

## ESTUDOS PRELIMINARES PARA O CÁLCULO DA FLEXÃO DE MATERIAIS PLANOS POR MEIO DA TÉCNICA DE KERF-BENDING

### PRELIMINARY STUDIES FOR CALCULATING THE BENDING OF FLAT MATERIALS USING THE KERF-BENDING TECHNIQUE

André Luis Marques da Silveira<sup>1</sup>

Vinicius Gadis Ribeiro<sup>2</sup>

#### Resumo

Este artigo apresenta os resultados preliminares da pesquisa intitulada “*Kerf-bending: estudo do design dos padrões de corte aplicados em painéis e chapas de madeira para a fabricação moveleira*”. A investigação busca colaborar para a inovação no setor moveleiro do estado do Rio Grande do Sul, através do estudo do design de padrões paramétricos de corte. Estes padrões compreendem uma rede de células que recorta a superfície de chapas de *Medium-Density Fiberboard (MDF)*, mediante o emprego da técnica *Kerf-bending*, para tornar o material mais flexíveis e foi empregada com equipamento de *Laser Cutting*. Entende-se que os padrões paramétricos de corte apresentam aplicações inovadoras quanto ao processamento da madeira, e principalmente, novas estratégias de design para a fabricação de produtos para o setor moveleiro. O texto está organizado em seis (6) capítulos, a saber: aspectos metodológicos; conceituando padrões de corte e método para sua criação; propondo uma classificação; procedimentos para o cálculo da flexão de padrões de corte do tipo transpasse parcial e total; considerações finais.

**Palavras-chave:** madeira, celulose e móveis; design moveleiro; flexão de materiais.

#### Abstract

This article presents the preliminary results of the research entitled “*Kerf Folding: study of the design of cutting patterns applied to wooden panels and sheets for the manufacture of furniture*”. The investigation sought to collaborate for innovation in the furniture sector in the state of Rio Grande do Sul, through the study of the design of parametric cutting patterns. These patterns consist of a network of cells cut on the surface of Medium Density Fiberboard (MDF) sheets, using the Kerf-bending technique, to make the material more flexible by applying laser cutting. It is understood that parametric cutting patterns present innovative applications in terms of wood processing and, mainly, new design strategies for the manufacture of products for the furniture sector. The text is organized into 6 (six) chapters, namely: methodological aspects; conceptualize cutting patterns and method for their creation; propose a classification; procedures for calculating the bending of cutting patterns with partial and total overlap; final considerations.

**Keywords:** wood, cellulose and furniture; design furniture; kerf-bending.

---

<sup>1</sup> Professor Doutor, Escola de Comunicação, Artes e Design - PUCRS, andre.silveira@pucrs.br, andre@um.pro.br

<sup>2</sup> Professor Doutor, Pós-graduação em Design - PGDESIGN/UFRGS, vinicius.gadis@ufrgs.br

## 1. Introdução

Este artigo descreve estudos preliminares para o cálculo da flexão de materiais planos e rígidos mediante o emprego da técnica para flexão de materiais designada de *Kerf-bending*. A técnica envolve a realização de sulcos ou fendas (nervura) na superfície de Painéis e Chapas de madeira para torná-los flexíveis. Para tanto, geralmente é empregada através de equipamentos como *Router Computer Numeric Control* e *Laser Cutting*.

O corte é formado pela repetição de um desenho, designado de padrão paramétrico de corte. Sua concepção envolve conceitos como *Módulo*, *Rapport* e *Grid*. Os padrões paramétricos de corte são formados por uma rede de células aplicada sobre a superfície de um material, combinados de forma homogênea ou heterogênea. Lienhard et al (2014), entendem estes padrões como o desenho de elementos geométricos que irão formar estruturas ativas de flexão. Os autores desenvolveram uma estratégia, utilizando elementos de cabo contraídos, que puxam pontos associados a sistema inicialmente planar, para configurar elasticamente a deformada de uma superfície planas. Esta abordagem permite que o Método dos Elementos Finitos (FEM) seja aplicado para simular a forma final de estruturas ativas de flexão. Entretanto, uma desvantagem do método é a necessidade de sempre iniciar a simulação a partir de uma configuração planar pré-definida para rastrear as forças de tração e compressão exercidas sobre a geometria.

Em outras palavras, quando um padrão é submetido a forças de tração e compressão sua geometria deforma-se a partir do seu centro e ao longo da seção transversal e longitudinal de sua superfície. Dependendo da espessura e comprimento do material, do tipo de curvatura que se deseja obter, deve-se adotar um padrão de corte diferente. Dentre as variáveis básicas envolvidas no cálculo da configuração dos padrões de corte, destacam-se: o espaçamento, largura, comprimento e espessura do corte, dentre outros.

Este artigo foi organizado da seguinte forma: na segunda seção, aborda-se a metodologia de trabalho; na terceira, sugere-se um procedimento metodológico para a criação dos padrões paramétricos de corte; na quarta, apresenta-se uma proposta para a sua classificação; na quinta, descreve-se os estudos preliminares para o cálculo da flexão de Painéis de madeira, para os padrões do tipo transpasse parcial e total.

Entende-se que a importância do estudo dos padrões paramétricos de corte se justifica como uma estratégia de inovação impulsionada pelo design, quanto as possibilidades compositivas e formais para o setor moveleiro

## 2. Aspectos Metodológicos

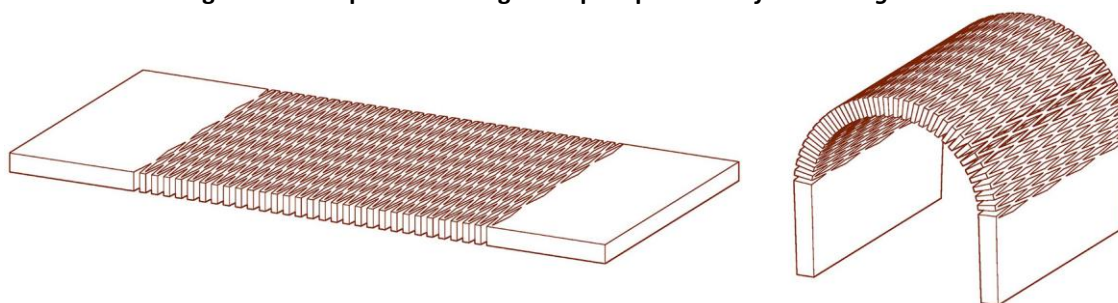
A investigação se caracteriza como aplicada, pautada pela pesquisa bibliográfica, pesquisa experimental e matemática aplicada. Na etapa de pesquisa experimental, explorou-se o método *Rapport* com uma alternativa para a criação dos padrões paramétricos de corte; na etapa de pesquisa bibliográfica, identificou-se propostas para a classificação dos padrões; na última etapa, aplicou-se a matemática para conceber simulações da flexão de padrões de corte do tipo transpasse parcial e total.

## 3. Conceitos Básicos para a criação de Padrões Flexíveis de Corte

Segundo Güzelci et al. (2016) e Muñoz et al. (2011), a técnica de *Kerf-bending* permite transformar a superfície de painéis de madeira rígida em flexível. Isto se deve, preponderantemente, a distribuição uniforme das linhas de corte que formam o padrão.

A busca por estas soluções exige do designer conhecimento da natureza geométrica das formas, particularmente, das linhas estruturais que configuram o resultado almejado. Para facilitar o processo para criação de padrões de corte distribuídos e uniformes, adotou-se o método *Rapport* como uma possível alternativa. Entretanto, entende-se que existem outros caminhos que podem ser adotados para a criação destes padrões. Além disto, nem todos os resultados concebidos pelo método são eficazes, uma vez que podem formar ilhas que acarretam o desprendimento indesejado de parte do material. Este fato nos levou a elaborar uma classificação dos padrões mais adequados a aplicação da técnica de *Kerf-bending*, apresentada na quarta seção do texto. A seguir, aborda-se os conceitos de Módulo, Grid, Repetição e Padrão do método.

