

# ESTUDO DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ARBÓREOS URBANOS PARA A GERAÇÃO DE PEÇAS MODULARES DE MADEIRA DA CIDADE DE SÃO PAULO<sup>1</sup>

*STUDY ON THE USE OF URBAN TREE WASTE TO GENERATE MODULAR WOODEN PARTS IN THE CITY OF SÃO PAULO*

BARATA, Tomás; Professor Doutor; Universidade de São Paulo

barata@usp.br

MELO, Felipe; Mestrando; Universidade de São Paulo

felipe.gustavo.melo@usp.br

## Resumo

Os resíduos arbóreos urbanos da cidade de São Paulo representam um grande custo de manejo, totalizando cerca de 50 mil toneladas anuais, majoritariamente destinadas aos aterros sanitários e *downcycling*. A pesquisa objetivou mitigar o problema pelo *upcycling* do material ao propor: um projeto de modelos virtuais de peças modulares com encaixes; usinagem posterior de peças-padrão para obter objetos na escala de mobiliário. O método se subdivide em: (a) revisão assistemática da bibliografia; (b) obtenção, pré-seleção, transporte e armazenamento do resíduo; (c) catalogação, medição, fotografia e pesagem; (d) plano de corte, desrama e destopo; (e) torneamento manual, desdobro com motosserra e aparelhamento; (f) concepção de modelos virtuais tridimensionais. A rota tecnológica proposta pela pesquisa resultou em seis tipos de projeto de peças modulares encaixáveis e aproveitamento médio de massa dos lotes de madeira de poda e supressão de até 33,2% (tipuana) e 31% (jambolão) no torneamento e 35,2% (tipuana) no desdobro.

**Palavras Chave:** resíduos arbóreos urbanos; economia circular; design de produto.

## Abstract

*Urban tree waste in the city of São Paulo represents a large management cost, totaling around 50 thousand tons annually, mostly destined for landfills and downcycling. The research aimed to mitigate the problem by upcycling the material by proposing: a project of virtual models of modular parts with fittings; further machining of standard parts to obtain furniture-scale objects. The method is subdivided into: (a) unsystematic review of the bibliography; (b) obtaining, pre-selection, transport and storage of waste; (c) cataloguing, measuring, photography and weighing; (d) cutting, pruning and topping plan; (e) manual lathing, breakdown with a chainsaw and edge cutting; (f) design of three-dimensional virtual models. The technological route proposed by the research resulted in six types of design of modular and average use of mass from lots of pruning wood and suppression of up to 33.2% (tipuana) and 31% (jambolão) in lathing and 35.2% (tipuana) in the breakdown.*

---

<sup>1</sup> O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*of design of modular joining parts and an average use of the mass of batches of pruning wood and suppression of up to 33.2% (tipuana) and 31% (jambolão) in lathing and 35.2% (tipuana) in the breakdown.*

**Keywords:** *urban tree waste; circular economy; product design.*

## 1. Introdução e justificativa

O ritmo intenso de expansão da malha urbana tem tornado cada vez mais latente a demanda pelo aumento da presença de arborização consistente no seu espaço-sejam em vias, parques, praças, entre outros locais privados e públicos-cujas vantagens podem ser compreendidas por benefícios para o meio ambiente, estética urbana, e em especial à saúde da população, favorecendo a resiliência das cidades em um momento de intensificação das mudanças climáticas. (Rossetti *et al.*, 2010; Klingenberg *et al.*, 2020; Sousa, 2019; 2023).

A permanência da floresta na zona urbana demanda ações de manutenção preventiva, corretiva e emergenciais constantes na forma de podas e supressões, tanto em questão da preservação da integridade física do conjunto de agentes no entorno dos indivíduos arbóreos (pessoas e animais, bens físicos móveis, imóveis e infraestrutura) como por questões ambientais (remoção de espécies invasoras) e fitossanitárias dos mesmos (presença de organismos xilófagos). Consequentemente, tais atividades de zeladoria resultam em um enorme volume de resíduos arbóreos lenhosos: um montante anual aproximado de 50 mil toneladas que, ao ser manejado e transportado, representou em 2019, um custo médio mensal estimado em R\$ 4,6 milhões de reais para a Prefeitura Municipal de São Paulo (Meira, 2010; Silva, Flora, 2019; Souza *et al.*, 2020).

