rigidez do material, em especial para aumentos muito significativos de espessura.

4.4 DISCUSSÃO

A partir da análise dos resultados dos testes foi possível fazer diversas inferências sobre o comportamento do material. Pôde-se observar os efeitos de cada um dos parâmetros envolvidos e compará-los com os apontamentos existentes na literatura. Além disso, os resultados dos parâmetros foram sempre relacionados com a sua influência na precisão da geometria de MDF, que é o foco deste estudo.

Com relação à quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão do arco notou-se que, de fato, essa interfere muito na flexibilidade do material com *kerfing* quando curvado e da consequente possibilidade de obtenção da geometria desejada (GUTOWSKI, 2017; CAPONE e LANZARA, 2019; GURSOY e OZKAR, 2015), conforme se observa na Figura 79. Esse parâmetro tem também grande influência na limitação dos movimentos parasíticos da peça, entretanto, essa diferença só é notada significativamente entre a peça com um máximo de dois desses segmentos e a com três, uma vez que a primeira permite movimentos como a torção e alongamento do conjunto. O aumento desse parâmetro em muitos casos inviabilizou o curvamento devido ao excesso de rigidez da peça, de modo que se considerou indesejado quando da busca por uma maior flexibilidade.

Figura 79 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes quantidades de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão.



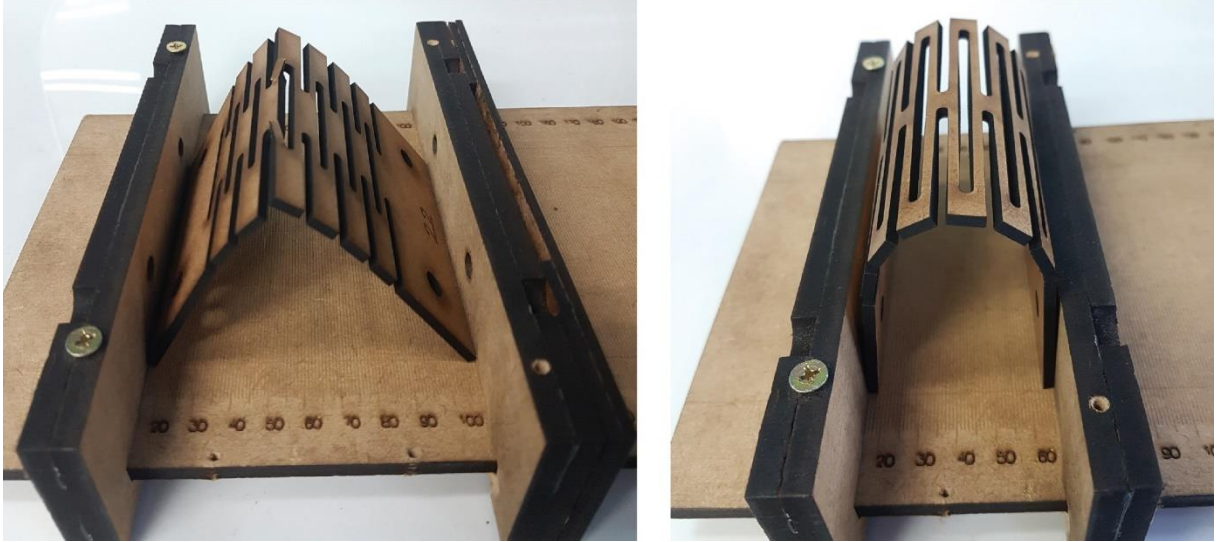
Fonte: da autora (2021).

Além disso, cabe mencionar que apesar de o movimento de flexão do conjunto depender principalmente da torção dos segmentos paralelos ao eixo de flexão (HOLTERMAN, 2018; MATINI e HAGHNAZAR, 2018), o aumento da quantidade desses segmentos não aumenta a flexibilidade do material (como poder-se-ia esperar e que ocorre quando do aumento dos segmentos perpendiculares ao eixo de flexão). Isso é justificado pois, considerando-se a manutenção da largura total da peça, ao aumentar a quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo se reduz o comprimento dos segmentos paralelos a esse eixo, que são os principais responsáveis pela flexibilidade do material. Essa depende da capacidade de torção desses segmentos que, por sua vez, aumenta quanto mais compridos forem.

Com relação ao aumento na flexibilidade e, nesse caso, da precisão geométrica decorrente do aumento na sobreposição dos cortes (LANZARA e CAPONE, 2019; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017), notou-se que esse interfere bastante na flexibilidade da peça (conforme se nota na Figura 80), porém essa influência ocorre principalmente entre as peças mais rígidas (com menor sobreposição) e as intermediárias. Porém, na medida em que a peça quando curvada adquire uma uniformidade nos desvios geométricos, o aumento da flexibilidade pelo aumento da sobreposição de cortes torna-se quase imperceptível. Ou seja, as peças com o parâmetro de sobreposição limite (no qual os segmentos entre cortes têm largura igual ou aproximada à espessura do material), não apresentam resultados de desvios muito inferiores àquelas com sobreposição intermediária. Com isso, considera-se mais interessante a utilização de valores de sobreposição de corte intermediários, uma vez que resultam em peças mais resistentes quando comparadas com valores-limite (o que normalmente é desejado para que o material não resulte frágil) porém ainda assim conseguindo conformar a geometria desejada. Essa diferença entre valores de sobreposição de cortes pode ser observada no Quadro 7, no qual se vê que

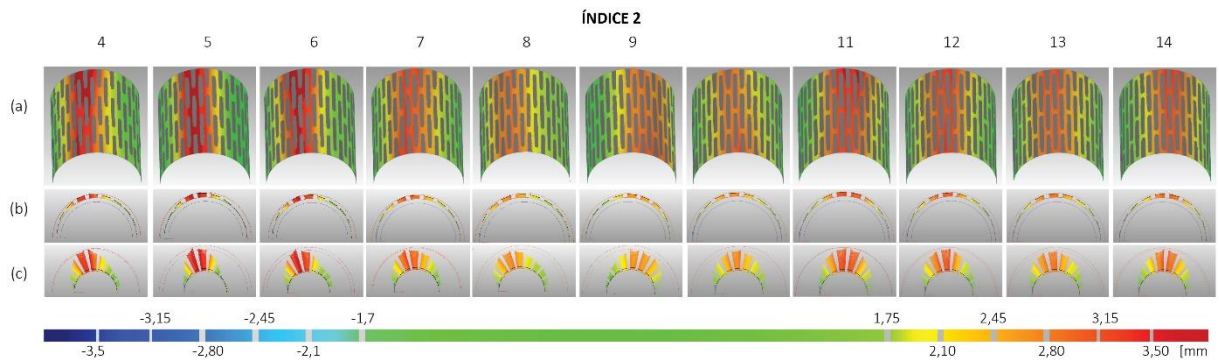
as peças com menor sobreposição de cortes tem mudanças de cores mais intensas e as demais são mais homogêneas.

Figura 80 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes valores de sobreposição de cortes.



Fonte: da autora (2021).

Quadro 7 - Resultados das análises geométricos para avaliação dos efeitos da mudança de sobreposição dos cortes.



Análises geométricas comparativas entre as geometrias obtidas e a geometria-alvo para as amostras de raio 35 mm e espessura 3 mm: (a) análise tridimensional de desvios; (b) análise bidimensional de desvios por seccionamento; (c) análise bidimensional de desvios por seccionamento com magnificação de erros. Fonte: da autora (2021).

Quando da análise dos efeitos decorrentes de alterações nos parâmetros da geometria como um todo, tem-se que o aumento da largura da peça não resultou em um aumento de flexibilidade conforme esperado. Supõe-se que o aumento nessa medida teria que ser muito significativo para atingir o resultado desejado. Logo, esse parâmetro parece ter uma relevância reduzida para o curvamento das peças com relação aos outros parâmetros. Resultados para a mudança desse parâmetro estão ilustrados na Figura 81.

Figura 81 - Exemplos do resultado de curvamento para amostras com diferentes larguras.

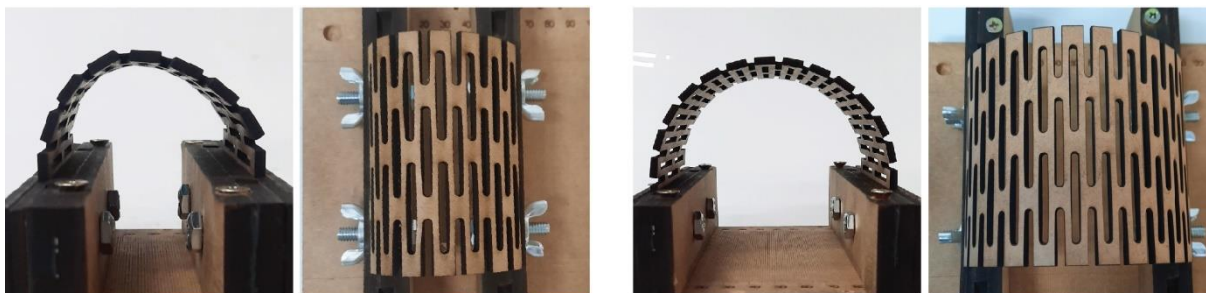


Fonte: da autora (2021).

Cabe notar que tanto a alteração da quantidade de segmentos perpendiculares ao eixo de flexão e a sobreposição dos cortes (mantendo-se as medidas gerais da peça) como o aumento da largura da peça em busca de uma maior flexibilidade se baseiam na mudança do comprimento dos cortes. Ao alterar-se algum desses parâmetros na direção de uma maior flexibilidade para o material consequentemente se está aumentando essa medida. Como o *kerfing* baseia-se primordialmente na torção dos segmentos paralelos ao eixo de flexão, o resultado tende a ser de maior flexão do conjunto, uma vez que o comprimento desses segmentos determina sua capacidade de torção, conforme apontado por Nelson et al. (2016).

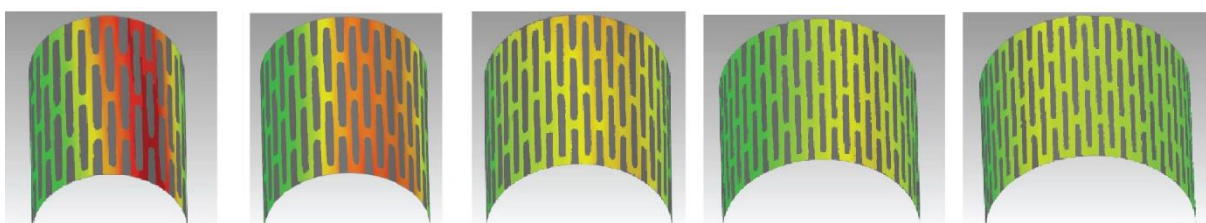
Também foi observado que o aumento do raio do arco foi muito eficiente em aumentar a precisão da geometria obtida com relação à desejada (Figura 82 e Figura 83). Considerando-se que foram testados parâmetros limite do padrão de corte para obter a máxima flexibilidade sem que a peça apresentasse demasiada fragilidade (largura dos segmentos, dimensão dos segmentos entre cortes, etc.), pode-se afirmar que a peça de MDF de 3 mm não poderia ser curvada no raio inicial desejado sem incluir movimentos parasíticos no conjunto ou sem que a largura da peça tivesse que ser drasticamente ampliada. Logo, o aumento do raio se apresentou como última alternativa para uso do padrão de corte determinado.

Figura 82 - Exemplo do resultado de curvamento para amostras com diferentes raios de arco.



Fonte: da autora (2021).

Figura 83 - Evolução da precisão da geometria junto ao aumento do raio.



Fonte: da autora (2021).

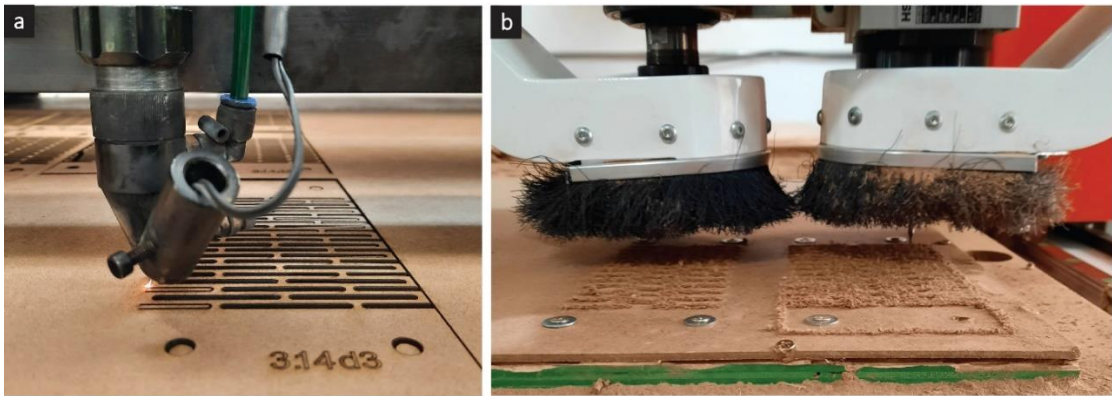
Ao comparar os dois parâmetros da geometria-alvo que foram variados considera-se que a alteração do raio do arco foi mais eficiente em obter uma geometria precisa do que o aumento da largura desse. O aumento do raio, nesse caso, foi equivalente ao aumento na densidade de cortes, o que, conforme a literatura, aumenta a capacidade de deformação do material (BORHANI e KALANTAR, 2017; CHEN et al., 2018; GOMES, 2017; GURSOY e OZKAR, 2015; GÜZELCI, ALAÇAM e BACINOĞLU, 2017; HOLTERMAN, 2018; LANZARA e CAPONE, 2019; MITOV et al., 2019; ZARRINMEHR et al., 2017a; WEI e SINGH, 2017). Esse aumento de densidade mostrou-se mais eficaz do que o aumento do comprimento dos cortes, obtido pelo aumento da largura da peça. Baseando-se na lógica apresentada por Nelson et al. (2016), ao aumentar o comprimento do corte aumenta-se a capacidade de torção de cada linha de articulação (ou segmentos), enquanto o aumento no raio equivale ao aumento na quantidade de linhas de articulação, que somadas definem a capacidade de flexão do conjunto.

Foram utilizados, portanto, dois métodos distintos para obtenção de uma geometria aproximada à geometria-alvo. Ao alterar os parâmetros de quantidade de segmentos entre cortes, sobreposição dos cortes e largura da peça, foi alterada a capacidade de flexão do conjunto. Por outro lado, ao aumentar o raio da geometria sem alterar nenhum dos demais parâmetros, foi reduzida a solicitação de flexão do conjunto. O aumento do raio do arco fez com que as linhas de segmentos tivessem que curvar-se em um ângulo menor, solicitando menor torção desses e reduzindo, por consequência, a tensão no material. Dessa forma, esse parâmetro não aumentou a flexibilidade das

amostras nem sua precisão geométrica com relação à geometria-alvo, apenas adaptou essa última ao curvamento possível para o material.