Figura 1: Exemplo da flexão gerada pelo padrão Kerf 03: Losango.

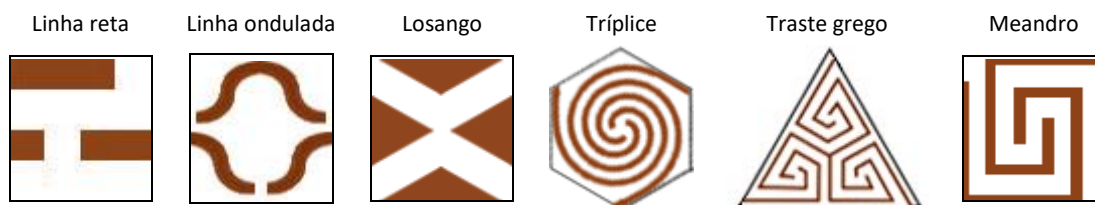


Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.1. Módulo

O Módulo se refere a menor unidade que contém os elementos gráficos que fazem parte do desenho do padrão. O padrão será formado pela composição e organização destes elementos presentes no módulo e pela sua repetição. Entende-se que o desenho do módulo desempenha um papel chave na flexão do padrão. É uma espécie de célula que configura as características intrínsecas dos elos de torção (*Elo<sup>Torção</sup>*). Ao contrário de uma célula rígida, esta célula deve ser projetada para se deformar quando uma força é aplicada, permitindo um movimento direcional controlado.

Figura 1: Exemplos de módulos aplicáveis aos padrões paramétrico de corte.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.2. Grid, Malha, Grelha ou Diagrama

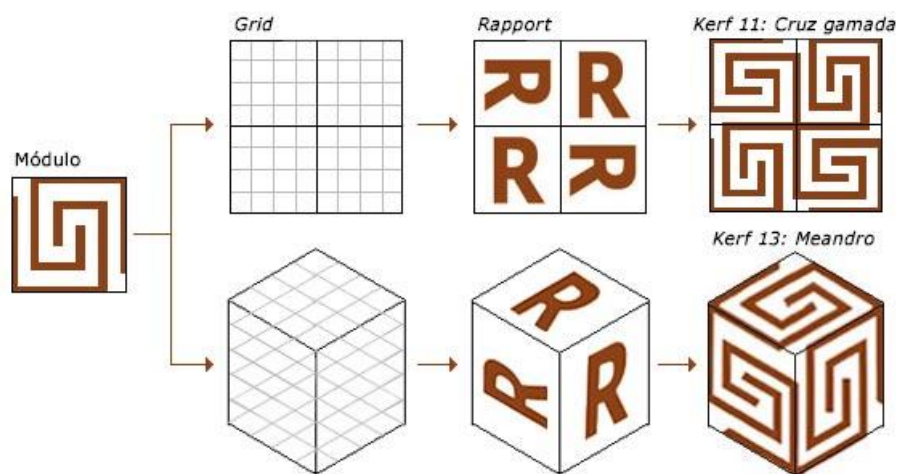
Para criar um sistema de repetição para o módulo é necessário utilizar o recurso do *Grid*, que compreende uma estrutura geométrica constituída por eixos para auxiliar no alinhamento do

módulo. Ele se apresenta como uma solução simples para a resolução de determinados problemas compositivos.

### 3.3. Rapport ou Repetição

O *Rapport* é formado a partir da repetição do módulo e seu encaixe ocorre dentro de um *Grid* mediante aplicação das operações de rotação, translação ou reflexão, tudo isso sem mudar a sua origem. Mudando a origem do módulo, há situações de deslocamento no eixo. Neste último caso, não é aplicável a técnica de flexão de materiais. A Figura 02 exemplifica duas soluções de *Rapport* em um *Grid* quadrangular e losangular.

Figura 2: *Rapport* do Kerf 11: Cruz gamada e Kerf 13: Meandro.

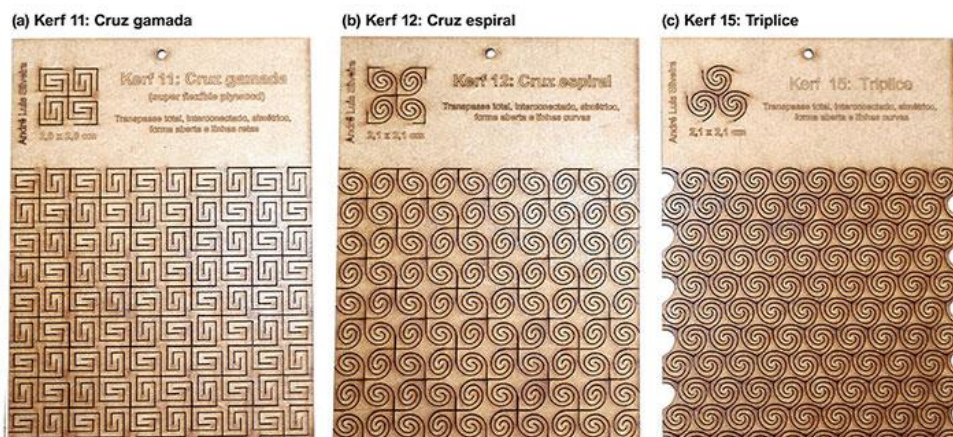


Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.4. Padrão

O padrão de preenchimento controla a aparência da superfície exibida em projeção. Abaixo, exemplos de Padrões normatizados pelo método.

Figura 3: Exemplos de padrões recortados sobre chapas de MDF de 3 mm.



Fonte: Elaborado pelos autores.



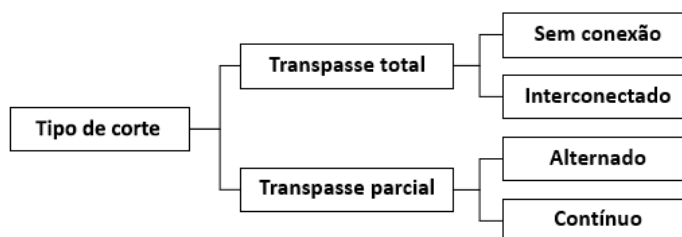
#### 4. Classificação dos Padrões Paramétricos de Corte

Nesta sessão, apresenta-se uma proposta para a classificação dos padrões paramétricos de corte mais adequados a aplicação da técnica de *Kerf-bending*. Cabe ressaltar, que não interessa a pesquisa classificar as chapas de *MDF* quanto à espessura, características físicas, acabamento, processo de fabricação, dentre outros aspectos. Estamos interessados nas propriedades mecânicas destas chapas, especificamente, a capacidade de flexão da superfície devido o desenho do padrão de corte. Segundo Capone e Lanzara (2018), o raio máximo de curvatura que um material pode atingir depende, por exemplo, do desenho e da distribuição do corte. Sendo assim, um padrão paramétrico de corte pode ser classificado segundo: 1) Tipo de corte; 2) Estrutura geométrica do grid; 3) Índice gráfico; e 4) Flexão da superfície.

##### 4.1. Quanto ao Tipo de Corte

Loyola et al (2017), propõe a seguinte classificação dos tipos de cortes ou padrões de sulcos (formas diferentes de cortar um painel): corte de um lado; corte através do painel e corte de ambos os lados. Abaixo, a classificação proposta no presente trabalho.

Figura 4: Classificação dos tipos de corte.



