



KERF BENDING – UM ESTUDO EXPERIMENTAL USANDO O PADRÃO DE CORTE BOWLING PIN

KERF BENDING – AN EXPERIMENTAL STUDY USING THE BOWLING PIN PATTERN

OIZUNI, Amanda Sayuri¹,
CHENG, Liang-Yee²,
LIMA, Talita Silva de³,
COÊLHO, Laís Leme⁴,
FERREIRA, Sérgio Leal⁵.

Resumo

A técnica de *kerf bending* consiste em aumentar a flexibilidade de um material rígido através da inserção de uma série de cortes em sua superfície. É uma forma bastante simples, relativamente rápida e barata de se curvar uma chapa rígida. Um parâmetro importante relacionado à flexibilidade da estrutura resultante de cortes e de fácil modificação é o espaçamento dos padrões de corte. Este está intimamente relacionado ao menor raio da curva resultante da flexão da estrutura cortada, e um parâmetro importante para projeto otimizado de superfícies curvas fixas criadas usando a técnica. Visando a aplicação de *kerf bending* na disciplina de modelagem e prototipagem, raios mínimos em função do espaçamento de corte considerando diversos padrões de corte e espessura de chapa de MDF foram obtidos e um procedimento simples é apresentado para ilustrar como uma solução integrada de projeto e fabricação pode ser alcançada de forma racional, evitando o processo de tentativa e erro. Neste trabalho focamos no padrão de corte Bowling Pin, que se caracteriza pela elevada flexibilidade e superfície vazada. Exemplos de aplicações, uma luminária e uma espreguiçadeira em escala reduzida, também são apresentadas.

Palavras-chave: *kerf bending*; parâmetros; raios; Bowling Pin.

Abstract

Kerf bending is a technique that increases the flexibility of a rigid material through a series of cut on its surface. It is a very simple, relatively fast and affordable way of bending a rigid panel. The spacing between the cuts is an important and easily modifiable parameter. It is intimately related to the resulting minimum bending curve of the kerfed structure, and an important parameter for optimal design of fixed curved surfaces created using the technique. Aiming the application of kerf bending in the subject of modelling and prototyping, minimum bending radii as a function of cutting spacings considering several cutting patterns and MDF panel thickness were obtained, and a simple procedure is presented to illustrate how an integrated solution for

¹ Escola Politécnica da USP, ORCID: 0009-0006-1251-8773, amandasayuri@usp.br

² Escola Politécnica da USP, ORCID: 0000-0003-1719-7463, cheng.yee@usp.br

³ Escola Politécnica da USP, ORCID: 0009-0001-0031-0282, talitasilvadelima@usp.br

⁴ Escola Politécnica da USP, ORCID: 0009-0002-1456-3448, laisleme@usp.br

⁵ Escola Politécnica da USP, ORCID: 0000-0003-2593-3424, sergio.leal@usp.br

design and fabrication can be achieved rationally avoiding trial and error. In this work we focused on the Bowling Pin cutting pattern, which is characterized by high flexibility and hollow surface. Two examples of applications, a lampshade and a sun lounger in reduced scale, are also represented.

Keywords: Kerf bending; parameters; radius; Bowling Pin.

1 Introdução

A técnica de *kerf bending* tem por objetivo curvar materiais rígidos através de uma série de cortes padronizados que deixam o material mais flexível. Sua aplicação vai desde funcionalidade estética, como no design de móveis e instrumentos musicais, até usos na construção civil e arquitetura. É considerado o método mais simples, rápido e barato para encurvar materiais rígidos, quando comparado a outros como laminação ou vacuum forming.

Como exemplos de uso da técnica de *kerf bending*, podemos citar os produtos da empresa Dukta (dukta.com), que desenvolveu painéis e sistemas acústicos capazes de absorver som, paredes divisórias de ambientes (biombos), luminárias, móveis e elementos decorativos gerados por meio da aplicação da técnica.