No que diz respeito à utilização de diferentes processos para corte das amostras com *kerfing*, pode-se afirmar que essa não interfere nos resultados, sendo esses muito similares para corte laser e fresamento CNC. Há sim uma diferença de estética e de necessidade de pós tratamento que pode ser importante dependendo da utilização prevista para o material, uma vez que o corte a laser resulta no escurecimento das laterais dos segmentos, enquanto o fresamento resulta na necessidade de lixar as peças após o corte, uma vez que pode haver rebarbas de MDF ao final do processo (Figura 84).

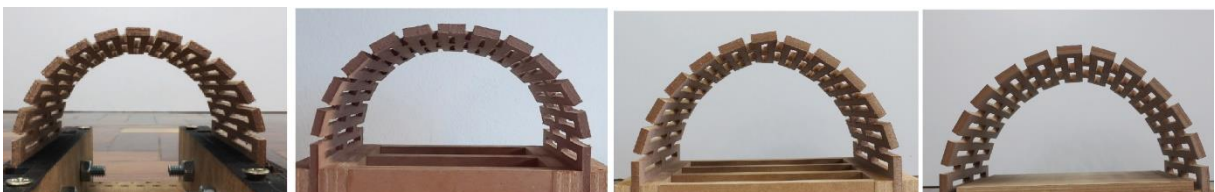
Figura 84 - Diferenças de resultados entre corte a laser e fresamento CNC.



(a) corte a laser, resultando em laterais do material queimadas; (b) fresamento CNC, resultado no material com farpas. Fonte: da autora (2021).

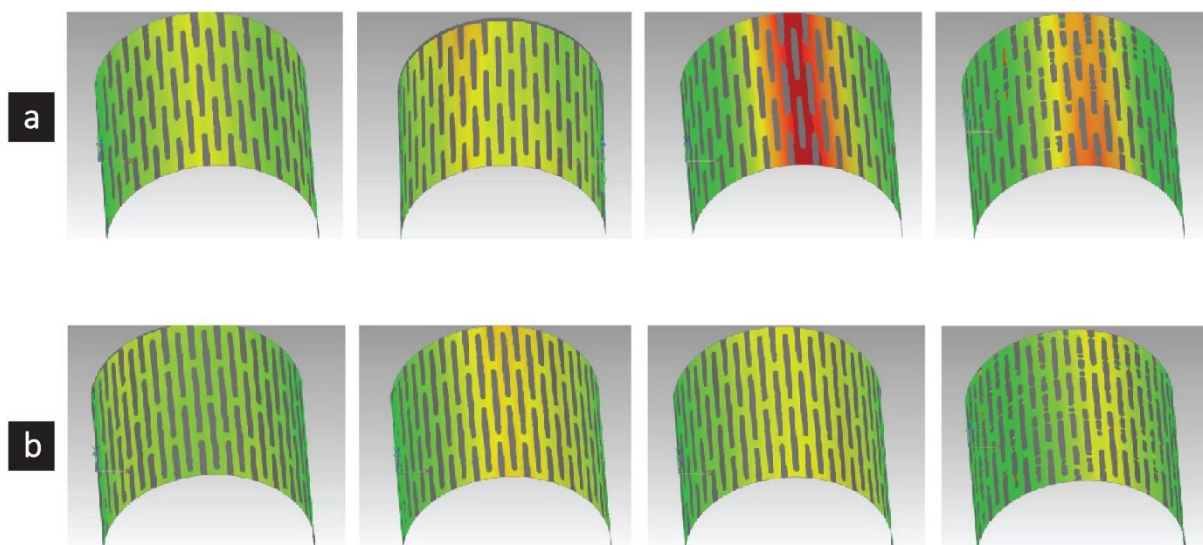
Com relação à influência da espessura do material no seu comportamento foi demonstrado que o aumento desse parâmetro aumenta a rigidez da peça, não resultando em geometrias com precisão absoluta equivalente entre escalas (Figura 85). A rigidez aumenta com o aumento de espessura, gerando deformações maiores nos arcos obtidos e em alguns casos até mesmo rompendo no momento do curvamento. Isso se deve ao fato de essa medida ser fortemente determinante da capacidade de torção e flexão dos segmentos do material. Entretanto, esse aumento de rigidez não impediu a maioria das peças de serem curvadas na posição desejada. Além disso, notou-se que os resultados de precisão entre diferentes escalas foram melhores para amostras com parâmetros geométricos de maior flexibilidade (Figura 86).

Figura 85 - Exemplo de resultados de curvamento para amostras com diferentes espessuras.



Fonte: Da autora (2021).

Figura 86 - Resultados de precisão geométrica para amostras com diferentes espessuras e sobreposição de cortes.



(a) amostras com sobreposição de cortes = 4 (menor flexibilidade); (b) amostras com sobreposição dos cortes = 14 (maior flexibilidade). Fonte: da autora (2021).

O aumento da espessura acarreta em uma mudança na chapa de MDF utilizada, o que acompanha uma alteração nas propriedades intrínsecas desse. Algumas dessas propriedades influenciam no comportamento do material quando se tenta curvá-lo, como é o caso do módulo de Young, da resistência à flexão e do módulo de cisalhamento. Segundo dados fornecidos pelo fabricante das amostras utilizadas nesse estudo (e que seguem a norma brasileira), quanto mais espessa a chapa menor seu módulo de Young e sua resistência à flexão, ou seja, mais flexível é a peça. Esse aumento da flexibilidade intrínseca pode amenizar a resistência à torção dos segmentos decorrente do aumento de espessura. Essas variáveis são determinantes do comportamento tanto nos segmentos em torção quanto em flexão (Nelson et al., 2016).

A redução do módulo de Young e de cisalhamento do material que ocorre com o aumento de espessura pode ser justificada pela menor densidade total do MDF nas amostras mais espessas (SEBERA, 2014; GANEV et al., 2005b), o que também pode ter contribuído para que essas fossem mais quebradiças. Além disso, a tendência para uma maior complexidade no perfil de densidade dessas amostras (Sebera, 2014), apresentando essas um número maior de camadas de diferentes densidades, pode causar um aumento na tendência ao cisalhamento entre camadas internas (Kelly, 1977).

Levando isso em consideração, o resultado de curvamento do MDF entre diferentes espessuras pode ser justificado por uma combinação de fatores. Conforme mencionado, alguns desses contribuem para que a peça fique mais rígida (o aumento de espessura) e outros para que a peça seja mais flexível e quebradiça (as propriedades intrínsecas do material). Apesar do aumento de flexibilidade decorrente

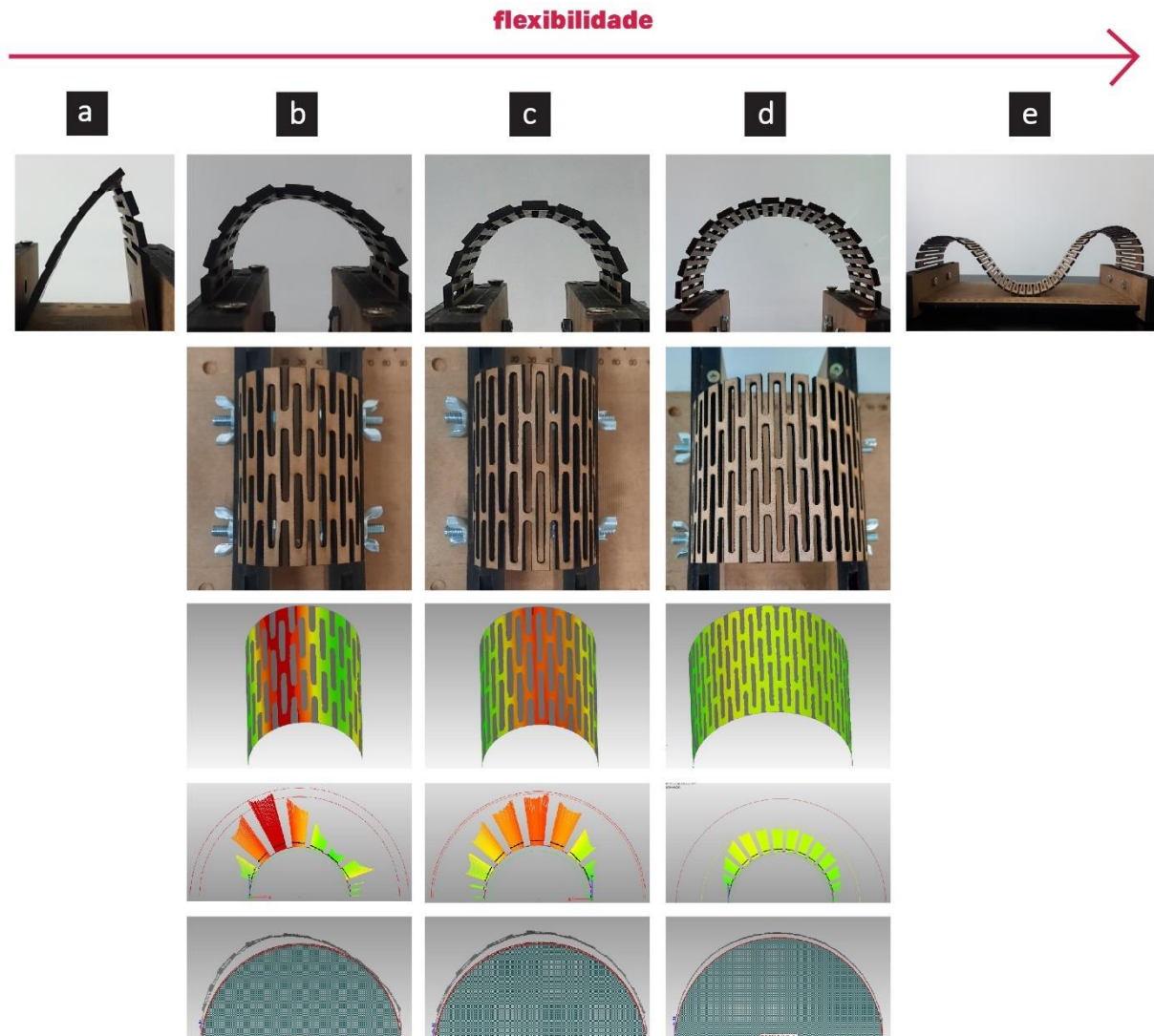
das mudanças de propriedades do material, o aumento da espessura parece ter maior influência no comportamento do material.

Com relação à geometria do arco obtido nos testes notou-se uma mudança geral de curvamento das peças conforme se aumenta sua flexibilidade (por alteração de parâmetros do padrão de corte ou a largura da peça) ou quando se altera o raio do arco. No caso de peças excessivamente rígidas nota-se uma tendência ao material inclinar-se para um dos lados, gerando picos de desvios geométricos (que possivelmente representam os locais de maiores tensões –Quadro 8b). Em alguns casos de rompimento das peças essas o fizeram em porções do material localizadas nessas áreas (Quadro 8a).

Quando a peça já apresenta maior flexibilidade, porém não o suficiente para conformar a geometria desejada com precisão, há uma tendência à expansão do arco, ou seja, uma deformação da superfície escaneada para fora da projeção da geometria ideal (Quadro 8c). Isso pode ser atribuído à torção de segmentos paralelos ao eixo do cilindro, que são os principais responsáveis pela curvatura da superfície, visto que os segmentos perpendiculares ao eixo do arco toleram pouca flexão. Ao se tentar curvar a amostra em determinado raio os segmentos em torção são solicitados a vencer certo ângulo, entretanto, devido ao excesso de tensão no material a peça acaba por se projetar para fora da geometria desejada, assim mantendo uma quantidade de torção permitida pelos segmentos.

Já quando a peça começa a adquirir maior flexibilidade (por alteração de parâmetros do padrão de corte) ou quando se aumenta o raio de arco desejado, o material tende a se aproximar mais da geometria-alvo e a ter seus desvios geométricos melhor distribuídos (Quadro 8d). No caso desse estudo em todas as peças avaliadas predominou a presença de desvios geométricos positivos, ou seja, que se projetaram para fora da geometria-alvo. Acredita-se, entretanto, que pela tendência de comportamento do material de ter desvios mais bem distribuídos para peças mais flexíveis, caso se aumentasse muito a flexibilidade da peça ou se experimentasse um raio de arco muito maior do que o ideal a peça poderia vir a tombar. Isso ocorreria devido à falta de sustentação do material quando excessivamente flexível. Algumas peças apresentaram esse comportamento nos testes preliminares, mas posteriormente foram descartadas do estudo (Quadro 8e).

Quadro 8 - Geometrias obtidas a partir de amostras com diferentes graus de flexibilidade/ tensão.