Fonte: Elaborado pelos autores.

a) **Transpasse total:** compreendem os padrões que quando aplicados sobre o material abrem fendas no sentido da largura e comprimento da chapa de *MDF*. As fendas devem ultrapassar a espessura do material. O comprimento e largura dos cortes não podem ser equivalentes a largura e/ou comprimento da peça. Além disto, os cortes podem estar interconectados ou não.

Figura 5: Transpasse total.

Sem conexão		Interconectado
Kerf 01: Linha reta	Kerf 03: Losango	Kerf 11: Cruz gamada

Fonte: Elaborado pelos autores.

**b) Transpasse parcial:** compreendem os padrões que aplicados sobre o material abrem fendas no sentido da espessura da chapa de MDF. As fendas não podem ultrapassar a espessura do material e seu comprimento deve ser equivalente a largura e/ou comprimento da peça. Além disto, os cortes criados podem ser aplicados em apenas uma das faces da peça ou ambas, caracterizando uma aplicação contínua ou alternada.

Figura 6: Transpasse parcial.

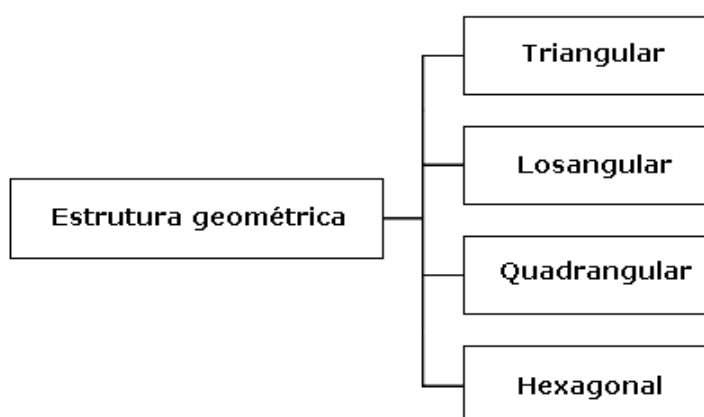
Alternado		Contínuo	
Kerf 21: Linha reta	Kerf 22: Triangular	Kerf 31: Linha reta	Kerf 32: Triangular
espaçamento da nervura		espaçamento da nervura	
comprimento da nervura		comprimento da nervura	
espessura da nervura		espessura da nervura	

Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.2. Quanto a Estrutura Geométrica do Grid

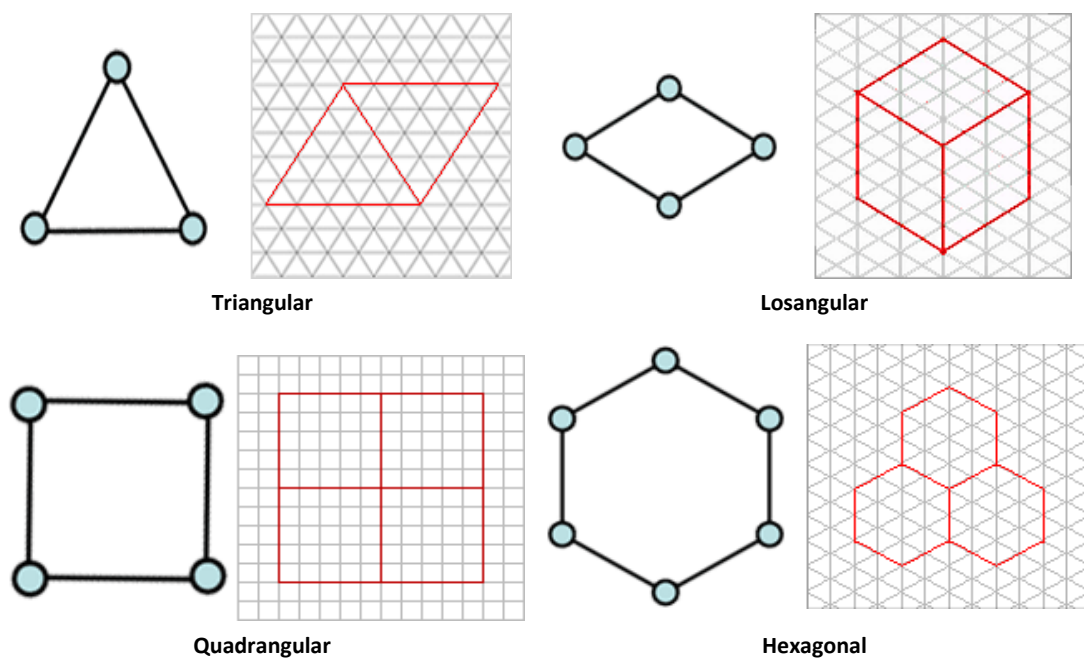
Identificou-se, as seguintes estruturas geométricas ou figuras geométricas que emergem do *Grid* e que ordenam o encaixe das repetições do padrão.

Figura 7: Tipos de estruturas geométricas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8: Estruturas geométrica para o Grid

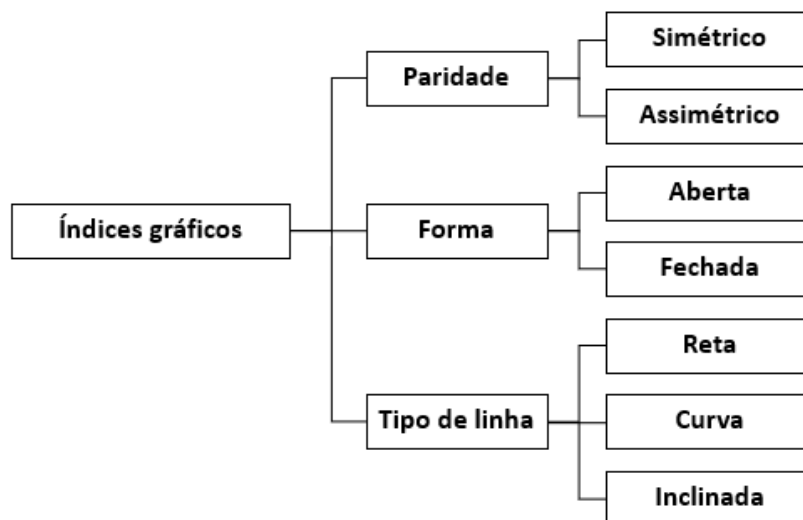


Fonte: Elaborado pelos autores.

### 4.3. Quanto ao Índice Gráfico

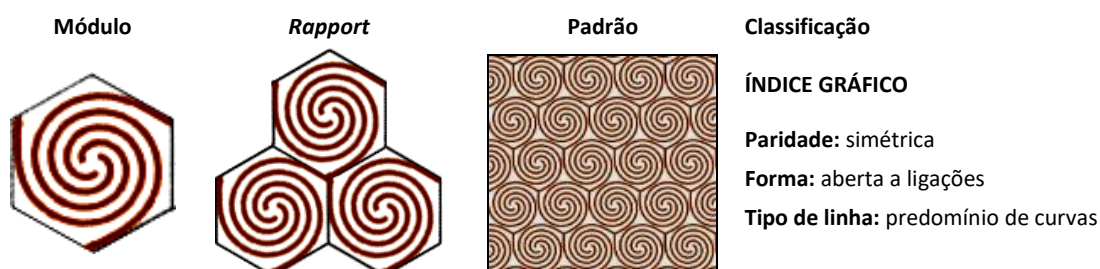
O índice gráfico aponta as características básicas do desenho do padrão, compreendendo uma paridade simétrica ou assimétrica da composição; uma configuração aberta ou fechada dos traçados que possibilita ou não ligações entre as linhas que formam o desenho; um sentido predominante dos traçados.

Figura 9: Tipos de índices gráficos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10: Classificação por Índice gráfico Kerf 15: *Triplíce*.