A flexibilidade da estrutura resultante do corte no *kerf bending* é determinada por uma série de fatores, sendo estes principalmente:

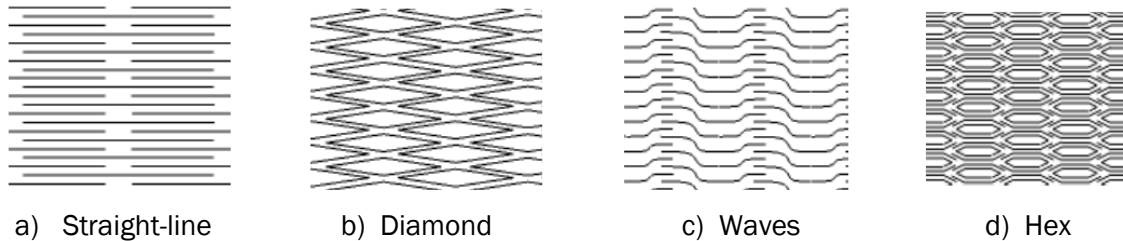
- o tipo do material;
- as características do material;
- a profundidade dos cortes;
- a geometria dos cortes;
- o espaçamento entre os cortes;
- a distribuição e direção dos cortes na chapa do material.

A geometria do padrão do corte é determinante para a forma final de curvatura que o material vai assumir. Certos padrões de corte produzem superfícies de curvatura simples (em torno de um único eixo), como estudado em Schindler (2008) e Menges (2011), e apresentado na Figura 1, e outros permitem gerar superfícies de dupla curvatura, como em Capone e Lanzara (2018) e Lanzara e Capone (2019), e apresentado na Figura 2. A técnica é extremamente adequada aos processos de fabricação digital como corte laser e fresadoras CNC, que são capazes de criar cortes de geometrias complexas de forma simples e preciso.

Quanto menor o espaçamento entre os cortes, maior a quantidade de material retirada e menos rígido fica o painel, consequentemente permitindo criar uma curva de flexão com menor raio. A distribuição dos cortes pode ser feita de maneira uniforme em toda

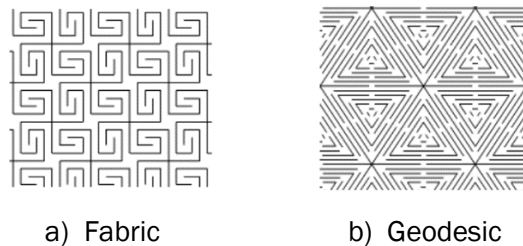
superfície, o que produz um painel inteiramente flexível, ou de maneira otimizada (Capone e Lanzara, 2018), aplicando os cortes apenas nos lugares onde são necessárias encurvar o painel, minimizando assim a quantidade de cortes e o tempo de fabricação.

Figura 1 – Padrões de corte para curvatura simples



Fonte: OBRARY. Living Hinge Swatches. (Disponível em: <https://obrary.com/products/living-hinge-patterns>)

Figura 2 – Padrões de corte para dupla curvatura



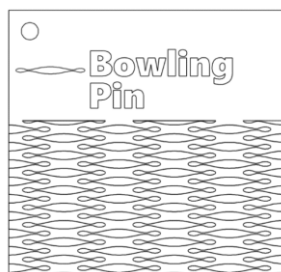
Fonte: OBRARY. Living Hinge Swatches. (Disponível em: <https://obrary.com/products/living-hinge-patterns>)

Variar o espaçamento entre os cortes é uma maneira simples de se alterar a flexibilidade do painel e, com isso, alterar a curvatura resultante da estrutura. Uma vez definido o material e espessura do painel e escolhido o padrão de corte adequado para a aplicação, a diminuição do espaçamento entre os cortes é o principal meio utilizado para aumentar a flexibilidade do painel e reduzir o raio mínimo da curva de flexão. Considerando a distribuição otimizada, com menor inserção de cortes para atingir um determinado raio de curvatura, a relação entre o raio mínimo e o espaçamento entre os cortes é um parâmetro relevante para projeto de superfícies curvas fixas. Diferentemente das superfícies curvas deformáveis, o valor da elasticidade ou as condições de carregamento geralmente não são informações tão relevantes para superfícies curvas fixas.