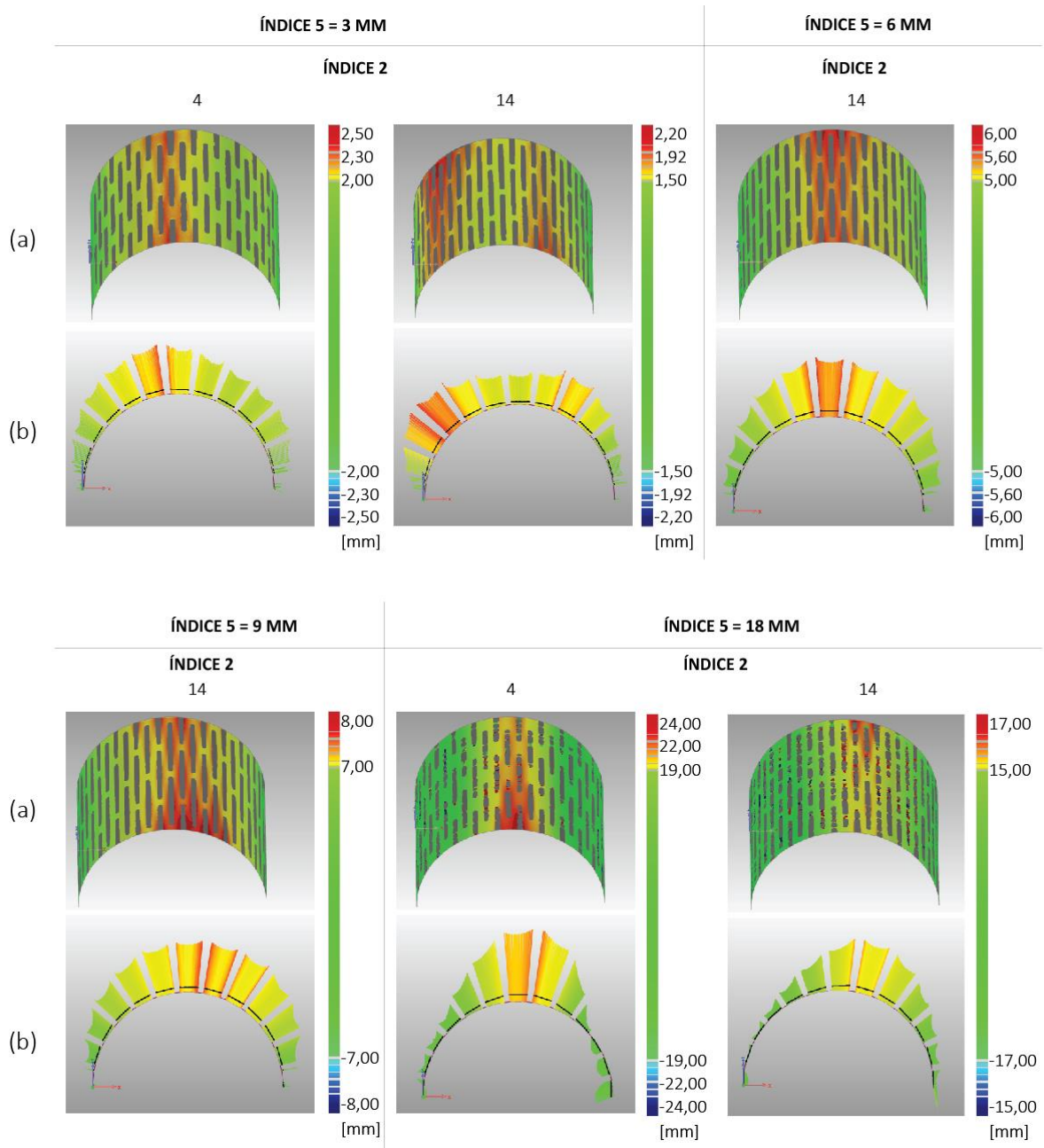


Amostras (a) amostra com rigidez extrema que sofreu rompimento com o curvamento; (b) amostra excessivamente rígida, que curvou sem romper porém criando pontos de alta deformação e resultando elíptica; (c) amostra com uma maior flexibilidade, resultando em uma geometria mais homogênea porém ainda toda projetada para fora da geometria-alvo; (d) amostra com flexibilidade adequada que obteve uma geometria que coincidiu com a geometria-alvo em grande parte, tendo apenas algumas áreas de deformação mais intensa; (e) amostra que, por flexibilidade excessiva, tombou. Fonte: da autora (2021).

Além das observações comparativas entre as amostras, foi possível notar pela análise de desvios 2D com magnificação de erro e análise de desvios 3D que as extremidades laterais dos segmentos em torção têm maiores desvios do que a porção central desses ou que os segmentos em flexão. Isso indica que essas áreas são projetadas mais intensamente para fora da curvatura ideal, demonstrando uma tensão mais intensa, o que vai ao encontro da expectativa de comportamento dos segmentos em torção. Esse fenômeno foi observado em amostras de diferentes espessuras, e para torná-lo mais visível foram feitas em algumas amostras análise de desvios com tolerâncias nominais e máximas distintas, que consta no Quadro 9 e na ampliação constante na Figura 87. Além disso, é possível perceber uma maior deformação nos segmentos nas extremidades do arco (borda), que se projetam mais para fora

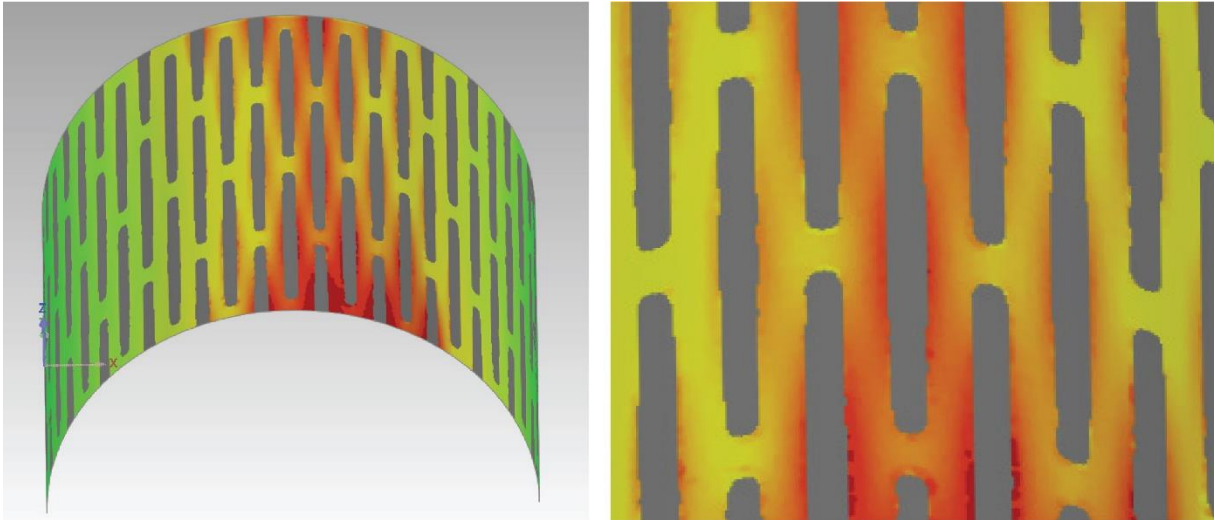
da geometria-alvo por não terem continuidade de material que os conduza para baixo. Nota-se, também, que ao se curvar a estrutura os segmentos são mantidos visualmente planos (Figura 88), podendo-se perceber sua torção apenas devido à alta precisão das análises de desvios feitas a partir da digitalização 3D.

Quadro 9 - Resultados das análises geométricas para avaliação da tensão nas áreas laterais dos segmentos.



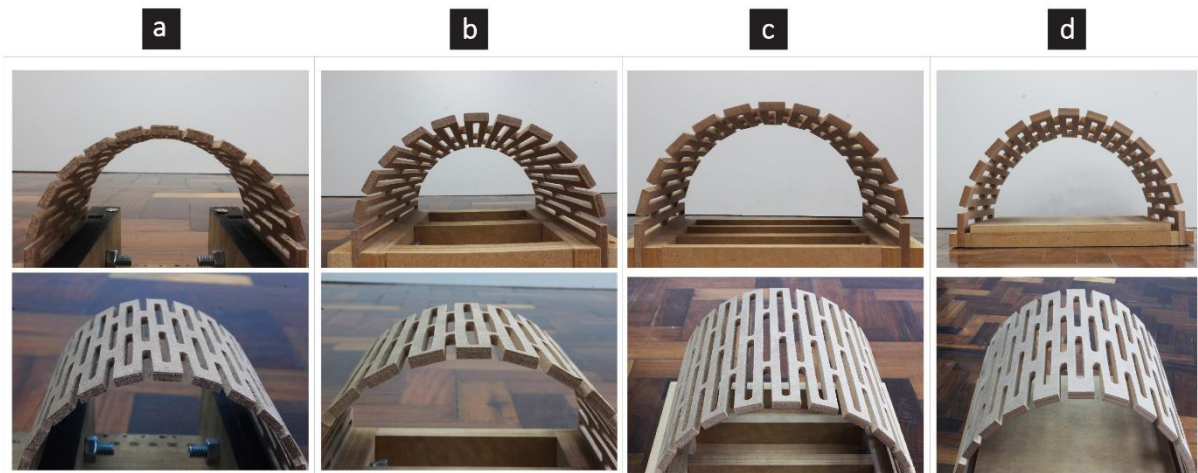
Análises de desvios (a) tridimensionais e (b) bidimensionais por sectionamento com magnificação de erros. Análises com tolerâncias reduzidas para avaliação da deformação nas laterais dos segmentos. Fonte: da autora (2021).

Figura 87 - Resultado ampliado para a para avaliação da tensão nas áreas laterais dos segmentos da amostra de espessura 9 mm e sobreposição de cortes 14.



Fonte: da autora (2021).

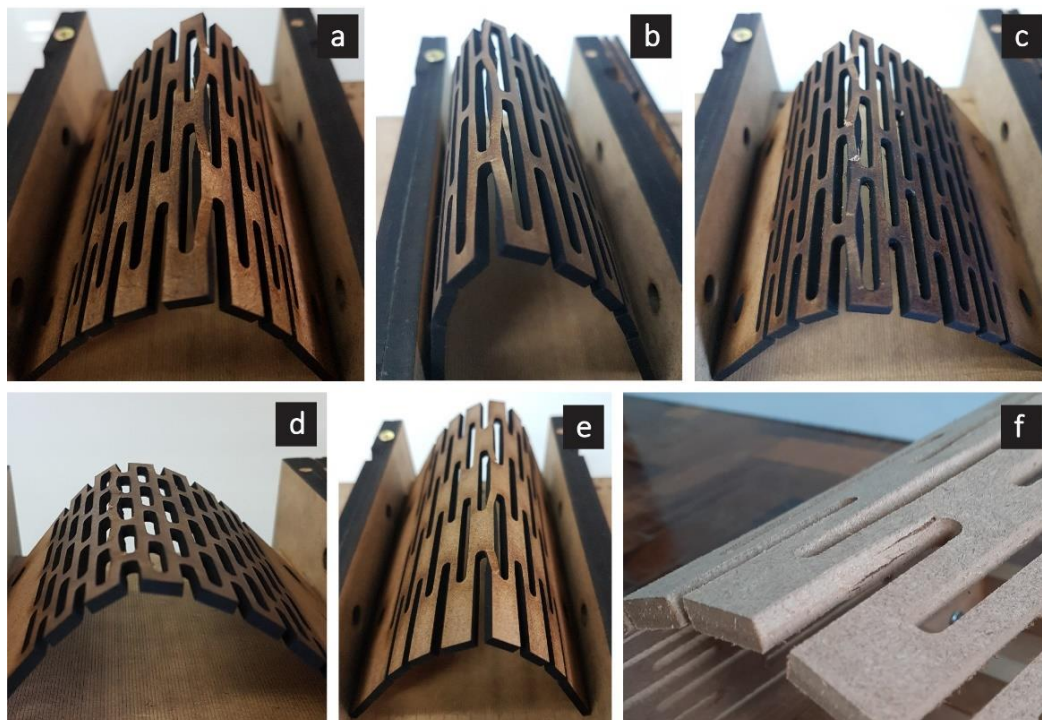
Figura 88 - Fotos de amostras com segmentos aparentemente planos.



Amostras de diferentes espessuras, pertencentes ao teste F: (a) F-Q03.S04.L90.R45.E03; (b) F-Q03.S14.L192.R96.E06; (c) F-Q03.S14.L288.R144.E09; (d) F-Q03.S04.L578.R289.E18. Fonte: da autora (2021).

Outra observação pertinente foi que as amostras que romperam o fizeram por cisalhamento. Esse esforço se deu, na maioria dos casos, tendo início no encontro da porção curva dos cortes com a linha reta desses e indo (em diagonal na espessura do material) em direção à metade do comprimento do corte na face oposta (interna ao arco) do MDF. O cisalhamento foi, pelo o que se pôde observar, resultante do esforço de torção dos segmentos. Esse fenômeno é ilustrado pela Figura 89. Nos casos em que não houve rompimento da peça, mas apenas deformações maiores do que as desejadas, pode-se concluir que, mesmo que o material tenha resultado bastante tensionado, a tensão limite para torção do material não foi ultrapassada, mantendo-se assim a integridade do MDF.

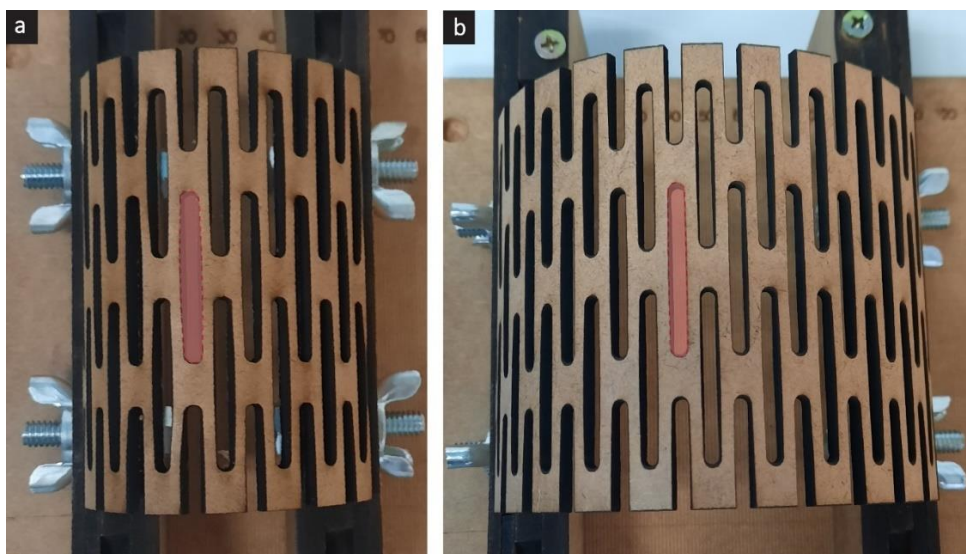
Figura 89 - Foto de amostras de diferentes etapas de testes que romperam por cisalhamento.



Amostras de códigos (a) A-Q03.S04.L90.R25.E03; (b) A-Q03.S10.L90.R25.E03; (c) A-Q04.S08.L90.R25.E03; (d) A-Q05.S04.L90.R25.E03; (e) C-Q03.S02.L125.R25.E03; (f) F-Q03.S04.L288.R144.E09. Fonte: da autora (2021).

Também é importante observar que nesses casos com essa expansão do arco e torção dos segmentos a geometria dos vazios no material são alteradas, de modo que esses também absorvem em parte a deformação do material. Com relação a esses vazios, quanto mais tensionado estiver o material maior a alteração na geometria desses espaços (Figura 90).

Figura 90 - Diferença entre a geometria dos vazios gerados pelos cortes quando a peça é curvada.



Peças vistas de cima com um vazio assinalado para comparação: (a) peça de raio menor, maior tensão (b) peça de raio maior, menor tensão. Fonte: da autora (2021).

5 CONCLUSÃO

Este estudo investigou a técnica de kerfing aplicada ao MDF e a influência da espessura do material no curvamento desse. Foram levantadas pesquisas existentes sobre a técnica em si e sobre técnicas similares com o objetivo de ampliar o conhecimento e comparar tendências e metodologias. Além disso, foram estudadas as características do material em questão para que se pudesse compreender seu comportamento e possíveis efeitos da técnica nele.

