

TRANS VERSO

04 **Fabricação digital de modelos e protótipos: elementos de conexão para peças planas e cilíndricas**

recebido em 26/08/2024
aprovado em 26/09/2024

Fabricação digital de modelos e protótipos: elementos de conexão para peças planas e cilíndricas

Lívia Brito da Cruz

livia.brito@usp.br
Universidade de São Paulo

Tomás Queiroz Ferreira Barata

barata@usp.br
Universidade de São Paulo

Camilla Martins Freire

camilla_martins@usp.br
Universidade de São Paulo

Cyntia Santos Malaguti de Sousa

cyntiamalaguti@usp.br
Universidade de São Paulo

Mariana Rodrigues Rizzi

marodriguesrizzi@usp.br
Universidade de São Paulo

RESUMO (PT): A fabricação digital tem se tornado cada vez mais presente no dia a dia das pessoas, impulsionada pela compatibilização com os softwares de desenho técnico e modelagem 3D. O presente artigo foi elaborado com o objetivo de investigar a utilização de processos de fabricação digital com tecnologias aditivas na produção de modelos e protótipos de elementos de conexão para peças planas e cilíndricas, visando o seu uso em mobiliários, objetos decorativos e estruturas arquitetônicas leves. Os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa exploram tecnologias de manufatura digital, softwares de modelagem paramétrica e processos convencionais de marcenaria para a produção experimental de elementos de conexão geométricos e orgânicos, assim buscando o aproveitamento de pequenas peças, de madeira bruta, refiladas e torneadas, bambu e outros materiais compatíveis. A pesquisa busca contribuir significativamente para o entendimento das possibilidades e limitações dessas tecnologias, destacando a importância da sustentabilidade e da inovação no design de produtos.

Palavras-chave: *fabricação digital, tecnologias aditivas, prototipagem, conexões, modelagem paramétrica.*

ABSTRACT (ENG): *Digital fabrication has increasingly become part of people's daily lives, driven by compatibility with technical drawing and 3D modeling software. This article was created with the aim of investigating the use of digital fabrication processes with additive technologies in the production of models and prototypes of joints for flat and cylindrical elements, with a focus on their application in furniture, decorative objects, and lightweight architectural structures. The methodological procedures adopted in the research explore digital manufacturing technologies, parametric modeling software, and conventional woodworking processes for the experimental production of geometric and organic connection elements, thereby seeking to make use of small pieces of trimmed and turned raw wood, bamboo, and other compatible materials. The research aims to significantly contribute to the understanding of the possibilities and limitations of these technologies, highlighting the importance of sustainability and innovation in product design.*

Keywords: *digital fabrication, additive technologies, prototyping, joints, parametric modeling.*

1. Introdução

A fabricação digital passou por um grande desenvolvimento ao longo das últimas três décadas, com a modernização de equipamentos e softwares que trabalham com precisão e eficiência em escalas cada vez maiores. Estes softwares com tecnologia CAM (*Computer Aided Manufacturing*), antes desenvolvidos especificamente para controlar os processos das máquinas, passam a ser compatíveis com formatos utilizados em softwares de desenho digital e modelagem 3D (Scheeren, 2021). Com os avanços na área de representação gráfica, o modelo digital tridimensional passou a ser imbuído de todos os parâmetros necessários para a sua posterior fabricação, e com isso cria-se a possibilidade de desenvolver modelos e protótipos com alto nível de precisão dimensional, de forma rápida e precisa, estimando custo, tempo de produção e quantidade de matéria prima de forma muito mais acurada.

Com a expansão dos *Fab Labs* pelo território nacional, o acesso a máquinas CNC (*Computer Numeric Control*) e FDM ou FFF (Modelagem por Fusão e Deposição ou *Fused Filament Fabrication*), a fabricação digital passa a fazer parte de um processo de democratização da fabricação e da distribuição de produtos, possibilitando aos pequenos artesãos a criarem protótipos de seus artefatos, se tornando parte da cultura DIY (*Do it Yourself*). Além de oferecerem assistência técnica, os *Fab Labs* são espaços de compartilhamento de conhecimentos e experiências, promovendo oficinas e cursos de capacitação profissional.