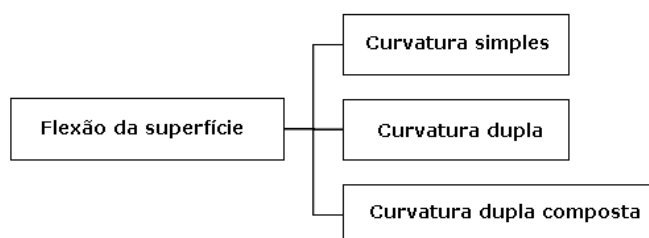


Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.4. Quanto a Flexão da Superfície

Observou-se que a superfície flexionada resultante da aplicação dos padrões pode ser classificada como curvatura simples (Elíptica ou cilíndrica hiperbólica); curvatura dupla (Paraboloide elíptica); curvatura dupla composta (Paraboloide hiperbólica).

Figura 11: Tipos de flexão.

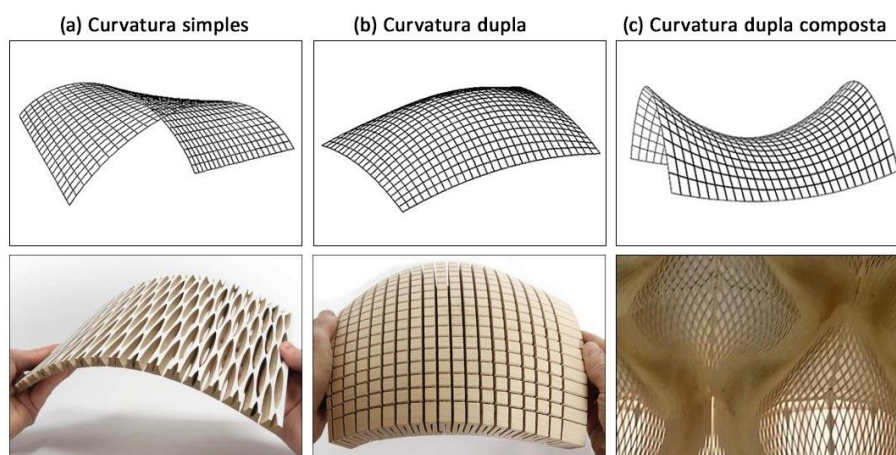


- **Superfície de curvatura simples:** Compreendem os padrões que flexionam naturalmente em um eixo preponderantemente (x ou y). Suas ranhuras são alongadas e apresentam uma grande densidade em um eixo específico, acarretando assim, uma grande influência no sentido da curvatura da superfície. Pode-se observar este fenômeno na figura 6a, onde as ranhuras do padrão definem uma superfície cilíndrica hiperbólica. A flexão da superfície é gerada pelo padrão que se desloca paralelamente a um plano diretor, apoiando-se sempre sobre duas curvas diretrizes, fazendo com que a superfície resultando seja moldada em um formato cilíndrico.
- **Superfície de curvatura dupla:** compreendem os padrões que se curvam em dois sentidos simultaneamente (x e y) quando submetidos a uma carga a forças externas de compressão e tração. Para tanto, é fundamental que o padrão seja simétrico nos eixos x e y, caso contrário, uma das duas direções se torna dominante e o padrão será de curvatura única. Pode-se observar este fenômeno na figura 6b, onde as ranhuras do padrão definem uma superfície paraboloide elíptica, fazendo com que a superfície resultando seja moldada em um formato ovalado.
- **Superfície de curvatura dupla composta:** Compreendem os padrões que se curvam-se em dois sentidos simultaneamente (x e y) quando submetido a uma carga a forças externas de compressão e tração. Em geral, aplica-se sobre a superfície um ou mais padrões de cortes em direções e escala diferentes,



configurando arranjos de padrões. Pode-se verificar este fenômeno na figura 6c, onde as ranhuras do padrão definem uma superfície parabolóide hiperbólica, fazendo com que a superfície resultante seja moldada em um formato de sela.

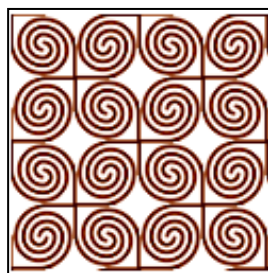
**Figura 12: Exemplos de padrões classificados segundo a flexão da superfície**



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando-se o padrão **Kerf 12: Cruz espiral**, sua classificação seria de acordo com a Figura 13.

**Figura 13: Classificação do padrão Kerf 12: Cruz espiral.**



**CLASSIFICAÇÃO DO PADRÃO**

**Tipo de corte:** transpasse total interconectado.

**Estrutura do grid:** quadrangular.

**Índice gráfico:** simétrico, forma aberta, linhas curvas.

**Flexão da superfície:** curvatura dupla.

Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.4.1. Considerações Quanto aos Padrões de Curvatura Dupla e Dupla Composta

A superfície resultante destes padrões possui propriedades do tipo auxético. Os materiais auxéticos possuem uma compressibilidade negativa (coeficiente de Poisson negativo<sup>3</sup>). Isso significa que eles têm o seu volume ou largura aumentado quando é aplicada uma força de compressão. Infere-se que as ligações auxéticas decorrem da rotação dos polígonos que se formam na vizinhança dos cortes. A Figura 14 ilustra a amostra do padrão **Kerf 11: Cruz gamada** submetida a uma força de compressão.

<sup>3</sup> O coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação elástica na direção perpendicular e a de carregamento. Materiais com coeficiente de Poisson negativo são denominados materiais auxéticos, o que significa que quando tracionamos um corpo na direção longitudinal, ele se expande na direção lateral.

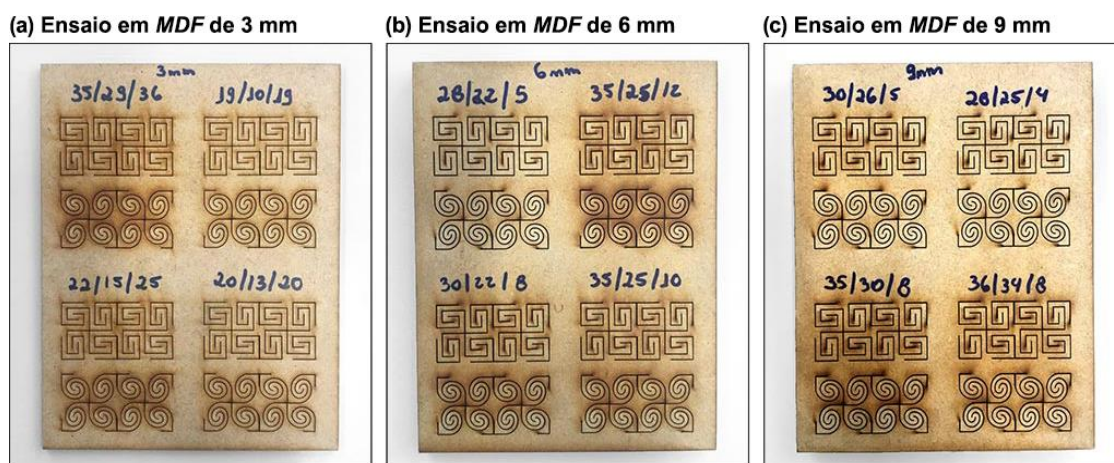
Figura 14: Padrão Kerf11: Cruz gamada ilustrando ligações auxéticas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 15 apresenta ensaios de cortes realizados em peças de *MDF* de 3, 6 e 9 para a configuração dos equipamentos *LASERCNC CMA-1080* e *CMA-1008-B-A* utilizados na pesquisa. Os parâmetros testados foram velocidade, potência e número de passadas do *laser*.