O estudo visou analisar a precisão dos resultados geométricos com kerfing em escala reduzida com relação a uma construção de dimensões reais, e por isso buscou seguir uma metodologia e ordem de ensaios que se assemelhasse ao processo de projeto e prototipagem. A lógica do estudo se assemelhou à de projetos de arquitetura e design, na qual a geometria (projeto) é inicialmente definida em escala reduzida (maquete) para então serem testados aspectos construtivos e feita a construção em tamanho real.

As análises foram divididas em três etapas principais: seleção de parâmetros geométricos do padrão de corte e da geometria-alvo, comparação entre processos de corte e determinação da influência da espessura no curvamento do MDF. O estudo foi conduzido utilizando-se amostras de MDF e padrão de corte composto por cortes lineares paralelos ao eixo de flexão da amostra, buscando-se curvá-la em 180°.

Os resultados indicaram a possibilidade de curvar ou não as peças no raio desejado e a precisão da curvatura obtida pela variação de parâmetros. Além disso, foram relatados efeitos geométricos que podem ocorrer nas peças e que são reflexos do comportamento do material com kerfing. Notou-se que a geometria da peça quando curvada está diretamente relacionada com suas solicitações mecânicas, tanto numa escala maior quanto menor. Estas solicitações mecânicas, por sua vez, dependem dos parâmetros geométricos do padrão de corte e da geometria-alvo.

Pela variação dos parâmetros geométricos do padrão de corte notou-se que a rigidez da amostra aumenta junto à quantidade de segmentos perpendiculares ao seu eixo de flexão, e foi considerada ideal a peça com no máximo três segmentos, pois há limitação de movimentos parasíticos (como alongamento e torção do conjunto, presentes na peça de dois segmentos) sem que haja muita redução na flexibilidade da peça (que ocorreu nas peças de quatro e cinco segmentos). Com relação à sobreposição dos cortes confirmou-se a tendência do aumento da flexibilidade da peça com o aumento dessa, porém considerou-se ideal a seleção de um valor intermediário de sobreposição, uma vez que notou-se que esse aumento é mais significativo entre as peças mais rígidas e as intermediárias testadas.

No que diz respeito aos parâmetros da geometria-alvo foi observado que o aumento da largura não teve tanto efeito no aumento da flexibilidade da peça. Já com relação ao raio do arco notou-se que a mudança desse foi muito eficiente em aumentar a precisão da geometria obtida quando comparada à ideal.

Quanto aos processos de corte que foram testados notou-se que, adotando-se parâmetros de corte adequados, não há diferença de resultados de curvamento entre as peças. As únicas diferenças percebidas dizem respeito a aspectos estéticos e do processo em si (o escurecimento das laterais do corte resultante do processo de corte a laser e a necessidade de remoção de resíduos de MDF pelo processo de fresamento).

Pela análise da geometria como um todo tem-se que nas peças que apresentaram demasiada rigidez para serem curvadas em arco e quando o esforço de curvamento aplicado foi superior ao tolerado pelo material (provavelmente quando o limite máximo de torção dos segmentos foi ultrapassado) ocorreu o rompimento da peça. Esse rompimento se deu por cisalhamento, apresentando-se de modo abrupto em peças muito rígidas. Em peças rígidas quando não houve esse rompimento, surgiram picos de deformação, resultando em arcos com efeito elíptico (ou ovalado). Quando a peça apresentou um pouco mais de flexibilidade, porém ainda era mais rígida do que o necessário para conformar a geometria desejada, o material se expandiu e formou um arco que projetou-se para fora da geometria-alvo. Na medida em que a peça apresentou maior flexibilidade a geometria resultou mais homogênea, coincidindo em grande parte com a geometria-alvo, havendo áreas de deformação mais acentuadas distribuídas ao longo do material.

Quando se trata de uma análise mais aproximada do material curvado com kerfing, foram notadas algumas tendências. Apesar dos segmentos do material aparentarem terem permanecido planos, alguns fenômenos ocorrem: as laterais dos segmentos paralelos ao eixo de flexão do arco se projetam para fora da geometria devido à torção que esses sofrem no curvamento, assim como os segmentos das extremidades do arco; os segmentos perpendiculares ao eixo sofrem flexão (que não é percebida a olho nu nem nas análises contidas nesse trabalho, mas análises mecânicas constantes na literatura existente indicam sua ocorrência); e os vazios gerados pelos cortes tem sua geometria alterada. Esses fenômenos variam de intensidade a depender do quão rígida ou flexível esteja a peça como um todo e de seus parâmetros de padrão de corte.

A espessura do material, por sua vez, demonstrou ser de extrema relevância em seu comportamento, de modo que seu aumento intensificou consideravelmente a rigidez desse. Essa maior rigidez fez com que as deformações nas geometrias fossem maiores nas amostras mais espessas e que a precisão geométrica do arco fosse reduzida, em alguns casos até mesmo havendo rompimento dessas

quando de seu curvamento. Entretanto, considera-se que possivelmente algumas propriedades intrínsecas do material contribuam para amenizar esse aumento de rigidez, como é o caso do módulo de Young e da resistência à flexão, que são menores para as chapas mais espessas. Essas propriedades podem ter contribuído para que fosse possível curvar as amostras mais espessas, apesar dos resultados geométricos (e possivelmente as solicitações mecânicas) não serem idênticos entre amostras. Além disso, as características de densidade dos painéis mais espessos, como a menor densidade total desses (que reduz o seu módulo de cisalhamento) e a maior variação no perfil de densidade do material (que aumenta a possibilidade de cisalhamento entre camadas) podem ter aumentado a facilidade de rompimento desses.

Desse modo, considera-se que é possível que se utilize a ampliação de escala das amostras tendo como base protótipos fabricados em amostras de 3 mm de espessura, porém há que se considerar que os resultados de flexibilidade do material não serão idênticos. Assim, não é recomendável a seleção de parâmetros geométricos limítrofes dos cortes (para obter maior rigidez no material) nas peças de 3 mm (como feito nesse estudo) para ampliação. Além disso, é possível que sejam necessários pequenos ajustes no padrão de corte ou na geometria-alvo para a correta adequação ao modelo em escala real, reduzindo as deformações na geometria e a tensão no material.

Apesar dessa necessidade de ajustes o teste em escala reduzida pode ser de grande utilidade no projeto, servindo como referência inicial do padrão de corte e parâmetros aproximados que podem ser adotados. Pelo conhecimento da influência dos demais parâmetros da geometria-alvo e dos cortes no resultado de curvatura por *kerfing* se tem também uma indicação de quais estratégias mais adequadas a se tomar para o ajuste da geometria em diferentes escalas.

Nesse trabalho foram analisadas diferentes causas para a alteração do comportamento de curvamento do MDF com aplicação de *kerfing* e os consequentes resultados formais desse comportamento. Entre amostras de mesma espessura há uma variação das propriedades de flexibilidade do material que derivam dos parâmetros geométricos de corte e da geometria-alvo e que, assim, são manipuláveis por alterações de projeto. Por outro lado, entre diferentes espessuras também foi observada variação nos resultados, porém essas foram causadas por uma combinação de parâmetros geométricos (a espessura do material) e características intrínsecas do MDF, que são diferentes para chapas de espessuras distintas.

Acredita-se que o presente estudo contribui para a ampliação no domínio sobre a técnica de *kerfing*, que visa que essa possa ser previsível e controlável. Apesar dos resultados para diferentes escalas não serem totalmente equivalentes, tem-se um maior domínio sobre o impacto que a mudança de espessura tem nos resultados de curvamento do material e, aliado a isso, um maior conhecimento

sobre a influência dos parâmetros geométricos dos cortes e da geometria-alvo sobre esse curvamento. Assim, aliando-se os dois conhecimentos pode-se adotar estratégias para aproximar os resultados. Além disso, o estudo buscou também analisar possíveis distorções menores na superfície decorrentes do *kerfing*, relacionando-as com o comportamento mecânico do material de modo que esse possa ser manipulado pela mudança de parâmetros a fim de evitar essas distorções.

Pela possibilidade de processamento por sistemas CAD-CAM e pelos resultados obtidos, o MDF e a técnica de *kerfing* podem ser inseridos adequadamente no contexto de integração digital de projeto e fabricação, num processo simultâneo de projeto e prototipagem. Assim, a dinâmica de criação no design, que envolve etapas apreciativas e ativas, é viabilizada nesse contexto digitalizado, aproximando-se do processo criativo manual porém com a agilidade apresentada pelos meios digitais e pela vantagem de possibilidade de testar os métodos construtivos de fato utilizados no projeto, aumentando a fidelidade desse com relação ao resultado final. Além disso, pelo maior domínio da aplicação de *kerfing* em MDF aumenta-se a probabilidade de utilização desse material para obtenção de curvas, ampliando assim das potencialidades formais desse e fazendo uso das demais vantagens de sua adoção em combinação com sistemas CAD-CAM.

Com relação à metodologia adotada para este estudo essa se mostrou eficiente na viabilização das análises pretendidas e na detecção de diversos fenômenos e aspectos relacionados à geometria de interesse. Acredita-se que os métodos utilizados demonstraram eficiência em todos os estágios do estudo: na possibilidade de adaptação da técnica de *kerfing* em um processo de projeto (pelo uso de software paramétrico); na facilidade de integração do projeto com o processo de fabricação das amostras (pelo uso de fabricação digital e de material de fabricação em massa); na obtenção da geometria a partir do material plano evitando possíveis deformações (pelo uso de dispositivo fabricado para curvamento e fixação das amostras na posição desejada); e na viabilização das análises com precisão e em diferentes escalas (pelo uso de digitalização tridimensional e análises geométricas digitais com variação de parâmetros).

Visto que houve diferenças entre resultados geométricos do *kerfing* para diferentes espessuras, seria interessante que estudos futuros explorassem adaptações no padrão de corte ou estabelecessem relações para que os resultados em diferentes escalas fossem equivalentes. Ou seja, ao constatar a maior rigidez das peças mais espessas e tendo-se o domínio dos parâmetros do padrão de corte e possibilidades de manipulação desse para deixar o material mais flexível, poderiam ser feitos ajustes no desenho dos cortes que resultassem em geometrias mais semelhantes entre diferentes espessuras. Além disso, poderiam ser feitos ensaios mecânicos que validassem as propriedades das amostras utilizadas, para que o domínio sobre o material fosse ainda maior e se pudesse estabelecer um intervalo

de propriedades, tendo assim maior segurança na aplicação da técnica. Também poderia ser interessante que fossem feitos testes com amostras de MDF de diferentes fabricantes, visto que pode haver diferenças na composição e no tipo de madeira utilizada na fabricação, o que provavelmente alteraria os resultados. Sugere-se também que os estudos sejam extensíveis para outros materiais aplicáveis à fabricação digital, como painéis acrílicos e metálicos, compensado multilaminado de madeira, etc. Por fim, poderiam ser investigados outros padrões de corte além do selecionado por este estudo.

O presente estudo demonstra a relevância da relação entre propriedades do material, processo de fabricação e forma na técnica de *kerfing*, visto que esses se influenciam mutuamente e interferem no resultado final para o produto desejado (conforme elaborado na contextualização deste estudo), podendo gerar novas possibilidades para materiais já conhecidos. Além disso, fica evidente a importância de se atentar para todos aspectos relacionados a cada um desses fatores, que são determinantes na aproximação dos resultados quando da ampliação de escala e para que a comparação entre eles seja válida. No que tange as propriedades do material, nesse caso sendo de maior interesse as mecânicas, essas podem variar de acordo com a marca e a espessura do painel. No que diz respeito ao processo de fabricação, tanto a etapa de corte quando a de curvamento e fixação podem interferir no resultado. No corte, há que se atentar à precisão dos equipamentos utilizados e aos parâmetros específicos para cada tipo de ferramenta para que o material não seja prejudicado e não haja alteração de dimensões. No curvamento, podem ocorrer danos à estrutura devido a erros intrínsecos de manuseio da peça, ou deformações na curvatura decorrentes da equivocada fixação do material. Já no que diz respeito à forma do material, além do cuidado quanto à equivalência dos parâmetros geométricos de cortes, há que se ter especial atenção à espessura real da amostra e de sua uniformidade ao longo do painel. Assim, a partir do conhecimento dos diversos parâmetros que interferem no *kerfing* e da devida cautela com relação aos aspectos mencionados, é possível ampliar o domínio sobre a técnica e, conseqüentemente, a confiança em sua aplicação.

REFERÊNCIAS

- ABLAT, MUHAMMAD ALI; QATTAWI, ALA. **Investigating the design and process parameters of folded perforated sheet metal**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, n. 102, p. 615–633, 2019. DOI: 10.1007/s00170-018-3149-5
- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas plantadas. **Anuário estatístico ABRAF: ano base 2012**. Brasília, 2013.
- ANIL, ENGIN BURAK; TANG, PINGBO; AKINCI, BURKU; HUBER, DANIEL. **Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data**. Automation in Construction, n. 35, p. 507–516, 2013. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.06.003
- ARIAS, EVELIO R. **ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS FOR END MILLING OPERATIONS. A THESIS IN INDUSTRIAL ENGINEERING**. 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculty of Texas Tech University, Estados Unidos, 1983.
- ASHBY, MICHAEL; JOHNSON, KARA. **Materiais e Design: a arte da seleção de materiais no projeto do produto**. 2ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- AYRILMIS, NADIR. **Effect of panel density on dimensional stability of medium and high-density fiberboards**. Journal of Materials Science, n. 42, p. 8551–8557, 2007. DOI 10.1007/s10853-007-1782-8.
- BELFORTE, D. A.; JAFFERSON, J. M. **Laser Cutting**. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016. DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.01853-1
- BERGLAND, LARS; ROWELL, ROGER M. **Wood Composites**. In: HOWELL, ROGER M. (ed.). **Handbook of WOOD CHEMISTRY AND WOOD COMPOSITES**. CRC Press, 2005, p. 284-306
- BERNAL, MARCELO; HAYMAKER; JOHN R.; EASTMAN, CHARLES. **On the role of computational support for designers in action**. Design Studies, n. 41, p. 163-182, 2015. DOI: 10.1016/j.destud.2015.08.001
- BIANCONI, FABIO; FILIPPUCCI, MARCO. **WOOD, CAD AND AI: Digital Modelling as Place of Convergence of Natural and Artificial Intelligent to Design Timber Architecture**. In: BIANCONI, FABIO; FILIPPUCCI, MARCO (ed.). **Digital Wood Design, Lecture Notes in Civil Engineering 24**. 2019. Springer, 2019, p. 19-23. DOI: 10.1007/978-3-030-03676-8_1
- BIAZUS, ANDRÉ; HORA, ANDRÉ BARROS DA; LEITE, BRUNO GOMES PEREIRA. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. BNDES Setorial, n. 32, p. 49–90, 2010.
- BLANCO, DAVID; VALIÑO, GONZALO, FERNÁNDEZ, PEDRO; RICO, J. CARLOS; MATEOS, SABINO. **Influence of part material and sensor adjustment on the quality of digitised point-clouds using conoscopic holography**. Precision Engineering, v. 42, p. 42–52, 2015. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.03.008
- BLEES, MELINA KATHERINE. **GRAPHENE AS ATOMIC PAPER: FROM BENDING STIFFNESS TO MECHANICAL METAMATERIALS**. 2015. Tese (PhD), Faculty of the Graduate School of Cornell University, Estados Unidos, 2015.