Aliada a um planejamento adequado, a fabricação digital pode colaborar para o desenvolvimento sustentável, ao levar em consideração aspectos da criação, produção, comercialização, uso e descarte dos artefatos fabricados (Barros, 2011). Sendo mais adequada à produção sob demanda do que à escala industrial, ela permite um maior controle das etapas produtivas, com pouca geração de resíduo, oferecendo também a possibilidade de adequar o material às necessidades de cada projeto, prolongando a vida útil do artefato, ou tornando-o reciclável ou biodegradável (Sampaio, 2018).

Ao pensar o processo produtivo em conjunto com a sustentabilidade, despontou-se, também, a ideia de economia circular. De acordo com a entidade *Ellen MacArthur Foundation* (2021), a economia circular é baseada em três princípios orientados pelo design: eliminar resíduos e poluição, circular produtos e materiais (em seu maior valor) e regenerar a natureza. Portanto, tentando manter-se em conformidade com esses princípios, foram adotadas, para o desenvolvimento da pesquisa, as tecnologias de fabricação digital, dadas as suas altas capacidades de simulação, de personalização e de otimização de processamento.

Esta pesquisa, sendo grande parte realizada dentro do que foi o primeiro *Fab Lab* do Brasil (Scheeren, 2021), localizado no edifício anexo à FAUUSP (Faculdade de Arquitetura Urbanismo e de Design da Universidade de São Paulo), o atual STMEEC (Seção Técnica de Modelos, Ensaios e Experimentações Construtivas), demonstra um pouco do que pode ser feito com o uso de algumas das máquinas de fabricação digital presentes em um desses laboratórios, sendo elas as Impressoras 3D para peças pequenas (até 40cm x 40cm x 40cm). Tem como seus principais objetos de análise os elementos de junção de chapas e barras roliças, que, juntamente à modelagem paramétrica, podem ser usados para os mais diversos fins e escalas, como, por exemplo, objetos de decoração, mobiliário e estruturas arquitetônicas.

2. Procedimentos metodológicos

O método de pesquisa utilizado para o presente artigo pode ser demarcado por duas grandes fases, a primeira, teórica, de leitura e revisão bibliográfica e, a segunda, majoritariamente prática, de projeto e produção de modelos de conectores.

2.1 Revisão bibliográfica

Para a fase de revisão bibliográfica foram explorados principalmente os seguintes tópicos: a) desenvolvimento da fabricação digital ao longo das últimas décadas (Scheeren, 2021); b) sustentabilidade e economia circular ligadas ao processo produtivo (Barros, 2011); c) uso de softwares de modelagem ligados à fabricação digital (Sass *et al.*, 2007); d) raciocínio projetivo com auxílio de ferramentas de fabricação digitais (Scheeren, 2021); e por fim, e) estudo de conexões para peças de madeira (Jackson, 1995) (Magrisso *et al.*, 2018). Entre os textos utilizados estão outros artigos científicos, teses, dissertações e capítulos de livros que possibilitaram a compreensão dos temas e revelaram a relevância de cada um dos tópicos para justificar e fundamentar a elaboração da etapa seguinte.

2.2 Projeto, modelo e prototipagem dos elementos de conexão

Para dar início a fase de projeto foram levadas em consideração as peças menores de madeira resultantes do refinamento ou torneamento da madeira de poda urbana, para as quais foram realizados rascunhos e desenhos manuais de conexões que permitissem seu melhor aproveitamento. Posteriormente esses rascunhos foram modelados por meio de softwares como *Rhinoceros 3D* (com o seu plugin: **Grasshopper**) e o *Fusion 360*, que permitiram avaliar sua aparência, funcionalidade e possibilidade de prototipagem. Para essa avaliação produziram-se as primeiras versões dos modelos digitais na extensão stl., sobre as quais foram feitas simulações de impressão 3D, com o software *Repetier-Host*. A partir dos resultados dessas simulações efetuaram-se alterações nos modelos digitais com o propósito de otimizar o tempo de produção e reduzir o uso de matéria prima. Com as versões atualizadas foram realizadas novas simulações, para, então, partir para a última etapa, a de prototipagem, que consistiu na produção de modelos físicos com impressões 3D em filamento PLA e ABS nas escalas 1:1.