Este trabalho visa a aplicação de *kerf bending* na disciplina PCC3102 - Aplicação de Modelagem e Prototipagem em Projeto de Engenharia, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Trata-se de uma disciplina optativa que adota Project-based Learning (PBL), seguindo as abordagens descritas em Cheng., Correa e Motzuki (2020) e Cheng, Ferreira e Santos (2022) e com os alunos desenvolvendo projetos de

tema livre em grupo ou individualmente. Para isso, as relações entre raio mínimo e espaçamento de corte considerando diversos padrões de corte e espessura de chapa de MDF foram obtidos experimentalmente para prover aos alunos dados para projeto de superfícies curvas fixas. Além disso, um fluxo de trabalho simples também é apresentado para ilustrar como uma solução integrada de projeto e fabricação pode ser alcançada de forma racional, evitando ao máximo o processo de tentativa e erro (Cheng, Ferreira e Pereira, 2024). Especificamente neste trabalho focamos no padrão de corte Bowling Pin, disponível em obrary.com e apresentado na Figura 3, e que se caracteriza pela sua elevada flexibilidade e estrutura vazada. E como exemplos de aplicação que servem de referência para os trabalhos dos alunos, duas aplicações feitas pelos alunos monitores da disciplina, uma luminária e uma espreguiçadeira em escala reduzida, também são apresentadas.

Figura 3 – Padrão de corte Bowling Pin



Fonte: OBRARY. Living Hinge Swatches. (Disponível em: <https://obrary.com/products/living-hinge-patterns>)

2 Revisão bibliográfica

Kerf bending é um método utilizado para tornar uma superfície plana e rígida seja flexível o suficiente para assumir uma forma de curva bi ou tridimensional (Lorenzoni e Da Silva, 2021). Esta técnica é importante para casos em que são necessárias propriedades “contraditórias” do material simultaneamente, como flexibilidade e rigidez (Borhani e Kalantar, 2017). Possui como principais vantagens a possibilidade de se aplicar esta técnica em diversos tipos de material (Gürsoy e Özkar, 2015), criando superfícies curvas de maneira relativamente simples e pouco custosa quando comparada a outras formas de se conformar materiais rígidos, além da facilidade de armazenamento e transporte das estruturas resultantes do *kerf bending* em sua forma plana (Mansoori et al., 2019).

A técnica de *kerf bending* passou a ser mais amplamente utilizada após os estudos da empresa Dukta, em 2007, que investigou diversos padrões de corte e inovou com novos produtos e aplicações. Desde então, o *kerf bending* vem sendo utilizado na criação de diversas estruturas de curvas e formas complexas (Muñoz e Sequeira, 2009). Seu estudo vem sendo também vinculado a diversas outras tecnologias emergentes atualmente, como o uso de escaneamento 3D para dar suporte ao design, fabricação e análise (Lorenzoni e

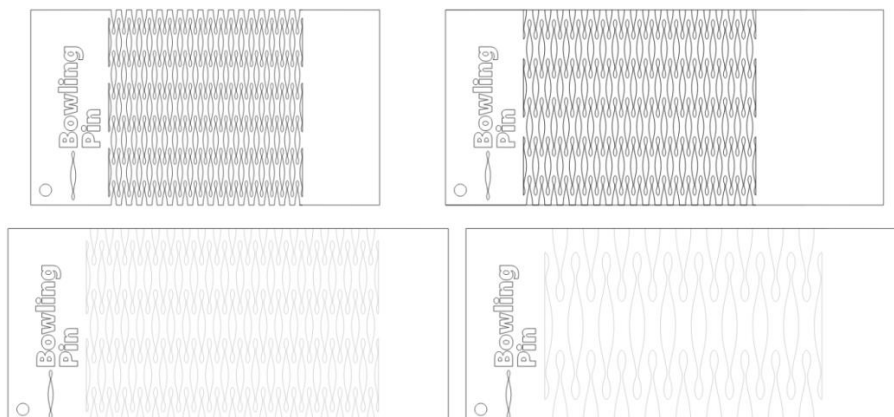
Da Silva, 2022), e o uso do método de elementos finitos para investigar o comportamento mecânico e prever o desempenho da superfície criada através do *kerf bending* (Zhang et al., 2023). Adicionalmente, o modelo de elemento de vigas (Beam Element Model) foi desenvolvido por Chen et al. (2020) para este propósito.