BLEES, MELINA K.; BARNARD, ARTHUR W.; ROSE, PETER A.; ROBERTS, SAMANTHA P.; MCGILL, KATHRYN L.; HUANG, PINSHANE Y.; RUYACK, ALEXANDER R.; KEVEK, JOSHUA W.; KOBRIN, BRYCE; MULLER, DAVID A.; MCEUEN, PAUL L. **Graphene kirigami**. *Nature* v. 524, p. 204-212, 2015. Doi:10.1038/nature14588

BOOTH, RILEY S.; GOLDSMITH, PETER. **MAKER: Fabricating a Flat-Pack Portable Display Using Laser Cutting and Kerf Bending**. ASEE's 123rd Annual - Conference & Exposition - New Orleans, LA, Estados Unidos, 2016.

BORHANI, ALIREZA; KALANTAR, NEGAR. **Transformative Formworks: Towards Mass Customization of Double-Curved Surfaces**. 2017. Shape Modeling International, 2017.

BURD, LONNIE. **The complete illustrated guide to Shaping Wood**. The Tauton Press, 2001, p. 281

CAI, ZHIYONG; ROSS, ROBERT J. **Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials**. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, pg. 12-1-12.

CALLENS, SEBASTIEN J. P.; ZADPOOR, AMIR A. **From flat sheets to curved geometries: Origami and kirigami approaches**. *Materials Today*, v. 21, n. 3, p. 241-264, 2018. DOI: 10.1016/j.mattod.2017.10.004

CAPONE, MARA; LANZARA, EMANUELA. **Parametric Kerf Bending: Manufacturing Double Curvature Surfaces for Wooden Furniture Design**. In: BIANCONI, F.; FILIPPUCCI, M. (eds.). **Digital Wood Design: Lecture Notes in Civil Engineering 24**. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-03676-8_15

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **Computational Design Tool Transforms Flat Materials Into 3-D Shapes: Method Could Be Used in Biomechanics, Consumer Goods and Architecture**. 2016. Disponível em: <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2016/july/computational-tool.html> Acessado em Fevereiro de 2021.

CELLI, PAOLO; MCMAHAN, CONNOR; RAMIREZ, BRIAN; BAUHOFFER, ANTON; NAIFY, CHRISTINA; HOFMANN, DOUGLAS; AUDOLY, BASILE; DARAIO, CHIARA. **Shape-morphing architected sheets with non-periodic cut patterns**. *Soft Matter*, n.14, p. 9744 – 9749, 2018. DOI: 10.1039/c8sm02082e

CHEN, RENZHE; JIANG, MINGLIANG; KALANTAR, NEGAR; MORENO, MICHAEL; MULIANA, ANASTASIA. **Creating Flexible Structures out of MDF Plates**. Proceedings of the 18th US-Japan Conference on the composite materials ASTM committed D30 meeting, 2018.

CHEN, S.H.; CHAN, K.C.; HAN, D.X.; ZHAO, L.; WU, F.F. **Programmable super elastic kirigami metallic glasses**. *Materials and Design*, n. 169, p. 107687, 2019. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107687

CHO, YIGIL; SHIN, JOONG-HO; COSTA, AVELINO; LIM, TAE ANN; KUNIN, VALENTIN; LID, JU; LEE, SU YEON; YANG, SHU; HAN, HEUNG NAM; CHOI, IN-SUK; SROLOVITZ, DAVID J. **Engineering the shape and structure of materials by fractal cut**. *PNAS*, v. 111, n, 49, p. 17390–17395, 2014. DOI: 10.1073/pnas.1417276111

CHOI, GARY P. T.; DUDTE, L. H; MAHADEVAN, L. **Programming shape using kirigami tessellations**. *Nature Materials*, v. 18, p. 999–1004, 2019. DOI: 10.1038/s41563-019-0452-y

CRANE, BRAD; MCGEE, ANDREW; PRADO, MARSHALL; ZHAO, YANG. **Kerf-Based Complex Wood Systems**. 2010. Disponível em: < <http://www.achimmenges.net/?p=5006>> Acesso em: novembro de 2019.

CROSS, NIGEL. **Expertise in design: an overview**. *Design Studies*, v. 25 p. 427–441, 2004

DAVIM, J. PAULO; CLEMENTE, V. C.; SILVA, SÉRGIO. **Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard)**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, n. 40, p. 49–55, 2009. DOI 10.1007/s00170-007-1318-z

DELIMONT, ISAAC L.; MAGLEBY, SPENCER P.; HOWELL, LARRY L. **Evaluating Compliant Hinge Geometries for Origami-Inspired Mechanisms**. Journal of Mechanisms and Robotics, v. 7, 011009, p 1-8, 2015.

DELIMONT, ISAAC L. **Compliant Joints Suitable for use as Surrogate Folds**. 2014. Dissertação (Mestrado). Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, Estados Unidos, 2014.

DURATEX. Catálogo Técnico: painéis de madeira. 2015. 24 p.

DURATEX. **Perfil Corporativo**. Disponível em: < <https://www.duratex.com.br/ri/a-duratex/perfil-corporativo>> Acesso em: junho de 2021.

DUKTA. Disponível em <<https://dukta.com/en/products/partition-walls/>> Acesso em: novembro de 2019.

ELTAWAHNI, H.A.; OLABI, A.G.; BENYOUNIS, K.Y. **Investigating the CO2 laser cutting parameters of MDF wood composite material**. Optics & Laser Technology, n. 43, p. 648–659, 2011. DOI:10.1016/j.optlastec.2010.09.006

EVANS, KENNETH E.; ALDERSON, ANDREW. **Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!** Advanced Materials, v. 12, n. 9, p – 617- 628, 2000. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:93.0.CO;2-3

FENNER, PATRICK. **Lattice Hinge Design** — Minimum Bend Radius. 2012. Disponível em <<https://defproc.co.uk/blog/lattice-hinge-design-minimum-bend-radius/>> Acessado em novembro de 2019.

FLEISCHMANN, MORITZ; KNIPPERS, JAN; LIENHARD, JULIAN; MENGES, ACHIM; SCHLEICHER, SIMON. **Material behaviour: embedding physical properties in computational design processes**. In: Menges, A. (ed.) Material Computation, v. 82, n. 2, pp. 44–51,2012

FLEISHMAN, GREGG. 2008. Disponível em <<https://www.greggfleishman.com/furniture.html>> Acesso em: novembro de 2019.

GAITONDE, V.N.; KARNIK, S.R.; DAVIM, J. PAULO. **Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fibreboard (MDF) to minimize delamination using utility concept**. Journal of Materials Processing Technology, n. 196, p. 73–78, 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.003

GANEV, RASHID A. **Laser—Surface Interactions**. Ophthalmology and Advanced Laser Medical Center, Saitama Medical University, Japão: Springer, 2014. DOI 10.1007/978-94-007-7341-7

GANEV, STEFAN; GENDRON, GUY; CLOUTIER, ALAIN; BEAUREGARD, ROBERT. **MECHANICAL PROPERTIES OF MDF AS A FUNCTION OF DENSITY AND MOISTURE CONTENT**. Wood and Fiber Science, v. 37, n. 2, p. 314–326, 2005a.

GANEV, STEFAN; CLOUTIER, ALAIN; BEAUREGARD, ROBERT; GENDRON, GUY. **LINEAR EXPANSION AND THICKNESS SWELL OF MDF AS A FUNCTION OF PANEL DENSITY AND SORPTION STATE**. *Wood and Fiber Science*, v. 37, n.2, p. 327–336, 2005b.

GOMES, ANA CAROLINA. **KERF BENDING: TÉCNICA DE FLEXÃO DE MADEIRA APLICADA AO MOBILIÁRIO**. 2017. Projeto de conclusão de curso (Bacharel em Design), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

GREENBERG, EVAN; KÖRNER, AXEL. **Subtractive Manufacturing for Variable-Stiffness Plywood Composite Structures**. *SDM 2014, International Conference on Sustainable Design & Manufacturing*, p.49-65, 2014.

GREENBERG, HOLLY. **The Application of Origami to the Design of Lamina Emergent Mechanisms (LEMs) with Extensions to Collapsible, Compliant and Flat-Folding Mechanisms**. 2012. Dissertação (Mestrado). Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, Estados Unidos, 2012.

GUO, HENGYU; YEH, MIN-HSIN; LAI, YING-CHIH; ZI, YUNLONG; WU, CHANGSHENG; WEN, ZHEN; HU, CHENGUO; WANG, ZHONG LIN. **All-in-One Shape-Adaptive Self-Charging Power Package for Wearable Electronics**. *ACS Nano*, n. 10, p. 10580–10588, 2016. DOI: 10.1021/acsnano.6b06621

GURSOY, BENAY; OZKAR, MINE. **Visualizing making: Shapes, materials, and actions**. *Design Studies*, n. 41, p. 29-50, 2015. DOI: 10.1016/j.destud.2015.08.007

GUTOWSKI, SARAH MARGARET. **The bright side of failure: developing a set of lamps from an unsuccessful chair**. 2017. Dissertação (Mestrado em Artes), Graduate College of The University of Iowa, Estados Unidos, 2017.

GÜZELCI, ORKAN ZEYNEL; ALAÇAM, SEMA; BACINOĞLU, SAADET ZEYNEP. **THREE-STEP EXPERIMENTATION ON EMBEDDING CURVATURE TO RIGID PLANAR MATERIALS THROUGH CUT PATTERNS**. *Gestão e Tecnologia de Projetos, São Carlos*, v. 12, n. 3, p. 93-107, 2017. DOI: 10.11606/gtp.v12i3.134543

HOLMES, DOUGLAS P. **Elasticity and Stability of Shape Changing Structures**. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2019. DOI: 10.1016/j.cocis.2019.02.008

HOLTERMAN, ANDREAS. **Pattern Kerfing for Responsive Wooden Surfaces. A formal approach to produce flexible panels with acoustic performance**. 2018. Tese de graduação (Graduação em Design Sustentável), Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, Países Baixos, 2018.

HOWELL, LARRY L. **Compliant mechanisms**. John Wiley & Sons, 2001.

HOWELL, LARRY L.; MAGLEBY, SPENCER P.; OLSEN, BRIAN M. **Handbook of Compliant Mechanisms**. John Wiley & Sons: 2013

HUGHES, M. **Plywood and other veneer-based Products**. In.: ANSELL, MARTIN P. (ed), **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 54. Wood Composites**. Elsevier, 2015, p. 69-89. DOI: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00004-4

HWANG, DOH-GYU; BARTLETT, MICHAEL D. **Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami Structures**. *Scientific Reports*, v. 8, p. 3378, 2018. DOI:10.1038/s41598-018-21479-7

JACOBSEN, JOSEPH O.; WINDER, BRIAN G.; HOWELL, LARRY L.; MAGLEBY, SPENCER P. **2010. Lamina Emergent Mechanisms and Their Basic Elements.** Journal of Mechanisms and Robotics, v. 2, p. 011003, 2010. DOI: 10.1115/1.4000523

JACOBSEN, JOSEPH O.; CHEN, GUIMIN; HOWELL, LARRY L.; MAGLEBY, SPENCER P. **Lamina Emergent Torsional (LET).** Mechanism and Machine Theory, v. 44, p. 2098–2109, 2009. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.015

JACOBSEN, JOSEPH O.; HOWELL, LARRY L.; MAGLEBY, SPENCER P. **COMPONENTS FOR THE DESIGN OF LAMINA EMERGENT MECHANISMS.** Proceedings of the 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2007-4231111, Estados Unidos, 2007.

JENSEN, MATILDE BISBALLE; BLINDHEIM, JØRGEN; STEINERT, MARTIN. **PROTOTYPING SHAPE-CHANGING INTERFACES - NA EVALUATION OF LIVING HINGES' ABILITIES TO RESEMBLE ORGANIC, SHAPE-CHANGING INTERFACES.** 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED17, Vol. 4: Design Methods and Tools, Canadá, 2017.

KALANTAR, NEGAR; BORHANI, ALIREZA. **INFORMING DEFORMABLE FORMWORKS: Parameterizing Deformation Behavior of a Non-Stretchable Membrane via *Kerfing*.** 2018. Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018, v. 2, p. 339-348, China, 2018.

KELLY, MYRON W. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard.** General Technical Report, FPL-10. Forest Products Laboratory, Forest Service, US Department of Agriculture, Estados Unidos, 1977

KIM, KEE-BUM; LEE, YOUNG-JOO ; COSTA, AVELINO ; LEE, YU-KI; JANG, TAE-SIK; LEE, YOUNG-GYU ; JOO, YOUNG-CHANG ; OH, KYU HWAN; SONG, JUHA; CHOI, IN-SUK. **Extremely Versatile Deformability beyond Materiality: A New Material Platform through Simple Cutting for Rugged Batteries.** Advanced Engineering Materials. p. 1900206, 2019. DOI: 10.1002/adem.201900206

KOFACTORLAB. Disponível em: <<https://lab.kofaktor.hr/en/portfolio/super-flexible-laser-cut-plywood/>> Acesso em: novembro de 2019.

KOLAREVIC, BRANKO. **Architecture in the digital age: design and manufacturing.** Nova York: Spon Press, 2003.

KONAKOVIĆ, MINA; CRANE, KEENAN; DENG, BAILIN; BOUAZIZ, SOFIEN; PIKER, DANIEL; PAULY, MARK. **Beyond Developable: Computational Design and Fabrication with Auxetic Materials.** 2016. ACM Transactions on Graphics, v. 35, n. 4, artigo 89, 2016. DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/2897824.2925944>.

KORUMAZ, MUSTAFA; BETTI, MICHELE; CONTI, ALESSANDRO; TUCCI, GRAZIA; BARTOLI, GIANNA; BONORA, VALENTINA; KORUMAZ, ARMAĞAN GÜLEÇ; FIORINI, LIDIA. **An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study.** Engineering Structures, v. 153, p. 224–238, 2017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.026

KITCHENHAM, BARBARA; CHARTERS, STUART. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering.** EBSE Technical Report. EBSE-2007-01, Software Engineering Group, School of

Computer Science and Mathematics, Keele University e Department of Computer Science, University of Durham, Reino Unido, 2007.