Após o processo de prototipagem, visando entender quais peças apresentaram uma melhor reprodutibilidade e custo-benefício, foram analisadas as seguintes variáveis: a) número de conexões; b) tamanho dos conectores; c) comprimento linear de filamento (com e sem pontes); d) tempo estimado de impressão; e) custo aproximado de PLA por peça. Os resultados então foram compilados em uma tabela para melhor visualização e análise.

3. Resultados

Durante o processo de produção das conexões foram realizados diversos modelos de conexões que, por sua vez, foram divididos em três grandes grupos: conexões para planos, conexões para peças cilíndricas ligadas a um eixo central e conexões para peças cilíndricas sobrepostas.

3.1 Modelos e protótipos de conexões para planos

Foram realizadas experimentações de dois tipos de conectores para chapas. O primeiro deles foi um conector de canto, que une três chapas adjacentes colocadas a um ângulo de 90° umas às outras. Sua concepção deu-se, inicialmente, com esboços, seguidos pela modelagem 3D realizada no Fusion 360, e, logo depois, optou-se por realizar a parametrização do conector, pensando em facilitar sua reprodução em diferentes tamanhos. A parametrização foi realizada no *Grasshopper*, plugin do software *Rhinceros*, e, concomitantemente a esse processo, com o objetivo de associar formas orgânicas ao conector, foi aplicada uma textura sobre o protótipo, baseada no diagrama de *Voronoi*. Por fim, foram realizadas algumas tentativas de impressão 3D da peça.

Na primeira tentativa, foi impressa uma peça de tamanho 8 x 2 cm (base x altura), entretanto, a espessura definida para a linha (1.5 mm) foi muito pequena para a saída de filamento da impressora utilizada, isso combinado a quantidade muito alta de furos (600) da textura impossibilitaram a impressão adequada da peça e deixaram-na fragilizada ao ponto de não ser possível retirar as próprias pontes (filamentos de apoio), que são geradas automaticamente. Um segundo modelo foi elaborado, ajustando a espessura da linha para 3 mm e diminuindo a quantidade de furos na textura de 600 para 130. A peça foi impressa com tamanho 10 x 2 cm (base x altura), entretanto foi possível visualizar a reincidência de um dos problemas citados. A textura do protótipo foi impressa com uma melhor definição, mas continuava frágil, impossibilitando a retirada dos filamentos de apoio. Na Figura 1, a seguir, é possível verificar cada uma das etapas de produção do protótipo.

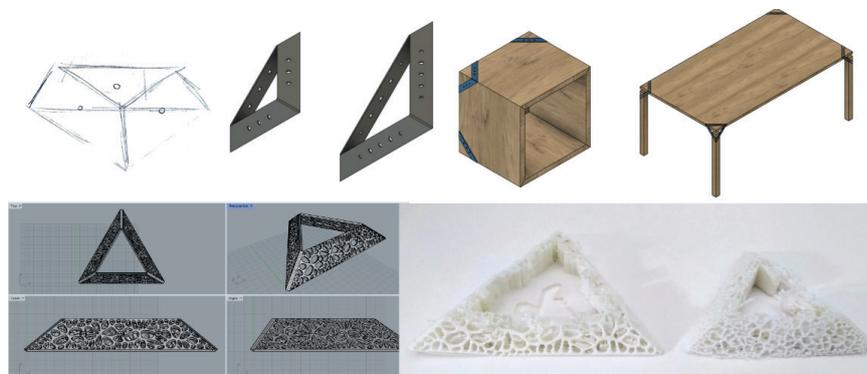


Figura 1 – Fotos dos esboços e modelos digitais e físicos do conector de canto. Fonte: elaborado pelos autores.