Figura 15: Amostras do ensaio de cortes em chapas de *MDF* de 3, 6 e 9 mm.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5. Procedimentos Para o Cálculo da Flexão

### 5.1. Simulação da Flexão Para Padrões Com Transpasse Parcial Contínuo

Para maior precisão dos resultados do cálculo, estabeleceu-se duas premissas: 1) os cortes efetuados não devem ultrapassar a espessura do material, 2) A profundidade do corte ( $K^V$ ) deve ser  $\geq 75\%$  e  $\leq 90\%$  da espessura do material. O fato se deve a dificuldade de se obter dados quanto a flexão estática das chapas de *MDF*, considerando-se sua composição (fibra, resina, umidade, dentre outros) e diferentes espessuras. As variáveis envolvidas são:

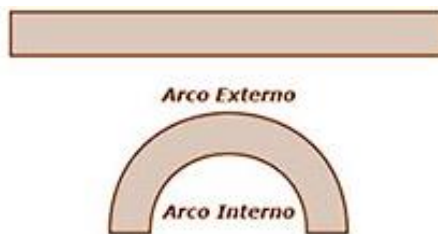
- $e$  = Espessura do material
- $K^E$  = Espessura do corte

- $K^Q$  = Quantidade de material a ser removido
- $K^V$  = Distância vertical entre cortes (profundidade)
- $K^h$  = Distância horizontal entre cortes
- $K^d$  = Deformação por compressão e tração
- $K^{laser}$  = Espessura do corte a laser ( $\geq 0,1$  mm)
- $K^{CNC}$  = Espessura do corte da Router CNC ( $\geq 2$  mm)     $n^{kerf}$  = Número total de Kerf
- $Elo_{Torção}$  = Tamanho do elo de torção
- $\vartheta$  = Ângulo de flexão por elo de torção
- $\Theta$  = Ângulo total da flexão
- $Raio_{Arco\ Externo}$  = Raio do arco externo
- $Arco_{Externo}$  = Perímetro do arco externo
- $Arco_{Interno}$  = Perímetro do arco interno

A seguir, simulação da flexão de uma chapa de MDF de 20 mm, considerando-se o desenho técnico da peça desejada e o **Kerf 31: Linha reta**. Os cálculos informam a quantidade de material a ser removido, número total de *kerfs*, dentre outras variáveis relevantes.

Figura 16: Flexão almejada.

- $e = 20$  mm
- $\Theta = 180^\circ$
- $K^V = 15$  mm ( $\geq 75\%$  e  $\leq 90\%$  de  $e$ )
- $K^E = 4$  mm ( $\geq K^{laser}$  ou  $K^{CNC}$ )
- $Arco_{Externo} = 140$  mm
- $Arco_{Interno} = 84$  mm



1) Quantidade de material a ser removido ( $K^Q$ )

$$K^Q = Arco_{Ext} - Arco_{Int} \quad K^Q = 140 - 84 = 56 \text{ mm}$$

2) Número total de Kerfs necessários ( $n^{kerf}$ )

$$n^{kerf} = \frac{K^Q}{K^E} + 1 \quad n^{kerf} = 15$$

3) Distância horizontal entre os Kerfs ( $K^h$ )

$$K^h = \frac{Arco_{Ext}}{n^{kerf} - 1} \quad K^h = 10 \text{ mm}$$

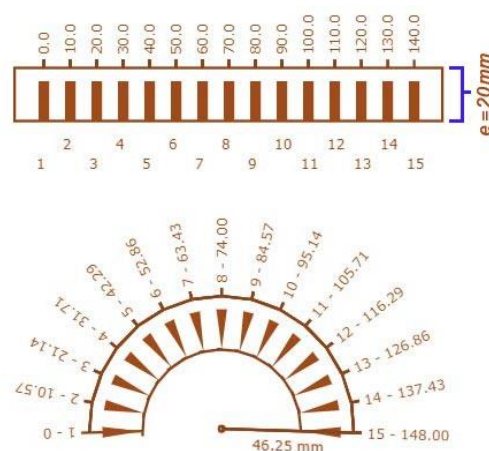
4) Ângulo de flexão por Elo de torção ( $\vartheta$  Radiano e Graus)

$$\vartheta_{Radianos} = \frac{K^E}{K^V + \frac{e - K^V}{2}} \quad \vartheta_{Radiano} = 0,22857$$

$$\vartheta_{Grau} = 13,0961$$

5) Deformação por compressão e tração ( $K^d$  deformação)

$$K^d = \left( \frac{e - K^V}{2} \right) \times \vartheta_{Radianos} \quad K^d = 0,5714 \text{ mm}$$





6) Elo de Torção ( $Elo_{Torção}$ )

$$Elo_{Torção} = K^h + K^d \quad Elo_{Torção} = 10,5714 \text{ mm}$$

7) Raio do Arco Externo ( $Raio_{Arco\ Externo}$ )

$$Raio_{Arco\ Externo} = \frac{Elo_{Torção}}{\theta_{Radianos}} \quad Raio_{Arco\ Externo} = 46,25 \text{ mm}$$

8) Ângulo total de Flexão ( $\Theta_{Radiano\ e\ Graus}$ )

$$\Theta_{Radianos} = \theta_{Radianos} \times (n^{kerf} - 1) \quad \Theta_{Radianos} = 3,1999$$

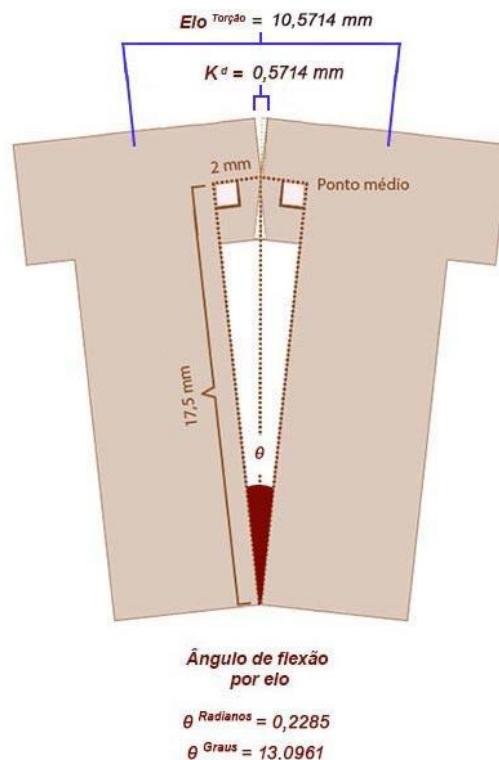
$$\Theta_{Graus} = 183,3464$$

9) Perímetro do Arco Interno ( $Arco_{Interno}$ )

$$Arco_{Interno} = \Theta_{Radianos} \times (Raio_{Arco\ Externo} - e) \quad Arco_{Interno} = 84 \text{ mm}$$

10) Perímetro do Arco Externo ( $Arco_{Externo}$ )

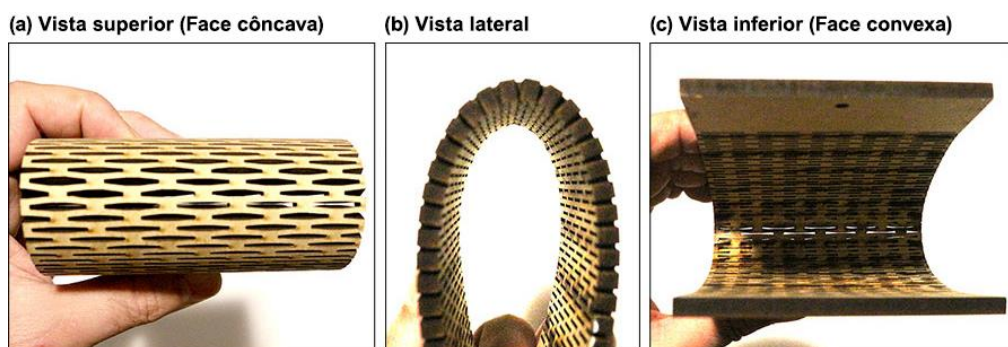
$$Arco_{Externo} = \Theta_{Radianos} \times Raio_{Arco\ Externo} \quad Arco_{Externo} = 148 \text{ mm}$$