3 Estudo experimental

Neste trabalho focamos na determinação da relação entre espaçamento dos cortes e raio de curvatura mínimo da superfície resultante do padrão Bowling Pin. Para isso, foram executados cortes com quatro diferentes espaçamentos em chapas de MDF de 3 e 6 milímetros. Isto porque este é o principal material disponível no Laboratório Didático de Prototipagem (LDP), que dá suporte ao desenvolvimento dos projetos e protótipos dos alunos da disciplina PCC3102. Devido à dificuldade de se controlar a profundidade dos cortes a laser, para este estudo foram considerados apenas cortes passantes.

Os padrões foram executados com espaçamentos de 5,50 mm, 6,60 mm, 8,25 mm e 16,5 mm, mostrados na Figura 4. Isso em chapas de MDF de 3 mm e 6 mm, resulta em oito corpos de prova de mesma largura e comprimentos de 100 mm, 120 mm, 150 mm e 300 mm. A medição do raio mínimo da curva foi realizada flexionando primeiro a chapa até que as duas extremidades sem cortes fiquem paralelas (flexão de 180°). Depois disso, a distância entre as extremidades é diminuída gradualmente enquanto mantida o paralelismo, de modo a se obter o raio mínimo, i.e., menor raio da flexão sem danificar a estrutura cortada ou até esta travar. Diferentemente ao método descrito no Lorenzoni e Da Silva (2022), neste trabalho o eixo de flexão do corpo de prova é posicionado perpendicularmente ao plano horizontal, de modo a eliminar a influência da gravidade.

Figura 4 – Corpos de prova para medição dos raios mínimos

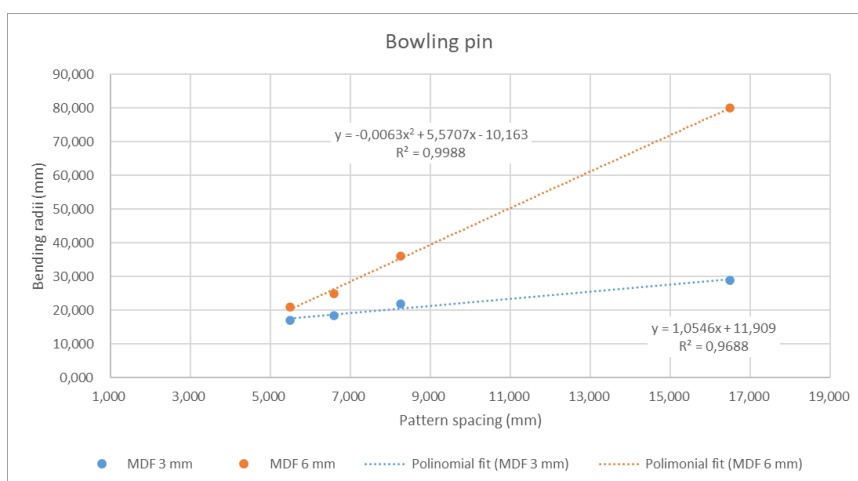


Fonte: Autores

Foram adotados dois métodos para determinar o raio mínimo:

- Com a estrutura flexionada em seu raio mínimo, são medidas as distâncias entre um extremo do corpo de prova e o outro (que estão paralelos), que correspondem aos valores do diâmetro mínimo.
- Na mesma situação, são traçadas as curvas interna e externa da estrutura no plano horizontal em que esta está apoiada, e determinar graficamente o centro e o raio do arco.

Figura 5 – Raio mínimo de flexão medido para o padrão Bowling Pin como uma função da espessura do MDF e do espaçamento do padrão



Fonte: Autores

Para alguns corpos de prova de maior espessura (6mm) e maior espaçamento, sua rigidez não permite que estes sejam flexionados até que seus extremos fiquem paralelos. Assim, para estes casos, os raios mínimos são obtidos graficamente com o corpo de prova em sua máxima flexão sem danificar a estrutura.

Os raios mínimos do padrão Bowling pin obtidos experimentalmente conforme a metodologia descrita anteriormente foram plotadas na Figura 5.