Constatando-se que não compensava investir mais tempo em um modelo de conexão de tão baixa resistência, deu-se início, então, à modelagem virtual de um segundo tipo de conector de chapas, denominado pelas autoras de “conector laço”. A geração do modelo ocorreu partindo dos esboços e seguindo diretamente para a modelagem paramétrica com o *Grasshopper*. Na primeira impressão as medidas escolhidas para o protótipo foram de 5 x 2 cm, com 2 mm de espessura. A primeira peça, feita com filamento PLA, foi impressa horizontalmente, ocasionando a formação de pontes. Elas foram retiradas com o auxílio de um estilete e é possível ver na peça final as rebarbas dos filamentos de apoio em uma das faces. Para a segunda impressão sugeriu-se imprimir a peça verticalmente, a fim de evitar a formação de pontes e o desperdício de filamento. Observou-se nesse caso que, além de gerar quase nenhum resíduo de filamento, o protótipo obteve um melhor acabamento.

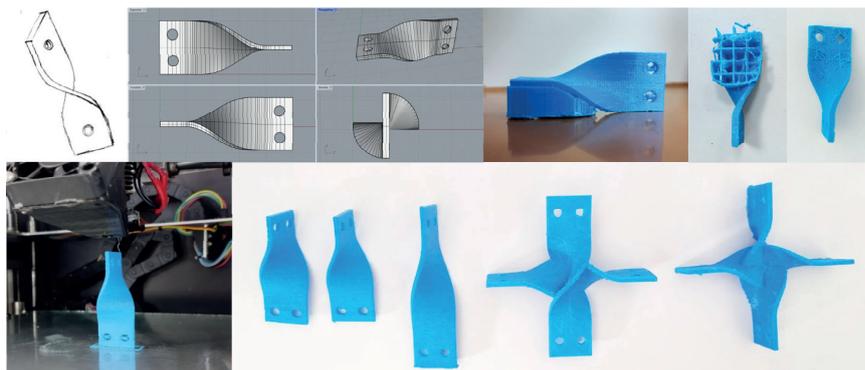


Figura 2 – Fotos dos esboços e modelos digitais e físicos dos conectores laço. Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Modelos e protótipos de conexões para peças cilíndricas ligadas a um eixo central

Em paralelo aos conectores para chapas, foram elaborados projetos de modelos de conexões para peças cilíndricas, que buscavam conectar as peças em diferentes ângulos, ligando-as a um eixo central. Dessa forma, as conexões permitiriam melhor aproveitamento de materiais como a madeira torneada e o bambu para a criação de mobiliário, decorações ou até mesmo estruturas arquitetônicas.

Após os primeiros rascunhos feitos à mão, deu-se início o processo de modelagem 3D. As primeiras tentativas partiram do SketchUp, que logo se mostrou limitado para esse tipo de trabalho. Ademais, cada teste resultava na criação de um novo modelo, prolongando desnecessariamente o tempo de modelagem. Para otimizar todo o processo, foi utilizado então o software *Rhinoceros 7*, e seu plugin *Grasshopper* para gerar modelos paramétricos.

O primeiro modelo paramétrico dessa pesquisa foi pensado, a princípio, para conectar seis peças de cerca de 25 mm de diâmetro, sendo três peças superiores e três inferiores, em ângulos regulares de 60° entre si e inclinação de 30° com o eixo vertical, conforme Figura 3. A parte superior é rotacionada em relação a inferior, permitindo o alinhamento das saídas. A peça tem como sua principal base na modelagem digital a ferramenta *multi pipe*, encontrada nas últimas versões do software, que forma tubos em torno de linhas e os conecta por meio de uma transição suave. Alterando a direção e a quantidade de linhas, portanto, pode-se alterar o modelo base.



Figura 3 – Modelo de conexão com superfície vazada. Fonte: elaborado pelos autores.

Para conferir leveza à peça e reduzir a quantidade de material utilizado, foi aplicada uma textura vazada na superfície. A primeira tentativa, porém, resultou em um modelo muito frágil e inadequado para sua posterior

impressão. Na segunda tentativa de imprimir o modelo, produziu-se uma amostra menor, para conexão de até três peças a 90° (eixos X, Y e Z), apresentada na Figura 4. Esse modelo foi feito dividindo a superfície da peça em triângulos, e buscando manter certa espessura. A peça foi impressa com sucesso, resultando em um bom acabamento, porém gerando muitas bases de apoio, revelando a importância do posicionamento adequado do modelo para a economia de material. Outro fato percebido foi a distorção das bordas, que com a nova textura produziu chanfros que reduziram em cerca de 2 mm o diâmetro interno após a impressão.