## 5.2. Simulação da Flexão Para Padrões Com Transpasse Total de Curvatura Simples

Quando uma chapa de madeira é recortada com padrões com transpasse total, sem conexão e simétricos, os recortes configuram elos de torção. Quando os elos são submetidos a um momento fletor  $M$ , seu centro move-se para fora (tração) e para dentro (compressão), ampliando e reduzindo, respectivamente, a espessura do corte da face superior e inferior de cada elo. O  $\theta$  Ângulo de torção por elo informa o ângulo de inclinação a que os elos são submetidos devido as forças que agem sobre ele, deformando sua geometria a partir do seu centro, ao longo das seções transversal e longitudinal. O  $\Theta$  Ângulo total da curvatura compreende a soma total dos  $\theta$  Ângulo de torção por elo. A partir deles, pode-se calcular o Raio resultante da ação do momento fletor. A flexibilidade da peça criada é determinada, desconsiderando-se as propriedades elásticas do material, pela geometria do corte.

Figura 17: Peça de MDF de 6 mm de espessura recortada no padrão Kerf 01: Linha reta.



Fonte: Elaborado pelos autores.

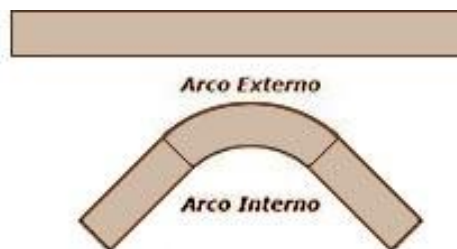
Para proceder-se o cálculo da flexão desejada, deve-se observar:

- $e$  = Espessura do material
- $K^d$  = Deformação por compressão e tração
- $K^c$  = Comprimento do corte
- $K^D$  = Distância horizontal entre cortes
- $K^{Laser}$  = Espessura do corte a laser ( $\geq 0,1$  mm)
- $K^{CNC}$  = Espessura do corte da Router CNC ( $\geq 2$  mm)  $K^E$  = Espessura do corte
- $K^V$  = Distância vertical entre cortes
- $n^{kerf}$  = Número total de Kerfs
- $\vartheta$  = Ângulo de torção por elo
- $\Theta$  = Ângulo total da curvatura

A seguir, simulação da flexão de uma chapa de MDF de 6 mm, considerando-se o desenho técnico da peça desejada e o padrão aplicado **Kerf 01: Linha reta (Straight ou straight mesh)**. Os cálculos informam a quantidade de material a ser removido, número de kerfs, distância horizontal entre os Kerfs, dentre outras variáveis relevantes.

Figura 18: Flexão almejada.

- $e = 6$  mm
- $\Theta$  Graus =  $90^\circ$
- $K^E = 1$  mm ( $\geq K^{laser}$  ou  $K^{CNC}$ )
- $Arco^{Externo} = 70,00$  mm
- $Arco^{Interno} = 60,58$  mm



1) Quantidade de material a ser removido ( $K^Q$ )

$$K^Q = Arco^{Ext} - Arco^{Int} \quad K^Q = 9,42 \text{ mm}$$

2) Número total de Kerfs necessários ( $n^{kerf}$ )

$$n^{kerf} = \frac{2 \times K^Q}{K^E} \quad n^{kerf} = 18$$

3) Distância horizontal entre os Kerfs ( $K^h$ )

$$K^h = \frac{Arco^{Int}}{n^{kerf}} \quad K^h = 3,37 \text{ mm}$$

4) Raio do arco Interno ( $Raio^{Arco\ Interno}$ )

$$Raio^{Arco\ Interno} = \frac{e \times Arco^{Int}}{K^Q} \quad Raio^{Arco\ Interno} = 38,58 \text{ mm}$$

Observações:

- A figura abaixo é meramente ilustrativa.
- O desenho não apresenta o  $n^{kerf}$  da simulação.
- O valor do  $K^D$  foi definido como 4 mm.
- O valor do  $K^c$  foi definido como 15 mm.



5) Raio do arco Externo (*Raio* Arco Externo)

$$Raio_{Arco\ Externo} = \frac{e \times Arco_{Ext}}{K^Q} \quad Raio_{Arco\ Externo} = 44,58\ mm$$

6) Ângulo de flexão por Elo de torção ( $\vartheta$  Radiano e Graus)

$$\vartheta_{Radianos} = \frac{K^h + K^{laser}}{Raio_{Arco\ Interno}} \quad \vartheta_{Radianos} = 0,087610$$

$$\vartheta_{Graus} = 5,01968$$

7) Ângulo total de flexão ( $\Theta$  Radiano e Graus)

$$\Theta_{Radianos} = \vartheta_{Radianos} \times n_{kerf} \quad \Theta_{Radianos} = 1,57698$$

$$\Theta_{Graus} = 90,35$$

8) Deformação por compressão e tração ( $K^d$ )

$$K^d = (e \times \vartheta_{Radianos}) + K^{laser} \quad K^d = 0,535660\ mm$$

9) Elo de Torção (*Elo* Torção)

$$Elo_{Torção} = K^h + K^d \quad Elo_{Torção} = 3,9056\ mm$$

10) Perímetro do Arco Interno (*Arco* Interno)

$$Arco_{Interno} = \Theta_{Radianos} \times Raio_{Arco\ Interno}$$

$$Arco_{Interno} = 60,84\ mm$$

11) Perímetro do Arco Externo (*Arco* Externo)