Na Figura 5, os resultados obtidos para chapas de madeira MDF de 3 e 6 milímetros são representados em cores laranja e azul, respectivamente. No eixo horizontal são apresentados os valores do espaçamento entre os padrões de cortes repetidos. No eixo vertical são apresentados os raios mínimos de flexão, obtidos experimentalmente. Os pontos são os resultados experimentais, e as linhas pontilhadas são curvas obtidas de regressão polinomial.

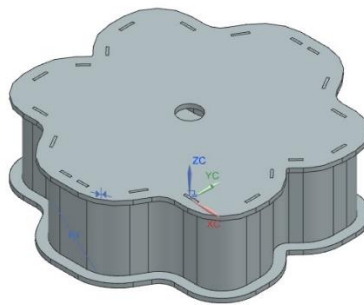
Os resultados obtidos mostram que dentro das faixas dos parâmetros de *kerf bending* considerados neste trabalho, as relações entre espaçamento e raio mínimo são praticamente lineares.

4 Aplicações

4.1 Luminária

O objetivo desta seção é exemplificar como os resultados obtidos experimentalmente podem ser aplicados no projeto de uma luminária, cuja lateral de superfície curva e vazada, é criada utilizando a técnica de *kerf bending*. Figura 6. mostra a vista em perspectiva do modelo computacional da luminária. No projeto a superfície lateral é dividida em duas partes iguais e a base e a tampa são planas.

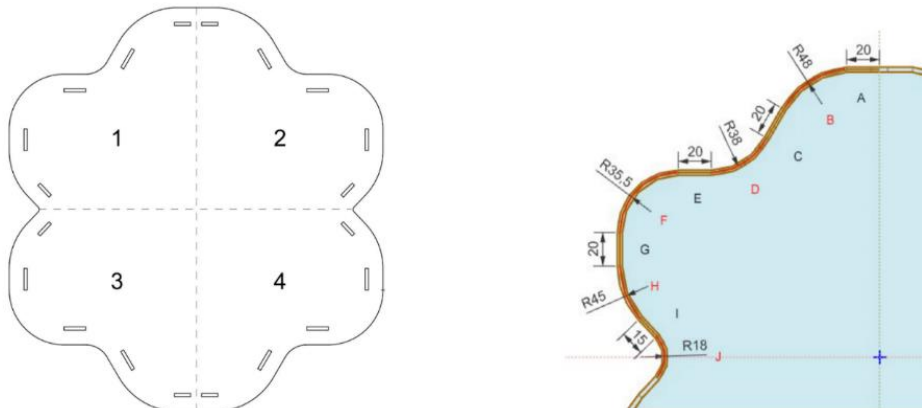
Figura 6 – Modelo CAD da luminária



Fonte: Autores

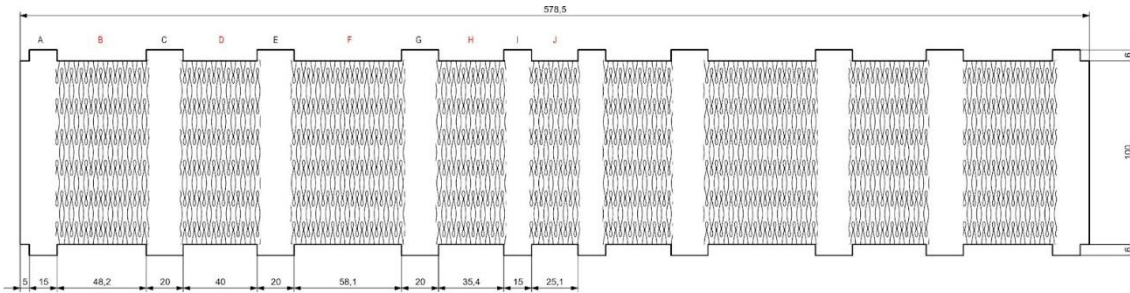
Seu conceito é relativamente simples e consiste em aplicar *kerf bending* em um painel de MDF com espessura de 3mm para formar a lateral da luminária, encaixadas na base e tampa planas, também de MDF com espessura de 6mm. Figura 7 mostra o formato simétrico do modelo as medidas dos raios de curvatura. Usando o gráfico da Figuras 5, foram determinadas as dimensões básicas do modelo e os diferentes raios utilizados.