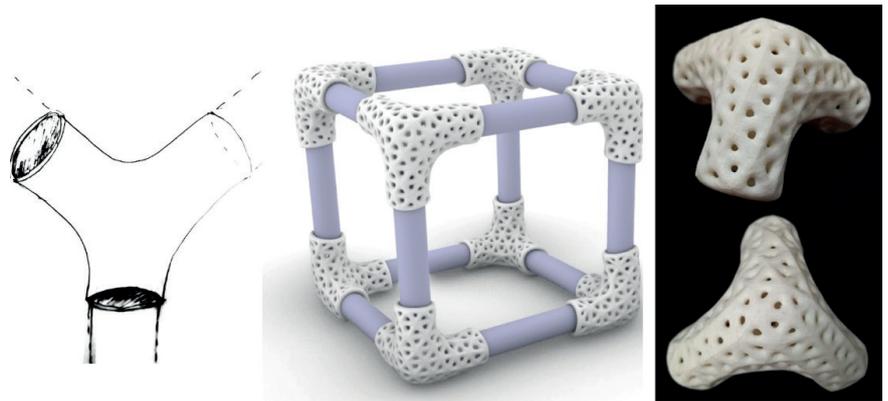


Figura 4 – Conexão para três peças cilíndricas. Rascunho, modelo digital e modelo impresso. Fonte: elaborado pelos autores.

Partindo do primeiro modelo impresso, realizou-se um segundo modelo, possibilitando o encaixe das 6 peças, agora utilizando uma textura de superfície seguindo um padrão baseado no diagrama de *Voronoi*, buscando atribuir uma aparência mais orgânica à conexão, como é possível verificar na Figura 5. Apesar do modelo ser adequado para impressão segundo as simulações, devido às especificidades da máquina, o tempo para realização do processo foi surpreendentemente longo e a quantidade de pontes criadas para a sustentação das áreas vazadas também foi enorme, o que geraria desperdício.

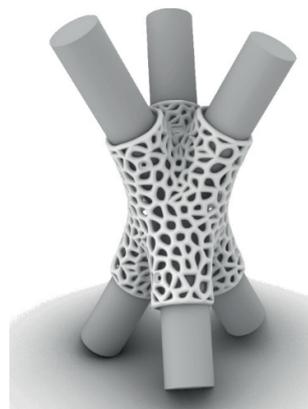


Figura 5 – Conexão com textura de superfície baseada no diagrama de Voronoi. Fonte: elaborado pelos autores.

O projeto então foi readequado e otimizado. Além de retirar a textura, novos parâmetros foram incluídos, permitindo o controle do diâmetro de cada uma das saídas da conexão. A Figura 6 ilustra os principais parâmetros do modelo.