LAMOUREUX, AARON; LEE, KYUSANG; SHLIAN, MATTHEW; FORREST, STEPHEN R; SHTEIN, MAX. **Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking.** *Nature Communications*, v.6, p. 8092, 2015. DOI: 10.1038/ncomms9092

LANZARA, EMANUELA; CAPONE, MARA. **Kerf-Bending Tests: Design for Manufacturing Doubly Ruled Surfaces.** In: MARCOS, C. L. (ed). *Graphic Imprints*, Springer: 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-93749-6_92

LAWSON, BRYAN. **CAD and creativity: does the computer really help?** *Leonardo*, v. 35, n. 3, p. 327–331, 2002.

LEE, YOUNG-JOO. **Engineering the Deformation Characteristics of Soft Materials through Geometric Design of Auxetics for Flexible Electronics Application.** 2011. Department of Materials Science and Engineering. The Graduate School Seoul National University, Coréia do Sul, 2011.

LIM, TEIK-CHENG. **Auxetic Materials and Structures.** School of Science and Technology, SIM University, Singapura: Springer, 2015. ISBN 978-981-287-274-6. DOI 10.1007/978-981-287-275-3

LOUTH, HENRY; REEVES, DAVID; BHOOSHAN, SHAJAY; SCHUMACHER, PATRIK; KOREN, BENJAMIN. **A PREFABRICATED DINING PAVILION: USING STRUCTURAL SKELETONS, DEVELOPABLE OFFSET MESHES AND KERF-CUT BENT SHEET MATERIAL.** In: MENGES, ACHIM; BOB SHEIL, BOB; GLYNN, RUAIRI; SKAVARA, MARILENA (ed.). *Fabricate 2017: Rethinking design and construction.* Londres: UCL Press, 2017, p. 58-67

MA, RUILONG; WU, CHANGSHENG; WANG, ZHONG LIN; TSUKRUK, VLADIMIR V. **Pop-Up Conducting Large-Area Biographene Kirigami.** *ACS Nano*, v. 12, p. 9714–9720, 2018. DOI: 10.1021/acsnano.8b04507

MAHESH, G.; MUTHU, S.; DEVADASAN, S. R. **Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 77, p. 369–381, 2015. DOI 10.1007/s00170-014-6425-z

MALET, Y.; SIRAT, G. Y. **Technical note. Conoscopic holography application: multipurpose rangefinders.** *Journal of Optics*, v. 29, n. 3, p. 183–187. Reino Unido, 1998. DOI: 10.1088/0150-536X/29/3/015

MALIK, ANUP; PRADHAN, SWASTHIK; MANN, GURAVTAR S; PRAKASH, CHANDER; SINGH, SUNPREET. **Subtractive Versus Hybrid Manufacturing.** 2019. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.11456-0

MANSOORI, MARYAM; KALANTAR, NEGAR; CREASY, TERRY; RYBKOWSKI, ZOFIA. **Adaptive Wooden Architecture. Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior.** In: BIANCONI, F.; FILIPPUCCI, M. (ed.), *Digital Wood Design, Lecture Notes in Civil Engineering 24.* Springer, 2019.

MATINI, MOHAMMAD REZA; HAGHNAZAR, RAMTIN. **Design of a curved-line bending mechanism inspired by skin wrinkles for elastic–kinetic structures in architecture.** 2018. *International Journal of Space Structures*, v. 33, n. 3–4, p. 124–13, 2018. DOI: 10.1177/0266351118804954

MCEVOY, MICHAEL ANDY; CORRELL, NIKOLAUS. **Shape-Changing Materials Using Variable Stiffness and Distributed Control.** *SOFT ROBOTICS*, v. 00, n. 00, 2018. DOI: 10.1089/soro.2017.0147

MENGES, ACHIM. **Integrative Design computation. Integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions.** ACADIA 11: Integration through Computation [Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), p. 21-24, Estados Unidos, 2011.

MENGES, ACHIM. **Computational Material Cultures.** In: K. De Rycke et al. (ed), *Humanizing Digital Reality*, Springer: 2018, pg. 5–11. doi:10.1007/978-981-10-6611-5

MITOV, DEJAN; TEPAVČEVIĆ, BOJAN; STOJAKOVIĆ, VESNA; BAIŠANSKI, IVANA. **Kerf Bending Strategy for Thick Planar Sheet Materials.** *Nexus Network Journal*, v. 21, p. 149–160, 2019. DOI: 10.1007/s00004-018-0415-7

MOORE, J.R.; COWN, D.J. **Processing of wood for wood Composites.** In.: ANSELL, MARTIN P. (ed), **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 54. Wood Composites.** Elsevier, 2015, p. 27-45. DOI: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00002-0

NELSON, TODD G.; LANG, ROBERT J.; PEHRSON, NATHAN A.; MAGLEBY, SPENCER P.; HOWELL, LARRY L. **Facilitating Deployable Mechanisms and Structures Via Developable Lamina Emergent Arrays.** *Journal of Mechanisms and Robotics*, v. 8, p. 031006-1, 2016.

NELSON, TODD G.; BRUTON, JARED T.; RIESKE, NATHAN E.; WALTON, M. PATRICK; FULLWOOD, DAVID T.; HOWELL, LARRY L. **Material selection shape factors for compliant arrays in bending.** *Materials and Design*, v. 110, p. 865–877, 2016. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.056

NELSON, TODD G. **Art to Engineering: Curved Folding and Developable Surfaces in Mechanism and Deployable Structure Design.** 2018. Dissertação (PhD), Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, 2018.

OBRARY. Disponível em: https://obrary.com/search?type=product&q=living%20hinge*. Acesso em: novembro de 2019.

ORMONDROYD, G.A.; STEFANOWSKI, B. **Fibreboards and their applications.** In.: ANSELL, MARTIN P. (ed), **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 54. Wood Composites.** Elsevier, 2015, p. 91-102. DOI: /10.1016/B978-1-78242-454-3.00005-6

OXMAN, NERI. **Programming matter.** *Architectural Design*, v. 82, n. 2, Special Issue: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design, p. 88-95, 2012

OXMAN, RIVKA. **Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking.** *Design Studies*, v.52, p. 4-39, 2017.

PORTERFIELD, AARON. **Curved laser bent wood.** Disponível em: <<https://www.instructables.com/id/Curved-laser-bent-wood/>> Acesso em: novembro de 2019.

PRAKASH, S.; PALANIKUMAR, K. **Modeling for prediction of surface roughness in drilling MDF panels using response surface methodology.** *Journal of Composite Materials*, v. 45, n.16, p. 1639–1646, 2010. DOI: 10.1177/0021998310385026

RAFSANJANI, AHMAD; BERTOLDI, KATIA. **Buckling-Induced Kirigami.** *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, v. 118, p. 084301, 2017. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.084301

RAFSANJANI, AHMAD; JIN, LISHUAI; DENG, BOLEI; BERTOLDI, KATIA. **Propagation of pop ups in kirigami shells.** PNAS, v. 116, n. 17, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1817763116.

RAJESH, K.; RAJU, V.V. MURALI KRISHNAM; RAJESH, S.; VARMA, N. SUDHEER KUMAR. **Effect of process parameters on machinability characteristics of CO2 laser process used for cutting SS-304 Stainless steels.** Materials Today: Proceedings, v. 18, n. 6, p. 2065-2072, 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.261

RAMAN, NORAZMEIN ABDUL; SHARIF, SAFIAN; SUDIN, IZMAN. **Mathematical Modeling of Cutting Force In Milling Of Medium Density Fibreboard Using Response Surface Method.** Advanced Materials Research, v. 445, p. 51-55, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.445.51

RATHKE, JÖRN; SINN, GERHARD; KONNERTH, JOHANNES; MÜLLER, ULRICH. **Strain Measurements within Fiber Boards. Part I: Inhomogeneous Strain Distribution within Medium Density Fiberboards (MDF) Loaded Perpendicularly to the Plane of the Board.** Materials v. 5, p. 1115-1124, 2012. DOI:10.3390/ma5061115

REYNO, T.; MARSDEN, C.; WOWK, D. **Surface damage evaluation of honeycomb sandwich aircraft panels using 3D scanning technology.** NDT and E International, v. 97, p. 11–19, 2018. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.03.007

RICO, J. C.; VALIÑO, G.; FERNÁNDEZ, P.; ZAPICO, P.; BLANCO, D.; MATEOS, S. **Adjustment recommendations of a conoscopic holography sensor for a reliable scanning of surfaces with roughness grades obtained by different processes.** Precision Engineering, v. 42, p. 335–345, 2015.

SASS, LARRY; OXMAN, RIVKA. **Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design.** Design Studies, v. 27, p. 325-355, 2006. DOI: 10.1016/j.destud.2005.11.009

SCHON, DONALD A. **Designing as reflective conversations with the materials of a design situation.** Research in Engineering Design, v. 3, p. 131-147, 1992.

SEBERA, VA'CLAV; TIPPNER, JAN; ŠÍMEK, MILAN; ŠÍRAJER, JAN; DEČEKÝ, DAVID; KLÍMOVA, HANA. **Poisson's ratio of the MDF in respect to vertical density profile.** European Journal of Wood and Wood Products, 2014. DOI 10.1007/s00107-014-0780-1

SHAH, J. J. **Assessment of features technology.** Computer-aided design, v. 23, n. 5, 1991

SHAN, SICONG; KANG, SUNG H.; ZHAO, ZHENHAO; FANG, LICHEN; BERTOLDI, KATIA. **Design of planar isotropic negative Poisson's ratio structures.** Extreme Mechanics Letters, v. 4, p. 96–102, 2015. DOI: 10.1016/j.eml.2015.05.002

SHMULSKY, RUBIN; JONES, P. DAVID. **Strength and Mechanics.** In.: SHMULSKY, RUBIN; JONES, P. DAVID (ed.), **Forest Products and Wood Science: an introduction.** 6 ed. John Wiley & Sons, 2011, p. 197-227.

SHYU, TERRY C.; DAMASCENO, PABLO F.; DODD, PABLO M.; LAMOUREX, AARON; XU, LIZHI; SHLIAN, MATTHEW; SHTEIN, MAX; GLOTZER, SHARON C.; KOTOV, NICHOLAS A. **A kirigami approach to engineering elasticity in nanocomposites through patterned defects.** NATURE MATERIALS, v. 14, p. 785-790, 2015. DOI: 10.1038/NMAT4327

STARK, NICOLE M.; CAI, ZHIYONG; CARLL, CHARLES. **Wood-Based Composite Materials Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composite Materials.** In: **Wood handbook: wood as an engineering material.** General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, pg. 11-1-28

SILVA, FÁBIO PINTO DA. **O USO DA DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL A LASER NO DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TEXTURAS APLICADAS AO DESIGN DE PRODUTOS**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, FÁBIO PINTO DA. **Usinagem de Espumas de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

STEAMMETRY. **5 useful living hinge template for your next laser cut Project**. 2015. Disponível em: <<http://steammetry.com/5-useful-living-hinge-template-for-your-next-laser-cut-project/>> Acessado em novembro de 2019.

TROTEC. **Kerf cut: Trotec Wood and acrylic sheets bending applications**. Disponível em: <<https://www.trotec-materials.com/material-usage-hints/bending-trotec-materials>> Acesso em: novembro de 2019.

VARADY, TAMÁS; MARTIN, RALPH R.; COX, JORDAN. **Reverse engineering of geometric models - an introduction**. Computer-Aided Design, v. 29, n. 4, p. 255-268, 1997. DOI: 10.1016/S0010-4485(96)00054-1

VAZQUEZ, ALICIA NAHMAD; JABI, WASSIM. **A Collaborative Approach to Digital Fabrication: A Case Study for the Design and Production of Concrete 'Pop-up' Structures**. International Journal of Architectural Computing, v. 13, n.2, p.195-216, 2015. DOI: 10.1260/1478-0771.13.2.195

XIE, XIONGYAO, LU, XIAOZHI. **Development of a 3D modeling algorithm for tunnel deformation monitoring based on terrestrial laser scanning**. Underground Space, v. 2, p. 16–29, 2017. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.02.001

XU, LIZHI; SHYU, TERRY C.; KOTOV, NICHOLAS A. **Origami and Kirigami Nanocomposites**. ACS Nano, v. 11, p. 7587–7599, 2017. DOI: 10.1021/acsnano.7b03287

XUE, RIYE; LI, RUI; DU, ZONGLIANG; ZHANG, WEISHENG; ZHU, YICHAO; SUN, ZHI; GUO, XU. **Kirigami pattern design of mechanically driven formation of complex 3D structures through topology optimization**. Extreme Mechanics Letters, v. 15, p. 139–144, 2017. DOI: 10.1016/j.eml.2017.03.004

ZARRINMEHR, SAIED; ETTEHAD, MAHMOOD; KALANTAR, NEGAR; BORHANI, ALIREZA; SUEDA, SHINJIRO; AKLEMAN, ERGUN. **Interlocked archimedean spirals for conversion of planar rigid panels into locally flexible panels with stiffness control**. Computers & Graphics, v. 66, p. 93–102, 2017. DOI: 10.1016/j.cag.2017.05.010

ZARRINMEHR, SAIED; AKLEMAN, ERGUN; ETTEHAD, MAHMOOD; KALANTAR, NEGAR; BORHANI, ALIREZA. **Kerfing with Generalized 2D Meander-Patterns: Conversion of Planar Rigid Panels into Locally-Flexible Panels with Stiffness Control**. International Conference, CAAD Futures 2017, Proceedings, p. 276-293, Turquia, 2017.

ZHANG, WENJIAO; NEVILLE, ROBIN; ZHANG, DAYI; SCARPA, FABRIZIO; WANG, LIFENG; LAKES, RODERIC. **The two-dimensional elasticity of a chiral hinge lattice metamaterial**. International Journal of Solids and Structures, v. 141–142, p. 254–263, 2018. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.02.027

ZHAO, RUIKE; LIN, SHAOTING; YUK, HYUNWOO; ZHAO, XUANHE. **Kirigami enhances film adhesion**. *Soft Matter*, v. 14, p. 2515–2525, 2018. DOI: 10.1039/c7sm02338c

ZHENG, WEI; HUANG, WEICHENG; GAO, FENG; YANG, HUIHUI; DAI, MINGJIN; LIU, GUANGBO; YANG, BIN; ZHANG, JIA; FU, YONG QING; CHEN, XIAOSHUANG; QIU, YUNFENG; JIA, DECHANG; ZHOU, YU; HU, PINGAN. **Kirigami-Inspired Highly Stretchable Nanoscale Devices Using Multidimensional Deformation of Monolayer MoS₂**. *Chemistry of Materials*, v. 30, p. 6063–6070, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemmater.8b02464

WALTER, YURI. **O CONTEÚDO DA FORMA: SUBSÍDIOS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS E DESIGN**. 2006. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Desenho Industrial, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2006.