Figura 7 – Áreas de simetria da luminária e raios de curvatura



Fonte: Autores

Figura 8 – Lateral da luminária



Fonte: Autores

Figura 8 mostra o desenho utilizado para o corte a laser da lateral. Por conta da simetria, são 10 regiões, de A a J. Cada uma das duas superfícies curvas laterais soma 578.5 mm de comprimento e 112 mm de altura. Nas regiões B, D, F, H e J é utilizada a técnica de *kerf bending* para atingir os raios de curvatura desejados, que são respectivamente, 48 mm, 38 mm, 35.5 mm, 45 mm e 18 mm. Também é possível verificar a extensão dessas regiões que são 48.2 mm, 40 mm, 58.1 mm, 35.4 mm e 25.1 mm respectivamente.

Figura 9 – Lateral da luminária



Fonte: Autores

Figura 10 – Lateral da luminária



Fonte: Autores

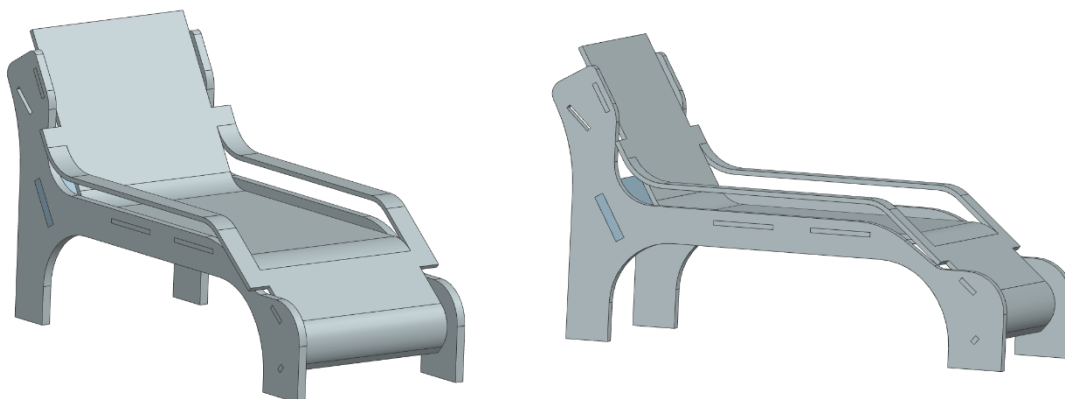
Figura 9 mostra as quatro peças cortadas a laser do modelo da luminária, juntamente com a lâmpada utilizada e Figura 10 apresenta o protótipo finalizado. O padrão utilizado ao

longo de toda a lateral foi o Bowling Pin, que além de alcançar os raios desejados, possui abertura para a passagem de luz da luminária.

4.2 Espreguiçadeira

A segunda aplicação é o modelo de uma espreguiçadeira em escala reduzida. Para isto, foi feita primeiramente a concepção do projeto num *software* CAD, sendo especificados os raios de curvatura utilizados para o modelo. A espreguiçadeira é composta por quatro partes separadas: a chapa de MFD que será curvada utilizando o *kerf bending*, de 3 milímetros de espessura; duas peças laterais que fixam as partes retas da chapa curvada, mantendo seu raio de curvatura, com 6 milímetros de espessura; e uma peça central de apoio que fixa a distância entre as duas peças laterais, também de 6 milímetros de espessura. O modelo em CAD está apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Modelo em CAD da espreguiçadeira