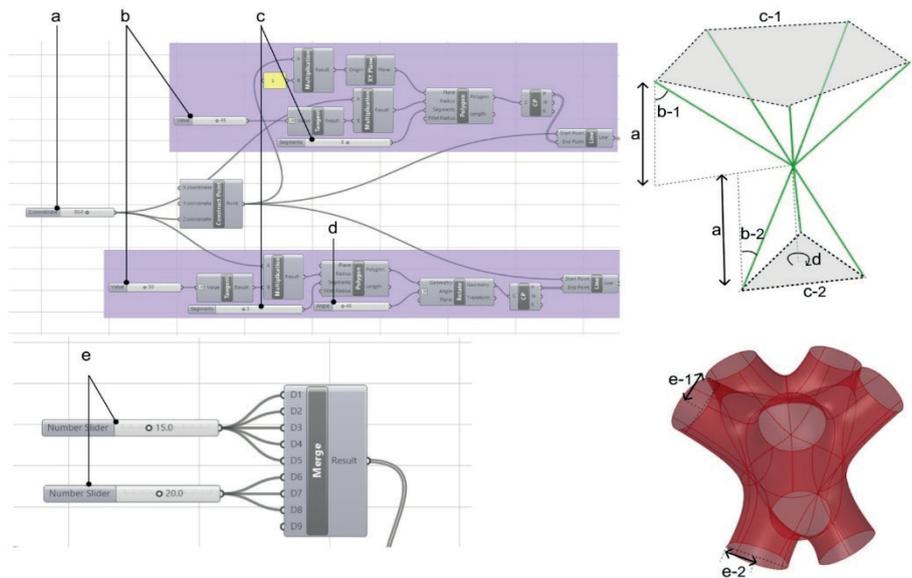


Figura 6 – Parâmetros do modelo: a) distância vertical até o eixo do modelo; b) ângulo das saídas em relação a vertical; c) número de conexões, determinado por meio do número de vértices dos polígonos regulares da base e do topo; d) Rotação das saídas em relação ao eixo; e) raio das peças a serem conectadas. Fonte: elaborado pelos autores. Fonte: elaborado pelos autores.

Sem áreas vazadas na superfície, o tempo de impressão foi reduzido, assim como o número de pontes necessárias para a impressão do modelo. A Figura 7 apresenta algumas das variações obtidas a partir do modelo.



Figura 7 – Modelos digitais e impressões 3D. Fonte: elaborado pelos autores. Fonte: elaborado pelos autores.

3.3 Modelos e protótipos de conexões para peças cilíndricas sobrepostas

Outra opção de conector para peças roliças foi projetada a partir da noção de design para desmontagem (*Design for Disassembly*) (Rios *et al.*, 2015) que permitisse um alto nível de personalização do produto final, assim como a possibilidade de montar e desmontar o objeto produzido de maneira não destrutiva. O conector exploraria eixos de movimentação paralelos e rotacionais entre duas peças cilíndricas a partir da junção de ambas em diferentes ângulos. Essa noção de movimento permitiria um range diversificado de subversões espaciais pelo usuário final.

A primeira rodada de rascunhos (*roughs*) fundamentou uma versão simples da conexão modelada no software *Fusion 360* a partir da extrusão de formas bidimensionais, método adotado pelo programa de CAD (*Computer Aided*

Design). Na primeira versão modelada, tentou-se desenvolver uma espécie de braçadeira que envolvesse o corpo de madeira torneada. Nesse caso, uma tira de material maleável envolveria um corpo projetado e criaria tensão entre o conector e a peça de madeira. Entretanto, a ideia não foi levada adiante, pois apresentava um baixo nível de detalhamento funcional. A Figura 8 mostra cada etapa de produção desse protótipo.

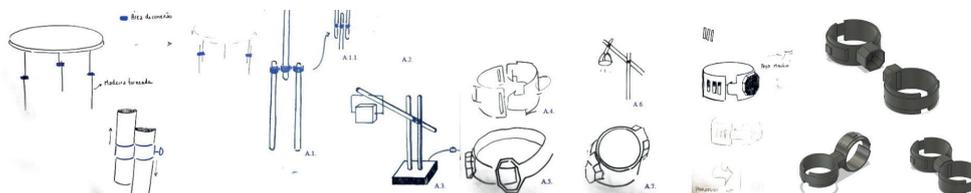


Figura 8 – Fotos dos esboços e do modelo digital do conector “braçadeira”. Fonte: elaborado pelos autores.

Ademais, observou-se que a adoção de uma peça única com as saídas fêmea e macho em extremidades opostas possibilitaria um número maior de viabilidades de montagem com um tipo único de peça. Após modelada, a versão 2 foi submetida à impressão 3D. Com uma máquina de impressão da marca Sethi 3D e filamento ABS, um protótipo de 43 milímetros de diâmetro foi impresso em cerca de 52 minutos. Na impressora de modelo S3, usada para a impressão do protótipo, a mesa é estática, o que diminui as possíveis vibrações que comprometem a qualidade do produto final.

Os protótipos da versão 2 foram impressos em duplas para que houvesse interação passível de análise crítica da conexão entre as peças. Em uma das conexões foi aberta uma fenda com o objetivo de explorar a quantidade de tensão que a peça suportaria, uma vez que ela deveria “abrir” alguns milímetros para abraçar o cilindro de madeira. Constatou-se que o ABS cumpre essa função satisfatoriamente e o material é flexível o bastante para que ceda uma abertura e posteriormente volte a sua forma original. Na Figura 9 é possível visualizar a modelagem digital e a impressão 3D do conector.