WANG, SIQUN; WINISTORFER, PAUL M.; YOUNG, TIMOTHY M. **FUNDAMENTALS OF VERTICAL DENSITY PROFILE FORMATION IN WOOD COMPOSITES. PART III. MDF DENSITY FORMATION DURING HOT-PRESSING**. *Wood and Fiber Science*, v.36, n. 1, p. 17–25, 2004.

WANG, S.; WINISTORFER, P. M.; YOUNG, T. M.; HELTON, C. **Step-closing pressing of medium density fiberboard; Part 1. Influences on the vertical density profile**. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v.59, n. 1, p. 19-26, 2001. DOI: 10.1007/s001070050466

WEI, MIAN; SINGH, KARAN. **Bend-a-rule: a fabrication-based workflow for 3D planar contour acquisition**. *Proceedings of the 1st Annual ACM Symposium on Computational Fabrication (SCF '17)*, artigo n. 5., Estados Unidos, 2017. DOI: 10.1145/3083157.3083164

WILDING, SAMUEL E. **Expanding Lamina Emergent Mechanism (LEM) Capabilities: Spherical LEMs, LEM Joints, and LEM Applications**. 2011. Dissertação (Mestrado), Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, Estados Unidos, 2011.

WILSON, JAMES B. **LIFE-CYCLE INVENTORY OF MEDIUM DENSITY FIBERBOARD IN TERMS OF RESOURCES, EMISSIONS, ENERGY AND CARBON**. *Wood and Fiber Science*, v. 42, p. 107–124, 2010.

YANG, SHU; CHOI, IN-SUK; KAMIEN, RANDALL D. **Design of super-conformable, foldable materials via fractal cuts and lattice kirigami**. *Material Research Society BULLETIN*, v. 41, 2016. DOI: 10.1557/mrs.2016.5

YAU, H-T.; MENQ, C-H. **Unified least-squares approach to the evaluation of geometric errors using discrete measurement data**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 36, n. 11, p. 1269-1290, 1996.

YAU, H-T. **Uncertainty analysis in geometric best fit**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 38, p. 1323–1342, 1998.

YE, C.; ACIKGOZ, S.; PENDRIGH, S.; RILEY, E.; DEJONG, M. J. **Mapping deformations and inferring movements of masonry arch bridges using point cloud data**. *Engineering Structures*, v. 173, p. 530–545, 2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.094

YOUNGS, R. L.; HAMZA, M. F. **Wood: History of Use**. In: Saleem Hashmi (ed), *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Oxford: Elsevier, 2016, p. 1-7. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02215-3.

APÊNDICES

Apêndice A — Planilha da quantidade de trabalhos por filtro da revisão sistemática da literatura sobre as Técnicas de curvamento de materiais planos por cortes padronizados

REVISÃO SISTEMÁTICA - BUSCA SECUNDÁRIA								
FILTRO 1: BUSCA NAS BASES DE DADOS						FILTRO 2 (LEITURA DO TÍTULO, PALAVRAS-CHAVE E RESUMO)	FILTRO 4 (LEITURA INTEGRAL)	FILTRO 3 (REMOÇÃO DE REPETIDOS)
DATA DA BUSCA	BASE DE DADOS	STRING	INTERVALO DA BUSCA	CAMPO DA BUSCA	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS
10/04/2019	SCIENCE DIRECT	"relief cut*" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	9	2	2	2
21/03/2019	SCIENCE DIRECT	"living hinge"	2005-2020	TODOS	109	1	1	1
22/03/2019	SCIENCE DIRECT	"lattice hinge"	2005-2020	TODOS	3	1	1	1
27/05/2019	SCIENCE DIRECT	"kerf-bending" OR "kerf bending"	2005-2020	TODOS	1	1	1	1
28/03/2019	SCIENCE DIRECT	kerf* AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	256	1	1	1
20/03/2019	SCIENCE DIRECT	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	22	1	1	1
09/04/2019	SCIENCE DIRECT	"cut pattern" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	63	8	7	7
20/03/2019	SCIENCE DIRECT	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (folding OR curving OR bending)	2005-2020	TODOS	28	0	0	0
20/03/2019	SCIENCE DIRECT	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flexible OR flexibility OR elasticity)	2005-2020	TODOS	15	0	0	0
20/03/2019	SCOPUS	"relief cut" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	1	1	1	1
20/03/2019	SCOPUS	"relief cutting" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	0	0	0	0
20/03/2019	SCOPUS	"living hinge"	2005-2020	TODOS	28	3	1	1
20/03/2019	SCOPUS	"lattice hinge"	2005-2020	TODOS	2	0	0	0
27/05/2019	SCOPUS	"kerf-bending" OR "kerf bending"	2005-2020	TODOS	4	4	4	4
20/03/2019	SCOPUS	kerfing AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	4	4	4	4
20/03/2019	SCOPUS	kerf AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	17	10	6	6
20/03/2019	SCOPUS	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	27	3	3	3
10/05/2019	SCOPUS	"cut pattern" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	6	5	5	5
20/03/2019	SCOPUS	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (folding OR curving OR bending)	2005-2020	TODOS	6	2	1	1
20/03/2019	SCOPUS	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flexible OR flexibility OR elasticity)	2005-2020	TODOS	13	3	3	3
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"relief cut" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	35	3	2	2
14/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"relief cutting" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	10	4	3	3
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"living hinge"	2005-2020	TODOS	323	18	8	8
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"lattice hinge"	2005-2020	TODOS	15	6	5	5
27/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"kerf-bending" OR "kerf bending"	2005-2020	TODOS	31	7	6	6
20/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	(kerfing OR kerf) AND ("flexible" OR "elasticity") AND ("curving" OR "bending" OR "folding") AND ("flat" OR "sheet" OR "panel")	2005-2020	TODOS	1480	25	17	17
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	233	21	14	14
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	"cut pattern" AND (flexible OR elasticity) AND (curving OR bending OR folding) AND (flat OR sheet OR panel)	2005-2020	TODOS	260	40	23	23
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (folding OR curving OR bending)	2005-2020	TODOS	113	14	9	9
13/05/2019	GOOGLE SCHOLAR	("kerf cut" OR "kerf pattern" OR "kerf cutting" OR "kerfing cutting" OR "kerfing pattern") AND (flexible OR flexibility OR elasticity)	2005-2020	TODOS	179	15	9	9
TOTAL:					3293	203	136	47

Fonte: Da autora (2021).

Apêndice B — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *kerfing*

SÍNTESE DA REVISÃO SISTEMÁTICA: EXTRAÇÃO DE DADOS DOS ESTUDOS TÉCNICA: KERFING												
CITAÇÃO	ABORDAGEM DO ESTUDO	DADOS EXTRAÍDOS DO ESTUDO			MÉTODOS UTILIZADOS NOS MATERIAIS COM CORTES							
		MATERIAL UTILIZADO	MOVIMENTO/GEOMETRIA INVESTIGADA	PADRÃO DE CORTE APLICADO	SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA	ANÁLISE VISUAL	ANÁLISE ESTRUTURAL	ANÁLISE MECÂNICA	CÁLCULOS TEORÉTICOS/ALGORITMO	FABRIC. DE AMOSTRA	PROTÓTIPO DO PRODUTO	ANÁLISE/MEDIÇÃO GEOMÉTRICA
Ablat e Qattawi, 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	ALUMÍNIO	DOBRA	LINEAR COM INTERRUPTÃO, LINEAR COM INTERRUPTÃO E EXTREMIDADE CURVA (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	NÃO	SIM (CÁLCULOS DE TENSÃO, STRESS E MOMENTO FLETOR)	NÃO	NÃO	NÃO
Bianconi e Fillippucci, 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	MADEIRA MACIÇA + RESINA	CURVATURA DUPLA	LINEAR CONTÍNUO EM MALHA PERPENDICULAR (NAS DUAS FACES DO PAINEL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Booth e Goldsmith, 2016	INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	ACRÍLICO	CURVATURA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPTÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Borhani e Kalantar, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVATURA DUPLA	ESPIRAL FORMATO DEPENDENDO DA MALHA POLIGONAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR
Capone e Lanzara, 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE, DA OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA, MDF	CURVA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPTÕES, PINO DE BOLICHE, ESPIRAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Chen et al., 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	MDF	EXTENSÃO UNIAXIAL	ESPIRAL QUADRADA (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Gomes, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	COMPENSADO DE MADEIRA, MDF	CURVATURA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPTÕES, ONDA, PINO DE BOLICHE, LOSANGO, "Y" ESPELHADO, ESPIRAL QUADRADA, LOSANGO COM CANTOS ARREDONDADOS, HEXÁGONO, TRIÂNGULOS CIRCUNSCRITOS, TRIÂNGULOS ESPELHADOS (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	SIM (SOLID WORKS)	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Greenberg e Körner, 2014	INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA + COMP. REINFORÇADO COM CARBONO	CURVATURA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPTÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	SIM (FE)	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Gursoy e Ozkar, 2015	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	PAPEL CARTÃO	EXTENSÃO UNIAXIAL E "POP-UP"	LINEAR COM INTERRUPTÕES EM ÂNGULO, "Y" ESPELHADO, LOSANGO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Gutowski, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVA SIMPLES	LINEAR COM CONEXÕES NAS PONTAS (ATRAVÉS DO MATERIAL) LINEAR CONTÍNUO (EM UMA DAS FACES DO MATERIAL) LINEAR COM INTERRUPTÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	SIM (CÁLCULO P/ DEFINIR PARÂMETROS DO PADRÃO DE CORTE)	SIM	SIM	NÃO
Güzelci, Alaçam e Bacinoğlu, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE GEOMETRIA-ALVO	MDF	CURVATURA DUPLA	LINEAR COM INTERRUPTÕES, ESPIRAL, ONDA, CIRCULAR (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Holterman, 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA, MDF	CURVATURA DUPLA	ESPIRAL QUADRADA, LINEAR COM INTERRUPTÃO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	SIM (KARAMBA)	NÃO	SIM (CÁLCULO P/ DEFINIR PARÂMETROS DE CORTE E DESLOCAMENTO MÁX. DO MATERIAL)	SIM	SIM	NÃO
Jensen, Blindheim e Steinert, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	MDF	CURVATURA DUPLA	"Y" COM PONTAS EM FLECHA, LINEAR COM INTERRUPTÕES, "Y" ESPELHADO, HEXÁGONO, LOSANGO, TRIÂNGULOS CIRCUNSCRITOS, ESPIRAL, "H" EM DUAS DIREÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	SIM (FE)	SIM (DISPOSITIVO)	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Kalantar e Borhani, 2018	INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVATURA DUPLA	ESPIRAL FORMATO DEPENDENDO DA MALHA POLIGONAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Lanzara e Capone, 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVA SIMPLES	PINO DE BOLICHE, ESPIRAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	SIM (ALGORITMO P/ GERAR PADRÃO DE CORTE)	SIM	NÃO	SIM (MEDIÇÃO DA CURVA C/ DISPOSITIVO)
Louth et al., 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE, INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA, INVESTIGAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	ALUMÍNIO	CURVATURA DUPLA	LINEAR COM INTERRUPTÕES, FORMATO "Y" (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	SIM	SIM	NÃO
Mansoori et al., 2019	INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	COMPENSADO DE MADEIRA + POLÍMERO C/ MEMÓRIA FORMA	CURVA SIMPLES	LOSANGO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Matini e Haghaziar, 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVA DUPLA EM LINHA CURVA	LINEAR COM INTERRUPTÕES, ESPIRAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	SIM (FE)	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM (MEDIÇÃO DA CURVA COM DISPOSITIVO)
Mitov et al., 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE APLICAÇÃO ESPECÍFICA, OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	MDF + FIBRA DE VIDRO + ACAB. PARA TINGIMENTO	CURVATURA SIMPLES	LINEAR CONTÍNUO (EM UMA DAS FACES DO PAINEL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Wei e Singh, 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA	MDF	CURVATURA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPTÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (INDIRETO)	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Zarrinmehr et al., 2017a	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE, A OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COMPENSADO DE MADEIRA	CURVATURA DUPLA	ESPIRAL FORMATO DEPENDENDO DA MALHA POLIGONAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM	NÃO	SIM (FE)	NÃO	SIM (ALGORITMO PARA GERAR O PADRÃO DE CORTE)	SIM	SIM	NÃO

Fonte: Da autora (2021).

Apêndice C — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *lamina emergent mechanisms*

SÍNTESE DA REVISÃO SISTEMÁTICA: EXTRAÇÃO DE DADOS DOS ESTUDOS TÉCNICA: LAMINA EMERGENT MECHANISMS												
CITAÇÃO	ABORDAGEM DO ESTUDO	MATERIAL UTILIZADO	DADOS EXTRAÍDOS DO ESTUDO		MÉTODOS UTILIZADOS NOS MATERIAIS COM CORTES							
			MOVIMENTO/ GEOMETRIA INVESTIGADA	PADRÃO DE CORTE APLICADO	SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA	ANÁLISE VISUAL	ANÁLISES ESTRUTURAIS (FE, ETC.)	ANÁLISE MECÂNICA	CÁLCULOS TEORÉTICOS/ ALGORITMO	FABRICAÇÃO DE AMOSTRA	PROTÓTIPO DO PRODUTO FINAL COM A TÉCNICA APLICADA	ANÁLISE/ MEDIÇÃO GEOMÉTRICA
Nelson et al., 2016a	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	ACRÍLICO, COMPENSADO MULTILAMINADO DE MADEIRA (CHERRY PLYWOOD), MDF + VIDRO METÁLICO	CURVATURA SIMPLES	LINEAR COM INTERRUPÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (PAPEL)	NÃO	SIM (FE)	NÃO	SIM (CÁLCULO DE RIGIDEZ DOS LEMS E MATRIZ, DESLOCAMENTO ANGULAR DE CADA LINHA DA MATRIZ E ALGORITMO DE DISTRIBUIÇÃO DOS CORTES)	SIM	SIM	NÃO
Nelson, 2018 - segunda parte (a primeira consta em Nelson et al., 2016a)	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	ACRÍLICO + TECIDO, AÇO INOXIDÁVEL	CURVATURA SIMPLES UNI E BIAxIAL	LINEAR COM INTERRUPÇÕES, LINEAR COM TRECHOS INCLINADOS, USANDO A JUNÇÃO MIXED TENSION RESISTANT (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	SIM	SIM (CÁLCULO DO FATOR DE FORMA PARA FLEXÃO ELÁSTICA E EFICIÊNCIA DE FORÇA, E DE RIGIDEZ EM FLEXÃO)	SIM	NÃO	NÃO
Delimont, 2014 (parte consta em Delimont, Magleby e Howell, 2015)	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	AÇO INOXIDÁVEL	DOBRA CURVATURA SIMPLES	ARTICULAÇÕES INDIVIDUAIS E MATRIZES DE LINEAR COM INTERRUPÇÕES, USANDO A JUNÇÃO TORSION PARALEL JOINT, LINEAR COM TRECHOS INCLINADOS, USANDO A JUNÇÃO MIXED TENSION E COMPRESSION RESISTANT (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	SIM (FE)	NÃO	SIM (CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA DAS LEMS À FLEXÃO, TORÇÃO, CISALHAMENTO, COMPRESSÃO E TRAÇÃO, A CONSTANTE DE MOLA DOS SEGMENTOS, ETC)	SIM	NÃO	NÃO
Wilding, 2011	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	PAPEL, AÇO, PFTE	ESTRUTURAS POP-UP DOBRA	ARTICULAÇÕES INDIVIDUAIS, ARTICULAÇÕES ESFÉRICAS (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (PAPEL)	NÃO	SIM (FE)	NÃO	SIM (CÁLCULOS DE DESLOCAMENTO ANGULAR DAS LEMS, RIGIDEZ À FLEXÃO, À TORÇÃO E COMPRESSÃO, ETC)	SIM	SIM	NÃO
Delimont, Magleby e Howell, 2015	INVESTIGAÇÃO VOLTADA À COMPREENSÃO DO FUNCIONAMENTO DOS LEMS	GENÉRICO	DOBRA	ARTICULAÇÕES INDIVIDUAIS (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA DAS LEMS À FLEXÃO, FLEXÃO LATERAL, TORÇÃO, CISALHAMENTO, COMPRESSÃO E TRAÇÃO, A CONSTANTE DE MOLA DOS SEGMENTOS)	NÃO	NÃO	NÃO
Greenberg, 2012	INVESTIGAÇÃO VOLTADA À COMPREENSÃO DO FUNCIONAMENTO DOS LEMS	PAPEL	DOBRA	ESTUDO GENÉRICO, NÃO APLICADO A UM PADRÃO	SIM (PAPEL)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (CÁLCULOS DE MOVIMENTO DO MECANISMO)	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Da autora (2021).