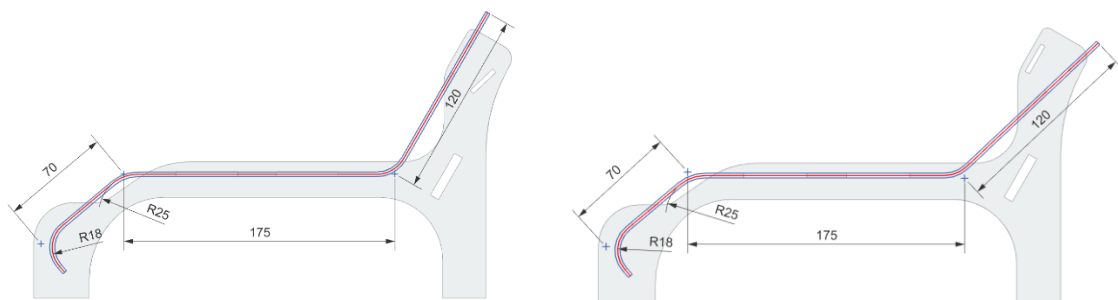


Fonte: Autores

A partir deste modelo, foram geradas as chapas para corte das peças planas. A peça curva foi planificada, e os espaçamentos entre os cortes foram calculados com base nos raios das curvaturas da espreguiçadeira (17, 20 e 25 milímetros de raios), apresentados abaixo na Figura 12. Adicionalmente, os dois encaixes possíveis do encosto da espreguiçadeira possibilitam duas inclinações diferentes. A chapa para corte da peça curva é apresentada na Figura 13. Para os braços da espreguiçadeira, devido a sua largura, não foi possível utilizar o padrão do Bowling Pin. Por isso, foi utilizado o padrão de corte Straight Line, já investigado pelos autores em outro trabalho (Cheng, Ferreira e Pereira, 2024).

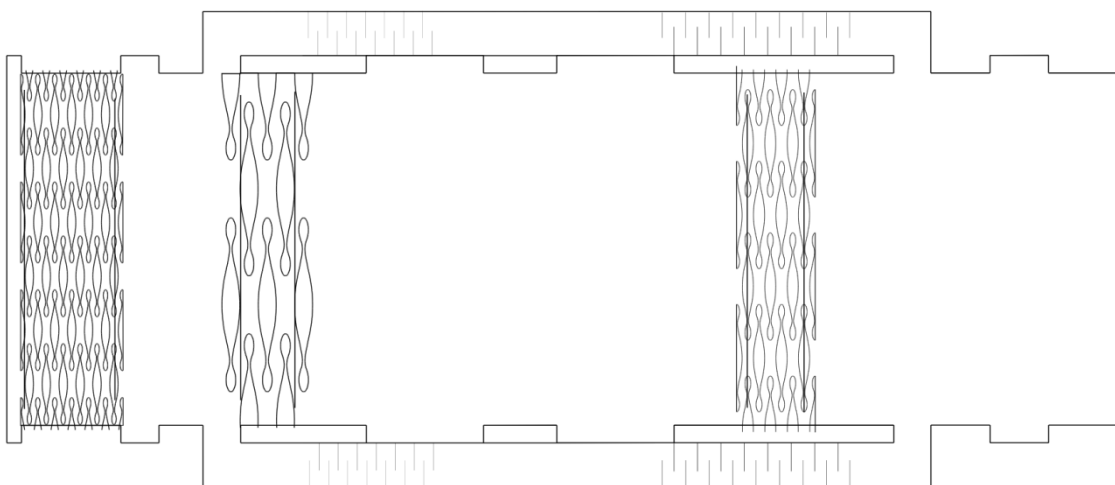
Assim, o modelo finalizado é apresentado na Figura 14. Pode-se concluir, portanto, que a correlação quantitativa obtida caracteriza bem a relação entre espaçamento e raio de curvatura da superfície resultante.

Figura 12 – Detalhe da curvatura da peça central da espreguiçadeira



Fonte: Autores

Figura 13 – Chapa para corte da peça central curva da espreguiçadeira



Fonte: Autores

Figura 14 – Peças da espreguiçadeira e modelo finalizado



Fonte: Autores

5 Conclusão

Kerf bending é uma técnica bastante eficiente e relativamente barata para transformar uma chapa rígida em um painel flexível. Neste trabalho, visando prover dados para alunos fazerem projeto otimizado das superfícies curvas fixas criadas com a técnica, as relações entre raio mínimo de flexão e espaçamento entre os cortes foram medidas experimentalmente considerando chapas de MDF de 3 e 6 milímetros e utilizando o padrão de corte Bowling Pin. Os resultados mostram uma relação essencialmente linear. As relações obtidas são aplicadas no projeto de 2 dispositivos adotando-se um procedimento relativamente simples, mas racional de projeto otimizado, que minimiza o número de cortes. Os protótipos confirmaram a relevância das relações obtidas e a efetividade do procedimento. Estudos futuros buscarão estender o processo feito neste trabalho para outros padrões de geometria de corte, outros materiais e espessuras, além da extensão para geometrias mais complexas.