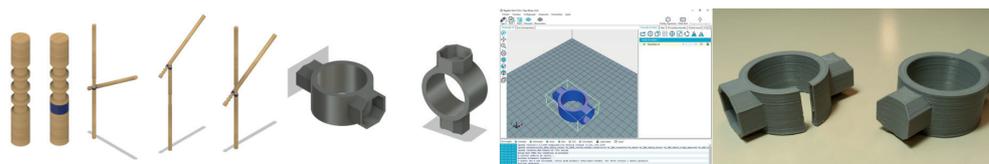


Figura 9 – Fotos do esquema de conexão e do modelo digital e físico. Fonte: elaborado pelos autores.

4. Análises dos resultados

A partir da pesquisa inicial foi constatada o quão vastas eram as possibilidades de trabalho na área de experimentações com tecnologias de fabricação digital, sendo necessária a delimitação do campo de estudo logo de início, a de criação de modelos com prototipagem. Dentro da categoria de modelagem de protótipos, foi elaborada uma pesquisa mais aprofundada na área de junções de peças e conexões. Foi necessário testar os limites das máquinas de impressão 3D e readequar os projetos digitais pelo menos duas vezes (para cada tipo de conector) em cada um dos casos. A maioria dos modelos passou por vários ajustes antes de finalmente serem impressos. A nível de exemplificação, o conector 9, da Tabela 1, precisou passar por 3 adequações no arquivo até chegar nesse modelo.

Com o tempo limitado e as máquinas apresentando inconsistências em seu funcionamento, o trabalho acabou seguindo pelo caminho da simplificação, buscando o menor tempo de produção, redução no uso de materiais, menor custo, e, conseqüentemente, os modelos foram se tornando cada vez menos elaborados conforme a pesquisa avançava. Se por um lado a aparência final foi prejudicada por esse processo, por outro, a sua capacidade de reprodutibilidade foi aumentada, permitindo maior adequação aos mais diversos tipos de projetos, em diversas escalas.

	Conectores	Número de Conexões	Tamanho dos conectores [cm]	Comprimento linear de filamento [m] (sem pontes)	Comprimento linear de filamento[m] (com pontes)	Tempo estimado de impressão	Custo PLA por peça (R\$0,75 / m)	Observações
1		3	10,2 x 8,9 x 1,9	4,25	7,2	1h02m	R\$ 5,40	Falha na impressão
2		4	7,5 x 7,5 x 2	2,17	3,57	0h29m	R\$ 2,68	Excesso de pontes
3		4	7,5 x 7,5 x 2	2,26	2,73	0h23m	R\$ 2,05	
4		2	2 x 2 x 7,5	1,13	1,13	0h32m	R\$ 0,85	
5		2	2 x 2 x 5	0,76	0,76	0h22m	R\$ 0,57	
6		6	5,8 x 5,5 x 7,3	6,04	7,17	1h58m	R\$ 5,38	Falha na impressão
7		6	7,9 x 7,4 x 10,7	11,88	12,13	2h21m	R\$ 9,10	Falha na impressão
8		3	8,6 x 9,3 x 5,5	10,59	13,73	1h56m	R\$ 10,30	Excesso de pontes
9		6	6,2 x 5,7 x 8,3	9,47	10,67	1h24m	R\$ 8,00	
10		8	8,8 x 8,8 x 8,8	19,12	24,38	3h01m	R\$ 18,29	Custo elevado
11		2	6,4 x 4,3 x 2,4	4,4	4,86	0h35m	R\$ 3,65	

Tabela 1 – Dados da simulação de impressão e custo por peça. Fonte: elaborado pelos autores.