Apêndice D — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de *ligações auxéticas*

SÍNTESE DA REVISÃO SISTEMÁTICA: EXTRAÇÃO DE DADOS DOS ESTUDOS TÉCNICA: LIGAÇÕES AUXÉTICAS												
CITAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO	DADOS EXTRAÍDOS DO ESTUDO			MÉTODOS UTILIZADOS NOS MATERIAIS COM CORTES							
	ABORDAGEM	MATERIAL UTILIZADO	MOVIMENTO/ GEOMETRIA INVESTIGADA	PADRÃO DE CORTE APLICADO	SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA	ANÁLISE VISUAL	ANÁLISES ESTRUTURAIS (FE, ETC.)	ANÁLISE MECÂNICA	CÁLCULOS TEORÉTICOS/ ALGORITMO	FABRICAÇÃO DE AMOSTRA	PROTÓTIPO DO PRODUTO FINAL COM A TÉCNICA APLICADA	ANÁLISE/ MEDIÇÃO GEOMÉTRICA
Zhang et al., 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	ACRÍLICO	EXTENSÃO AUXÉTICA	ESPIRAL FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	SIM	SIM (CÁLCULOS DE TENSÃO EM FLEXÃO, TRAÇÃO E CISLHAMENTO, MÓDULO DE ELASTICIDADE, DESLOCAMENTO, COEFICIENTE DE POISSON)	SIM	NÃO	SIM (MEIÇÃO DO DESLOCAMENTO AUXÉTICO)
Louth et al., 2017	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	ALUMÍNIO	CURVATURA DUPLA	LINEAR COM INTERRUPTÕES, FORMATO "Y" (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	SIM	SIM	NÃO
Lee, 2011 (segunda parte, a primeira está contida em Kim et al., 2019)	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	BORRACHA DE SILILCONE COM ELEMENTOS ELÉTRICOS EMBUTIDOS, POLIIMIDA (PI)	EXTENSÃO AUXÉTICA	FORMATO RE-ENTRANTE ATRAVÉS DO MATERIAL (COM PREENCHIMENTO DOS VAZIOS)	NÃO	SIM	SIM (FE)	SIM	SIM (CAPACITÂNCIA DO MATERIAL)	SIM	SIM	NÃO
Konaković et al., 2016	INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	COBRE, ALUMÍNIO, PLÁSTICO, COURO	CURVATURA DUPLA	FORMATO "Y" (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE)	SIM	SIM	SIM (INDIRETAMENTE - CONFORMAÇÃO NA SUPERFÍCIE)
Shan et al., 2015	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	BORRACHA NATURAL DE LÁTEX	EXTENSÃO AUXÉTICA	FORMATO "KAGOME" E QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	SIM	SIM (CÁLCULO DO COEFICIENTE DE POISSON)	SIM	NÃO	SIM (MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO AUXÉTICO)
Kim et al., 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	POLIURETANO + PREENCHIMENTO DE ECOFLEX	EXTENSÃO AUXÉTICA CURVATURA DUPLA	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	SIM (FE)	SIM	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE)	SIM	NÃO	NÃO

Fonte: Da autora (2021).

Apêndice E — Planilha de dados dos estudos enquadrados na técnica de kirigami

SÍNTESE DA REVISÃO SISTEMÁTICA: EXTRAÇÃO DE DADOS DOS ESTUDOS TÉCNICA: KIRIGAMI												
CITAÇÃO	ABORDAGEM DO ESTUDO	DADOS EXTRAÍDOS DO ESTUDO			MÉTODOS UTILIZADOS NOS MATERIAIS COM CORTES							
		MATERIAL UTILIZADO	MOVIMENTO/ GEOMETRIA INVESTIGADA	PADRÃO DE CORTE APLICADO	SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA	ANÁLISE VISUAL	ANÁLISES ESTRUTURAIS (FE, ETC.)	ANÁLISE MECÂNICA	CÁLCULOS TEORÉTICOS/ ALGORITMO	FABRICAÇÃO DE AMOSTRA	PROTÓTIPO DO PRODUTO FINAL COM A TÉCNICA APLICADA	ANÁLISE/ MEDIÇÃO GEOMÉTRICA
Choi, Dudte e Mahadevan, 2018	INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	BORRACHA NATURAL RESISTENTE À ABRASÃO SUPER ELÁSTICA	CURVATURA DUPLA	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRILÁTERO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	NÃO	NÃO	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE)	SIM	SIM	SIM (INDIRETAMENTE)
Cho et al., 2014	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	BORRACHA DE SILICONE, PDMS (POLÍMERO ORGÂNICO À BASE DE SILICONE)	EXTENSÃO AUXÉTICA CURVATURA DUPLA	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	SIM	SIM (FE)	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE)	SIM	SIM	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR
Shyu et al., 2015	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	PAPEL VEGETAL, PAPEL VEGETAL INFILTRADO COM NANOTUBOS DE CARBONO, LÂMINA DE POLIAMIDA CRISTALINA, ÓXIDO DE GRAFENO/PVA, NANOCOMPÓSITO DE LBL E ÁLCOOL DE POLIVINIL	EXTENSÃO UNIAXIAL	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	SIM	SIM (BEAM-DEFLECTION ANÁLISES)	SIM	SIM	NÃO
Callens e Zadpoor, 2018	REVISÃO DA LITERATURA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	-	-	-	-	-	-	-	-
Xue et al., 2017	INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	NÃO CONSTA	CURVATURA DUPLA	CORTE INDIVIDUAL FORMATO DE "X", FORMATO SINUSOIDAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	SIM (FE)	NÃO	SIM (CÁLCULO E ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA)	NÃO	NÃO	NÃO
Vazquez e Jabi, 2015	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	"CONCRET CANVAS" (CONCRETO + UMA MATRIZ DE TECIDO)	EXTENSÃO POP-UP	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL)	NÃO	SIM (NÃO CONSTA O TIPO)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM (DIGITALIZAÇÃO)
Zheng et al., 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	DISSULFETO DE MOLIBDÊNIO + SUBSTRATO DE PDMS	EXTENSÃO UNIAXIAL CURVATURA SIMPLES	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (DIGITAL E PAPEL)	NÃO	SIM (FE)	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
Guo et al., 2016	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	PAPEL DE LIXA + LÂMINA DE ELETRODO DE OURO + LÂMINA DE ELETRODO DE GRAFITE + ENVELOPE DE BORRACHA DE SILICONE	EXTENSÃO UNIAXIAL CURVATURA SIMPLES	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Xu, Shyu e Kotov, 2017	REVISÃO DA LITERATURA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	-	-	-	-	-	-	-	-
Ma et al., 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	MULTILÂMINAS DE GRAFENO + FIBROÍNA DE SEDA	EXTENSÃO UNIAXIAL EXTENSÃO AUXÉTICA EXTENSÃO TIPO POP-UP	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES, CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO
Celli et al., 2018	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	BORRACHA NATURAL, PETG	EXTENSÃO AUXÉTICA EXTENSÃO UNIAXIAL EXTENSÃO BIAIXIAL	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRADO, CORTE COM VAZIOS FORMATO LOSANGULAR, CORTES COM VAZIOS EM FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	SIM	SIM (FE)	SIM	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE E CÁLCULO DE ANÁLISE CINEMÁTICA)	SIM	NÃO	NÃO
Yang, Choi e Kamien, 2016	REVISÃO DA LITERATURA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	-	-	-	-	-	-	-	-
Blees, 2015	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	GRAFENO	EXTENSÃO UNIAXIAL CURVATURA SIMPLES EXTENSÃO TIPO POP-UP	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	SIM (PAPEL)	SIM	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	SIM	SIM (CÁLCULOS DE RIGIDEZ, FLEXÃO, CONSTANTE DE MOLA, ETC.)	SIM	NÃO	SIM (MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO EM FLEXÃO)
Chen et al., 2019	INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	VIDRO METÁLICO	EXTENSÃO UNIAXIAL	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES, CORTE PARALELO LINEAR SINUSOIDAL COM INTERRUPTÇÕES, CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPTÇÕES EXTREMIDADES EM CÍRCULO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM (CÁLCULO DE DEFLEXÃO E DE ENERGIA DE FLEXÃO)	SIM	NÃO	NÃO
Holmesa, 2019	REVISÃO DA LITERATURA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	NÃO SE APLICA	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Da autora (2021).

KIRIGAMI. TOTAL ESTUDOS: 15, REVISÕES DA LITERATURA:4. TOTAL COMPUTAVEIS: 11																																				
OBJETIVO					MATERIAL					MÉTODOS DE ANÁLISE																										
ABORDAGEM	QNT.	%	MOVIMENTO/GEOMETRIA INVESTIGADA	QNT.	%	TIPO	QNT.	%	PADRÃO DE CORTE APLICADO	QNT.	%	SIMULAÇÃO GEOMÉTRICA	QNT.	%	CÁLCULO TEORÉTICO/ALGORITMO	QNT.	%	ANÁLISE ESTRUTURAL (FE, ETC.)	QNT.	%	FABRICAÇÃO DE AMOSTRA	QNT.	%	ANÁLISE VISUAL	QNT.	%	ANÁLISE MECÂNICA	QNT.	%	ANÁLISE/MEDIÇÃO GEOMÉTRICA	QNT.	%	PROTÓTIPO DO PRODUTO FINAL COM A TÉCNICA APLICADA	QNT.	%	
INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS OU PADRÕES DE CORTE	9	82	CURVATURA DUPLA	3	27	VIDRO METÁLICO	1	9	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRILÁTERO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9	NÃO	6	55	NÃO	3	27	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	1	9	SIM	9	82	SIM	6	55	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	1	9	NÃO	8	73	SIM	7	64	
			CURVATURA SIMPLES	3	27	BORRACHA DE SILICONE, PDMS (POLÍMERO ORGÂNICO À BASE DE SILICONE)	1	9	CORTES FRACTAIS FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	3	27	SIM (DIGITAL)	4	36	SIM (ALGORITMO PARA GERAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE)	3	27	NÃO	4	36	NÃO	2	18	NÃO	5	45	NÃO	3	27	NÃO É POSSÍVEL AFIRMAR	1	9	NÃO	4	36	
			EXTENSÃO AUXÉTICA	3	27	PAPEL VEGETAL, PAPEL VEGETAL INFILTRADO COM NANOTUBOS DE CARBONO, LÂMINA DE POLIAMIDA CRISTALINA, ÓXIDO DE GRAFENO/PVA, NANOCOMPÓSITO DE LBL E ÁLCOOL DE POLIVINIL	1	9	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	7	64	SIM (PAPEL)	2	18	SIM (CÁLCULO DE ANÁLISE CINEMÁTICA)	1	9	SIM (FE)	5	45									SIM	7	64	SIM (DESLOCAMENTO EM FLEXÃO C/ PAPEL)	1	9		
INVESTIGAÇÃO VOLTADA À OTIMIZAÇÃO DO PADRÃO DE CORTE A PARTIR DE UMA GEOMETRIA-ALVO	4	36	EXTENSÃO UNIAIXIAL	7	64	MULTILÂMINAS DE GRAFENO + FIBROÍNA DE SEDA	1	9	CORTE PARALELO LINEAR COM INTERRUPÇÕES EXTREMIDADES EM CIRCULO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9			SIM (CÁLCULO E ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA)	1	9	SIM (NÃO DIZ O TIPO)	1	9											SIM (DIGITALIZAÇÃO)	1	9				
			EXTENSÃO TIPO POP-UP	3	27	NÃO CONSTA	1	9	CORTE INDIVIDUAL FORMATO DE "X", FORMATO SINUSOIDAL (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9			SIM (BEAM-DEFLECTION ANÁLISES)	1	9																				
			EXTENSÃO BIAIXIAL	1	9	CONCRETO + UMA MATRIZ DE TECIDO	1	9	CORTE COM VAZIOS FORMATO LOSANGULAR (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9			SIM (CÁLCULO DE DEFLEXÃO E DE ENERGIA DE FLEXÃO)	1	9																				
INVESTIGAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA A UM MATERIAL OU USO ESPECÍFICO	7	64			DISSULFETO DE MOLIBDÊNIO + SUBSTRATO DE PDMS	1	9	CORTES COM VAZIOS EM FORMATO QUADRADO (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9			SIM	1	9																					
					PAPEL DE LIXA + LÂMINA DE ELETRODO DE OURO + LÂMINA DE ELETRODO DE GRAFITE + ENVELOPE DE BORRACHA DE SILICONE	1	9	CORTE PARALELO LINEAR SINUSOIDAL COM INTERRUPÇÕES (ATRAVÉS DO MATERIAL)	1	9			SIM (CÁLCULOS DE RIGIDEZ, FLEXÃO, CONSTANTE DE MOLA, ETC.)	1	9																					
					BORRACHA NATURAL	2	18																													
					PETG	1	9																													
					GRAFENO	1	9																													

Fonte: Da autora (2021).

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).