Colaboradores

Amanda Sayuri Oizuni: Redação, medição experimental, projeto e prototipagem.

Liang-Yee Cheng: Concepção, redação, revisão e orientação.

Talita Silva de Lima: Projeto e prototipagem.

Laís Leme Coêlho: Redação, revisão.

Sérgio Leal Ferreira: Concepção, revisão.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa Unificado de Bolsas (PUB) da Universidade de São Paulo pelo suporte financeiro com a bolsa da vertente ensino da autora Talita Silva de Lima, vinculada ao projeto intitulado Apoio às disciplinas de Modelagem Computacional e Prototipagem na Engenharia Civil (edital 2023).

Referências

- BORHANI, Alireza; KALANTAR, Negar. **Transformative formworks: towards mass customization of double-curved surfaces**. Proceedings of the Shape Modeling International, Berkeley, CA, USA, p. 21-23, 2017.
- CAPONE, Mara; LANZARA, Emanuela. **Kerf bending: Ruled double curved surfaces manufacturing**. In: Proceedings of the 22th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, São Carlos, Brazil. 2018. p. 7-9.
- Architecture. Springer International Publishing, 2019. p. 1117-1130.
- CHEN, Renzhe; TURMAN, Coby; JIANG, Mingliang; KALANTAR, Negar; MORENO, Michael; MULIANA, Anastasia. **Mechanics of kerf patterns for creating freeform structures**. Acta Mechanica, 231(9), 3499–3524. 2020.

CHENG, Liang-Yee; CORREA, Fabiano Rogério; MOTEZUKI, Fabio Kenji. **An experience on short course of computational geometric modeling in engineering design for high school students.** In: In: ICGG 2020 — Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 639-650.

CHENG, Liang-Yee; FERREIRA, Sérgio Leal; SANTOS, Eduardo Toledo. **A project-based learning (PBL) approach in an engineering design graphics course.** In: In: ICGG 2022 — Proceedings of the 20st International Conference on Geometry and Graphics. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 891-903.

CHENG, Liang-Yee; FERREIRA, Sérgio Leal; PEREIRA, Lucas Soares. **Kerf bending – an experimental study on the design parameters.** In: ICGG 2024 — Proceedings of the 21st International Conference on Geometry and Graphics. Cham: Springer International Publishing, 2024.

GÜRSOY, Benay; ÖZKAR, Mine. **Visualizing making: Shapes, materials, and actions.** *Design Studies*, v. 41, p. 29-50, 2015.

LANZARA, Emanuela; CAPONE, Mara. **Kerf-Bending Tests: Design for Manufacturing Doubly Ruled Surfaces.** In: *Graphic Imprints: The Influence of Representation and Ideation Tools in* LORENZONI, Barbara Ruschel; DA SILVA, Fabio Pinto. **Bending techniques for flat materials using cut patterns: A review.** *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, v. 7, n. 2, p. 091-102, 2021.

MANSOORI, Maryam; KALANTAR, Negar; CREASY, Terry; RYBKOWSKI Zofia. **Adaptive Wooden Architecture: Designing a Wood Composite with Shape-Memory Behavior.** In: Bianconi F and Filippucci M, eds. *Digital Wood Design. Lecture Notes in Civil Engineering* 24. Springer, Cham; 2019. 703-717.

MENGES, Achim. **Integrative design computation: Integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions.** In: *Proceedings of the 31th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, Banff (Alberta). 2011. p. 72-81.

MUÑOZ, Patricia; Sequeira; Analía. **La morfología en el contexto de las tecnologías de fabricación digital.** VII Congreso Nacional y IV Internacional de SEMA - Sociedad de Estudios Morfológicos de La Argentina, 2009.

SCHINDLER, Christoph. **A Computer-Aided Fabrication Method for Bending Panels without Molds.** *architecture 'in computro'integr*, p. 775, 2008.

ZHANG, Wenjiao; NEVILLE, Robin; ZHANG, Dayi; YUAN, Jie; SCARPA, Fabrizio; Lakes, Roderic. **Bending of kerf chiral fractal lattice metamaterials.** *Composite Structures*, 318, (2023) 117068.