$$Arco_{Externo} = \Theta_{Radianos} \times Raio_{Arco\ Externo}$$

$$Arco_{Externo} = 70,30\ mm$$

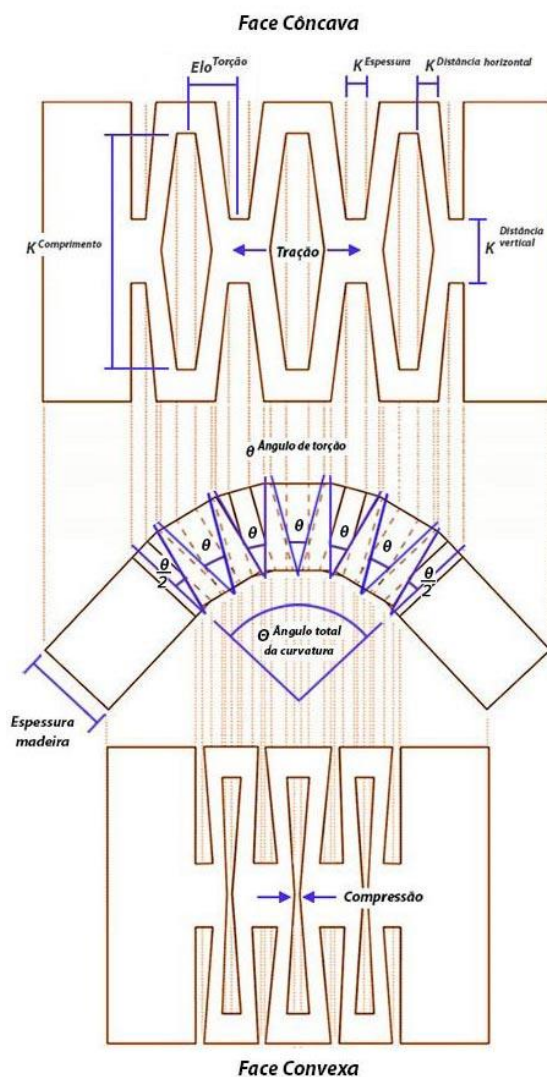
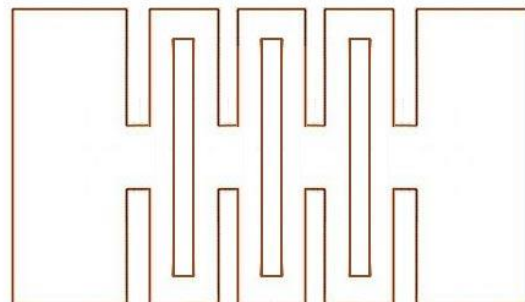
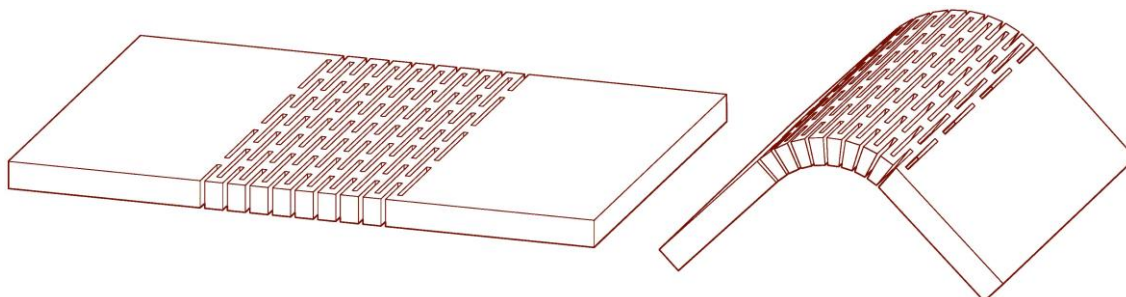


Figura 19: Simulação da flexão em 90° de peça em *MDF* com recorte no padrão *Kerf 01: Linha reta*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

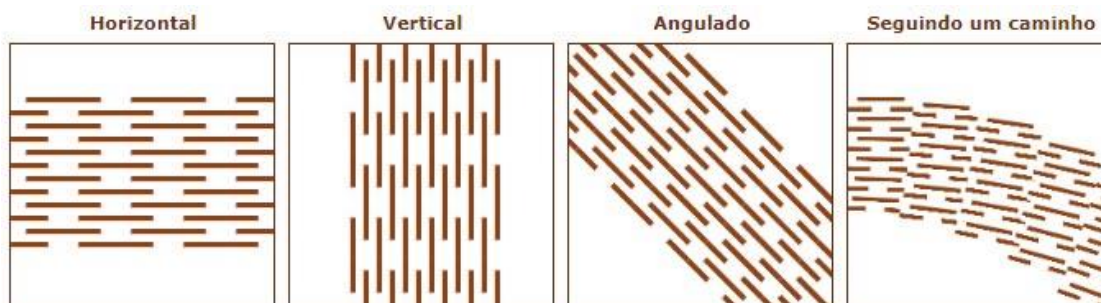
## 6. Estudos Quanto à Direção, Escala, Arranjo, Juntas e Encaixes

A partir da investigação, identificou-se que a flexão gerada pela aplicação de um padrão sobre um painel de *MDF* está relacionada a espessura do material, espaçamento horizontal e vertical, comprimento e espessura da nervura do padrão, dentre outras questões. Entretanto, para ter-se maior flexibilidade em termos de aplicação na indústria moveleira, investigou-se também a direção, escala e arranjo dos cortes. Estas operações podem ser aplicadas em separado ou combinadas, possibilitando uma diversidade de configurações geométricas. Esta etapa possui caráter experimental e propiciou a observação e análise quanto a aplicabilidade construtiva das variações dos padrões para fins de projeto.

### 6.1. Quanto à Direção

Se refere ao alinhamento do(s) padrão(ões) ao longo de um plano, podendo ser horizontal, vertical, angulado ou seguindo um caminho. A direção estabelece o fluxo ou sentido do(s) padrão(ões) dentro de um arranjo.

Figura 20: Direções para a aplicação dos padrões.

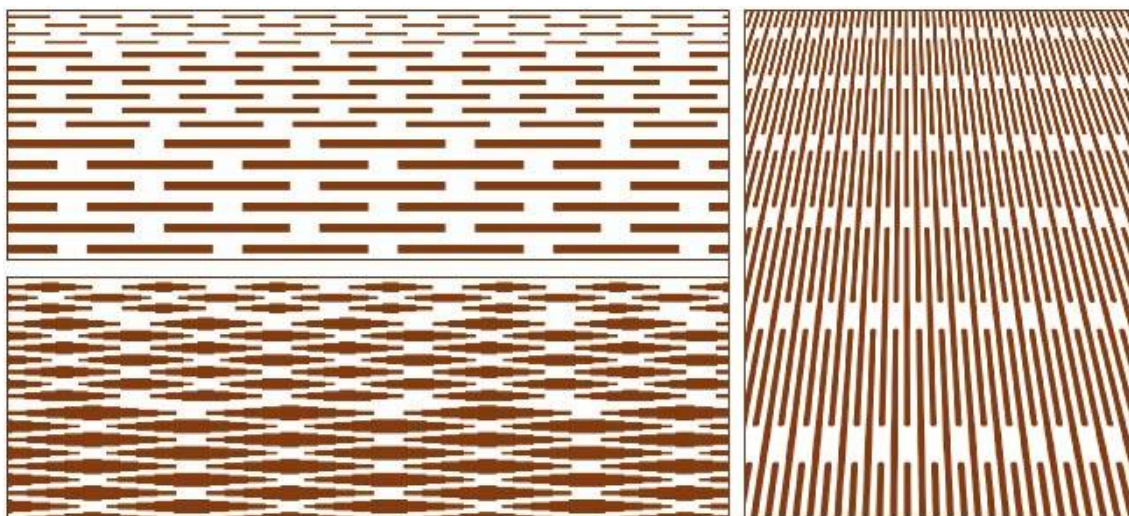


Fonte: Elaborado pelos autores.

### 6.2. Quanto à Escala

Compreende a constante entre qualquer grandeza física que permita uma comparação. No caso do padrão, a escala compreende a relação matemática entre suas repetições.

Figura 21: Exemplos de padrões escalonados (Kerf 01: Linha reta e padrão Kerf 03: Losango).

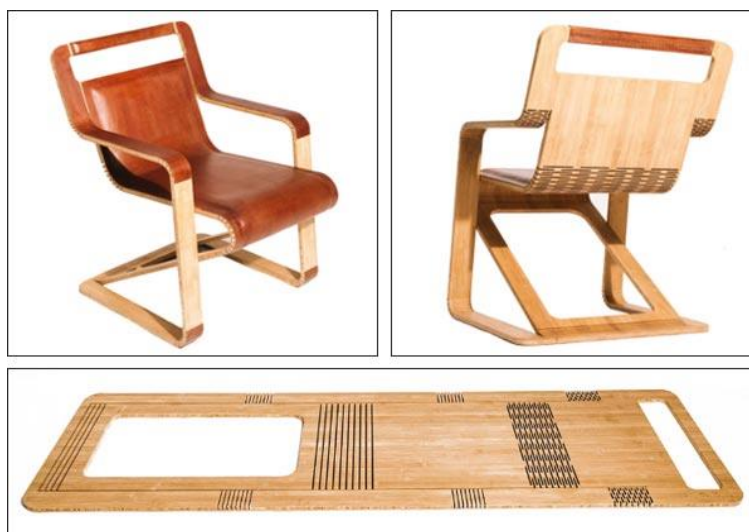


Fonte: Elaborado pelos autores.