A ampla diversidade de espécies plantadas na área urbana, com morfologias, dimensões e características variadas, faz com que se acumulem obstáculos e dificuldades para a atual cadeia pública de gestão arbórea e uma eventual implantação de um sistema de beneficiamento da madeira bruta e a sua devida valorização. Além disso, em razão das destinações majoritárias atuais, compreendidas por: (a) compostagem via trituração e emprego em jardins e hortas; (b) aproveitamento energético mediante incineração industrial em usinas de biomassa e de produção de cimento; (c) descarte em aterros sanitários e locais clandestinos (lixões e terrenos baldios, onde podem liberar gás metano (CH<sub>4</sub>) pelo processo de putrefação e sofrer queima, com a respectiva emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera; tais ações, cujos exercícios não abordam o potencial estratégico de valorização ambiental, social e econômica (*upcycling*) desse material, alinhado aos princípios e abrangência da economia circular, cuja definição é compreendida pelo conjunto de soluções sistêmicas voltadas para restauração e regeneração dos biomas e suas dinâmicas, restringindo os materiais aos ciclos fechados de uso e reaproveitamento, estendendo enfim, pelo máximo de tempo possível, sua funcionalidade e valor econômico, com a ressignificação

de sua categoria, inadequadamente considerada “lixo”. (Meira, 2010; Klingenberg et al., 2020; Nolasco, 2020; Souza *et al.*, 2020; Emf, 2021; Souza *et al.*, 2023). Ao se empregar tais conceitos de abordagem sistêmica do design na respectiva exploração do resíduo via beneficiamento como possível alternativa de rota tecnológica, se indagam algumas questões: de que maneira o aproveitamento de resíduos arbóreos urbanos poderia ser feito eficientemente?; como uma eventual produção de peças modulares de madeira pode contribuir tanto com a mitigação do descarte de resíduos lenhosos quanto para o favorecimento dos atores da área de transformação da madeira maciça (marceneiros, designers, artesãos, etc)?

Nesta pesquisa, houve a caracterização quantitativa e qualitativa prévia e posterior aos processos primários e secundários da madeira de poda e supressão e de suas possibilidades de uso em produtos e componentes, assim como foram investigadas e categorizadas as espécies com foco na definição de usos potenciais, que pudessem ser atendidos com proposições no âmbito do design, em sinergia com as diretrizes da economia circular. A partir da matriz de dados bibliográficos/científicos, dos resultados de ensaios, das experiências empíricas e dos dados já obtidos e compilados no decorrer da iniciativa e conseqüentemente, da exploração dos estoques de resíduos arbóreos excedentes, foram embasados e realizados: o estudo; desenvolvimento; projeto e enfim, a execução das atividades previstas para a pesquisa.

## 2. Materiais e Métodos

A pesquisa partiu de duas dimensões, a primeira, de caráter exploratório, comparativo, descritivo e experimental, e utilizou ferramentas e processos de planejamento, projeto e prática de design como: mapeamento sistêmico de operações; comunicação visual 2D e 3D; desenvolvimento de processo projetivo; análise do processo de transformação da madeira orientado para obter componentes construtivos para objetos sustentáveis. A segunda dimensão da pesquisa visou, elaborar um modelo estruturado da cadeia de beneficiamento com os recursos disponíveis na oficina da universidade, considerando a sistematização factível e robusta das etapas do processo produtivo, com fim de favorecer a reprodutibilidade do processo por terceiros e ao mesmo tempo, obter resultados nos estudos de aproveitamento da madeira de poda e supressão urbanas. O direcionamento teórico e metodológico centrais do artigo se firmaram em oposição à metodologia tradicional do desenho industrial, na qual o material é um elemento configurativo de caráter econômico, estético, estrutural ou mercadológico no projeto de um objeto de design (Löbach, 1976), ao adotar o embasamento na metodologia *Material driven design* (MDD), ou seja, do design orientado pelo material, em que o último é o ponto central no processo do projeto, e a sua perspectiva é voltada para a experiência proporcionada para os usuários e não um mero elemento secundário (Karana *et al.*, 2015). A seguir, estão descritas as divisões metodológicas da pesquisa considerando os materiais e os procedimentos metodológicos a serem utilizados para se atingir os objetivos do estudo:

### 2.1. Revisão assistemática da bibliografia

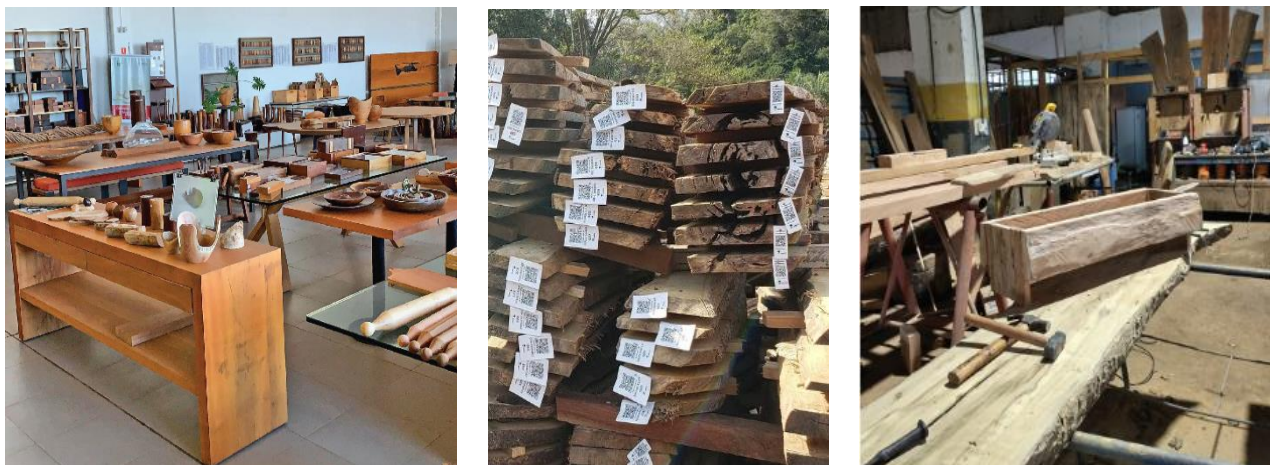
A Revisão narrativa se deu por meio de manuais técnicos, revistas científicas, livros, dissertações e teses. Nela foi possível constatar a pertinência do design para o estudo sistêmico e a mitigação de problemas complexos, mesmo externos à lógica da esfera da cadeia produtiva tradicional, dado o seu caráter conciliador no contexto de interdisciplinaridade e a sua capacidade de inovação frente aos diversos temas, como a própria questão dos resíduos arbóreos lenhosos das cidades (Kistman, 2014). A cadeia de gestão de resíduos de poda e de remoção de árvores urbanos envolve volumes e gastos pertinentes ao município de São Paulo, visto que, no ano de 2020, consumiu, por meio de sua Secretaria Municipal das Subprefeituras, mais de 88 mil operações de poda, aproximadamente 78% a mais do que no ano anterior (2019) (Prefeitura de São Paulo, 2020), de modo que o montante resultante de tais ações na cidade pode chegar a uma massa de 50 mil toneladas anuais de galhos e troncos (Souza *et al.*, 2020).

No intuito de trabalhar na sistematização, equalização e ampliação da cobertura arbórea do município de São Paulo (Sousa, 2020), se apreende que o montante imenso de resíduos resultantes da manutenção florestal urbana acompanhe de forma proporcional, tal qual sua complexidade em termos de gestão, dadas especificidades físicas do resíduo que tornam difícil seu processamento (Meira, 2010; Klingenberg *et al.*, 2020).