Os dados contidos acima, acerca do comprimento de filamento e tempo estimado de impressão, foram obtidos a partir do software *Repetier-Host*, que permite a conversão dos arquivos de formato STL para o *G-code*, linguagem utilizada pelas máquinas de impressão. O custo da peça foi calculado a partir do preço de PLA observado no momento de realização da pesquisa (3D Lab, 2024). A partir da tabela percebe-se que os conectores 4 e 5 foram os que geraram menos pontes. O modelo base para os conectores 6, 7, 8, 9, e 10 é o que apresenta maior capacidade de aumento e personalização no número de conexões. Se compararmos os modelos 7 e 9, é possível notar que são modelos semelhantes, o primeiro com textura, o segundo sem textura e medidas um pouco reduzidas. As alterações pontuais realizadas levaram a uma grande redução no tempo de impressão (de 11,6 min/m de filamento para 7,9 min/m), revelando a melhor reprodutibilidade do modelo simplificado.

5. Considerações finais

Para o campo das tecnologias de fabricação digital, esta pesquisa proporcionou um maior aprofundamento nos estudos de modelagem paramétrica, uma compreensão básica sobre a operação de máquinas de impressão 3D, o contato com materiais utilizados em prototipagem de fabricação aditiva, além do aprimoramento do raciocínio projetual.

Por meio das experimentações foi notado que a qualidade dos equipamentos e das tecnologias utilizadas impactam no processo e resultado das impressões. Além disso, a quantidade de pontes geradas em cada modelo foi um fator crítico na determinação do tempo de impressão e acabamento das peças, ademais o posicionamento dos protótipos na mesa de impressão afeta diretamente a formação de pontes e, portanto, também interfere no resultado. Algumas outras questões foram observadas e merecem atenção quanto à etapa projetiva, são elas: a espessura das linhas nos modelos digitais, essas devem estar de acordo com a capacidade da impressora e possuir, no mínimo, o mesmo valor que a espessura do bico da extrusora; e o espaçamento entre linhas ou o diâmetro dos furos no modelo, que devem estar no mesmo grau de precisão da impressora, espaçamentos ou diâmetros com valores menores que aqueles processados pela máquina são involuntariamente preenchidos por filamento.

No artigo foi possível abordar apenas algumas possibilidades de conexões de peças, dois tipos para junções entre chapas e dois para junções entre barra roliças, com algumas variações em cada um deles, mas entre tudo o que foi realizado até esse momento fica claro o potencial de conectores associados à fabricação digital para aplicação no ramo de objetos decorativos, mobiliário e estruturas arquitetônicas.

Referências

BARROS, Alexandre Monteiro. **Fabricação digital**: sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental. Dissertação (Pós-Graduação em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Glossário da economia circular**. [s. l.: s. n.], 2021. 5 p. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/glossario>. Acesso em: 28 mar. 2024.

JACKSON, Albert; DAY, David. **Good Wood Joints**. HarperCollins Publishers, 1995.

MAGRISSE, S.; MIZRAHI, M.; ZORAN, A. Digital Joinery For Hybrid Carpentry. *In: Proceedings of the 2018 Chi conference on human factors in computing systems*. **Anais [...]**. Nova York: Association for Computing Machinery, 2018, p. 1–11. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173741>.

RIOS, Fernanda Cruz; CHONG, Wai K.; GRAU, David. Design for Disassembly and Deconstruction: Challenges and Opportunities. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 1296-1304, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021402>. Acesso em: 20 maio 2024.

SAMPAIO, C. P. de *et al.* **Design para a sustentabilidade**: dimensão ambiental. Curitiba: Insight, 2018. p. 124.

SASS, Lawrence; MICHAUD, Dennys; CARDOSO, Daniel. Materializing a Design with Plywood. *In: Proceedings of the 25th international conference on education and research in computer aided architectural design in Europe (eCAADe)*, 2007, Viesbade. **Anais [...]**. Bruxelas, 2007. p. 629-636. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17448047> Acesso em: 22 maio 2024.

SCHEEREN, Rodrigo. **Fabricação digital na América do Sul**: laboratórios, estratégias, processos e artefatos para o design, a arquitetura e a construção. 2021. Tese (Doutorado em Teoria e História da Arquitetura e do Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2021.

3D LAB. **Filamento PLA Speed Premium Branco**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/filamento-pla-branco/>. Acesso em: 26 maio 2024.