### 6.3. Quanto a Arranjo dos Padrões

Compreende os modos de organizar os elementos de um conjunto de padrões em uma ordem específica. Eles podem ser classificados como Arranjo simples ou Arranjo com repetição. O estudo dos arranjos é fundamental para a modelagem de protótipos de mobiliário em uma única peça, permitindo assim, a redução de processos e o custo do produto final.

Figura 22: *Aviator chair* - Cadeira criada a partir de uma única chapa de compensado.  
Criação: Zev Bianchi (design Bcompact), Sydney - Austrália



Fonte: Elaborado pelos autores.

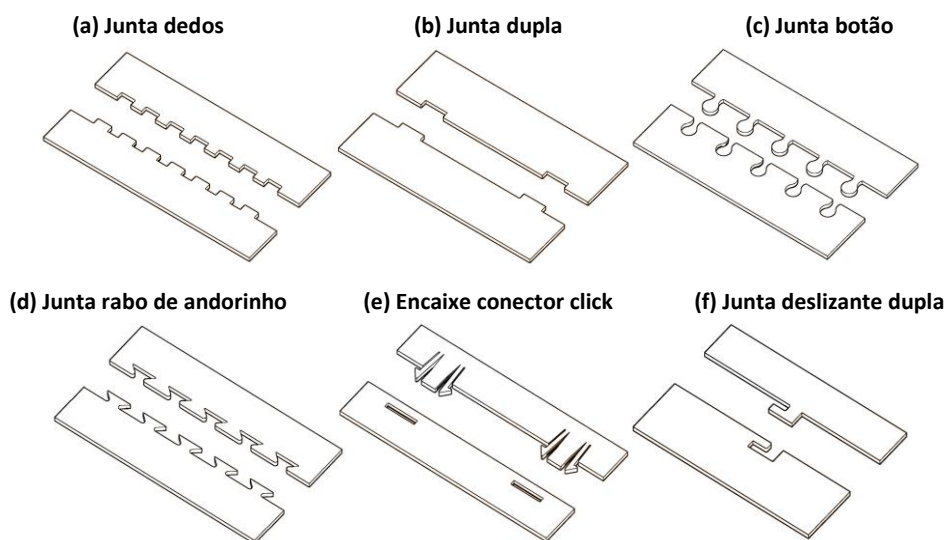
### 6.4. Juntas e Encaixes

A maioria dos trabalhos em marcenaria requerem união de peças de madeira. A montagem de uma estante, um banco ou uma mesa exige, em diversos graus, técnicas particulares, tais



como: uniões a meia-madeira, espiga e fura, dentre outras. Abaixo, destacamos aquelas técnicas que são comumente empregadas na manufatura de peças usinadas com *Laser Cutting Machine*.

**Figura 23: Juntas e encaixes usinadas com *Laser Cutting Machine***



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 7. Considerações Finais

Este artigo relata uma parte dos resultados alcançados pela pesquisa intitulada “*Kerf-bending*: estudo do design dos padrões de corte aplicados em painéis e chapas de madeira para a fabricação moveleira”, desenvolvida pelo pesquisador Dr. André Luis Marques da Silveira, professor do curso de design da Escola de Comunicação, Artes e Design (Famecos) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

A investigação foi desenvolvida em cooperação institucional entre atores das universidades PUCRS e UFRGS da área de conhecimento em Arquitetura, Urbanismo e Design. A participação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) ocorreu através do Programa de Pós-Graduação em Design, na figura do professor Dr. Vinicius Gadis Ribeiro, devido sua atuação na área de concentração interdisciplinar, especificamente, em relação aos métodos de pesquisa associados ao emprego de modelos matemáticos para simulações de fenômenos.

Para sua realização contou com a infraestrutura ofertada pelo Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (IDEIA) do Parque Científico e Tecnológico da PUCRS (Tecnopuc) e dos laboratórios da Escola Politécnica da mesma instituição, a saber: Tecnopuc FabLab (FreeZone), Laboratório de Fabricação (LABFAB) e Laboratório de Maquetes e Modelos Físicos. Os *softwares*, matéria-prima e equipamentos utilizados para a realização dos experimentos em corpos de prova foram: a) Adobe Illustrator, Autodesk Autocad e Microsoft Excel; b) Painéis de *Medium Density Fiberboard* de 3mm, 6mm e 9mm; c) *LASERCNC CMA-1080* e *LASERCNC CMA-1008-B-A*.

Os resultados alcançados com a investigação foram: 1) Proposição do método *Rapport* como alternativa para criação de padrões paramétricos de corte; 2) Categorização dos padrões

paramétricos de corte existentes; 3) Concepção de novos padrões paramétricos de corte; 4) Procedimentos matemáticos para simulação da flexão dos padrões com transpasse parcial contínuo e transpasse total de curvatura simples; 5) Planejamento, desenho e produção de corpos de prova de padrões em peças de *MDF* de 3, 6 e 9 mm para validação das simulações efetuadas; 6) Procedimentos a serem observados para a aplicação dos padrões em relação a direção, escala, arranjo, juntas e encaixes.

O prosseguimento da pesquisa envolve: a) Concepção de cálculos para a simulação da flexão para padrões com transpasse total de curvatura dupla; b) Aprimoramento da ferramenta digital criada durante a pesquisa (Calculadora) para a geração de simulações. A versão atual contempla a simulação de flexão dos padrões classificados como transpasse parcial contínuo. Ela pode ser acessada em: <http://www.um.pro.br/kerf/calculadora>; c) Desenvolvimento de modelos virtuais e protótipos em escala de mobiliário, ilustrando o emprego dos padrões paramétricos de cortes (*Kerf bending patterns*) dos tipos superfície de curvatura simples, superfície de curvatura dupla e superfície de curvatura dupla composta.

Espera-se que as informações apresentadas neste artigo possam contribuir com outros pesquisadores interessados nesta área de estudo. Para tanto, foi criado um site para divulgação do prosseguimento da investigação: <http://www.um.pro.br/kerf>

## Referências

CAPONE, Mara; LANZARA, Emanuela. *Kerf Bending: Ruled Double Curved Surfaces Manufacturing*, p. 653-660. In: XXII congresso da sociedade iberoamericana de gráfica digital 22th conference of the iberoamerican society of digital graphics. São Paulo: Blucher, 2018. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2018-1389

GÜZELCI, Orkan Zeynel; ALAÇAM, Sema; BACINOĞLU, Zeynep. *Enhancing Flexibility of 2D Planar Materials By Applying Cut Patterns For Hands On Study Models*, p. 1-6. In: XX Congresso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/despro-sigradi2016-382

LIENHARD, Julian; LA MAGNA, Riccardo; KNIPPERS, Jan. *Formfinding bending-active structures with temporary ultra-elastic contraction elements*. In: MARAS 2014. 4th International Conference on Mobile, Adaptable and Rapidly Assembled Structures, 2014. pp. 107-115. DOI 10.2495/MAR140091

LOYOLA, M.; ROZAS, S.; CALDERA, S. *Kerfing2: a technique for the design, manufacture and optimization of double-curved elements from rigid wooden plates*, p. 275-281. In: SIGraDi 2017, XXI Congresso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital. São Paulo: Blucher, 2017. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2017-044

MUÑOZ, P.; CORONEL, J. L.; SEQUEIRA, A.; MAGNASCO, I. R. *Fabricación digital y morfología: la flexibilidad en la generacion de la forma*. In: SIGraDi 2011 [Proceedings of the 15th Iberoamerican Congress of Digital Graphics] Argentina - Santa Fe 16-18 November 2011, pp. 368-371, [http://itc.scix.net/paper/sigradi2011\\_263](http://itc.scix.net/paper/sigradi2011_263)