No Brasil há experiências públicas e privadas referenciais de aproveitamento deste resíduo, cujas iniciativas em municípios paulistas analisadas por Barata *et al.* (2021), operam em diferentes modelos de negócios e objetivos, procedimentos de fabricação, estética de produtos acabados e nichos mercadológicos, etc, e conseqüentemente, promovem o uso da matéria-prima de maneira central, do ponto de partida de vista projetivo (FIGURA 1): (a) Atelier Pedro Petry (Itu), um empreendimento que há mais de três décadas é voltado à criação de móveis e objetos de decoração de tamanhos diversos (de canetas até balcões), a partir de troncos de árvores derrubadas, explorando suas características morfológicas orgânicas em produtos de alto valor agregado; (b) Madeira Urbana (Campinas), iniciativa de um engenheiro florestal que desenvolveu um método digital de rastreabilidade da madeira por meio de leitura da etiqueta com código QR e sistema de certificação que garante a origem do resíduo aos produtores e consumidores, valorizando o produto final; (c) Serraria Ecológica (Guarulhos), unidade de beneficiamento oriunda do poder público municipal, que desenvolveu um procedimento integral de triagem e destinação de cada tipo de resíduos de madeira (folhas, galhos e troncos de diferentes dimensões e a própria serragem dos processos de usinagem) com intuito de emprega-los em objetos, mobiliário urbano público, carpintaria para a construção civil e até adubação para jardins com a serragem gerada.



Figura 1 – (a) *Showroom* do Ateliê Pedro Petry; (b) material processado e catalogado com sistema Madeira Urbana; (c) Serraria Ecológica de Guarulhos.



Fonte: adaptado de autores, site Madeira Urbana e Cyntia Malaguti (2021)

Após verificar as experiências de gestão da cadeia produtiva de resíduos arbóreos urbanos, tais quais, de produção de peças padronizadas (tábuas, vigas, etc) e a existência de alguns designers que utilizam o material para a produção autoral de objetos, no entanto, não foi encontrada uma experiência documentada de diretriz semelhante a deste projeto, que é a de desenvolvimento de peças modulares, parametrizadas de acordo com a norma NBR14807-peças de madeira serradas, que as define pelo tamanho e formato padrão de perfil (Tabela 1) para o emprego em projetos de sistemas construtivos de edificações e na produção de mobiliário interno e externo (Zenid, 2009), tal como a sua caracterização e padronização presentes neste artigo, indicam seu potencial de inovação na área.

Tabela 1 – Dimensões das peças de madeira serrada.

Nome da peça	Espessura	Largura
Pranchão	De 71 a 161	161 e acima
Prancha	De 39 a 70	161 e acima
Pranchinha	38	100 e acima
Viga	De 40 a 80	De 81 a 160
Caibro	De 40 a 80	De 50 a 80
Tábua	De 10 a 37	100 e acima
Sarrafo	De 21 a 39	De 20 a 99
Ripa	De 10 a 20	De 20 a 50
Ripão	De 15 a 20	De 51 a 70
Pontalete	De 70 a 80	De 70 a 80
Quadrado	25	25

Lado: 100 e acima

Dimensões em milímetros

Fonte: adaptado de Associação brasileira de normas técnicas (ABNT). NBR 14807/2002: peças de madeira serrada: dimensões. Rio de Janeiro, 2002.

Neste projeto, ao promover a transformação industrial de pequena escala da madeira de poda e supressão urbanas para a confecção de peças destinadas então posteriormente para a fabricação de objetos de design e artesanato, por exemplo, se emprega o conceito de *upcycling*, termo compreendido pela estratégia de valorização de um material residual indesejado, convertendo-o em um objeto de maior utilidade e valor em vários âmbitos: ambiental, social, econômico, tecnológico, etc em vez de se conduzir os resíduos para as rotas de transformação comuns ao rebaixa-los para a geração de produtos de menor complexidade e duração, o ato compreendido na literatura como *downcycling* é expresso nesse caso, por procedimentos de compostagem, defumação e geração de energia (Mcdonough, Braungart, 2002; Sung, 2015; Sousa, et al., 2023).

Para a elaboração de projeto com um material, especialmente se tratando de resíduo lenhoso, envolve a apreensão total do mesmo a respeito de suas virtudes e desvantagens ante os demais materiais, algo feito por meio da experimentação sistemática contínua e exploratória, da criação até o produto final. Embora se assemelhe com o processo comum de design de produto, ao observarmos as suas fases de ação, é preciso reconhecer o domínio, criar pré-requisitos, objetivos, conceitos, triar e detalhar os últimos para escolher o melhor para ser incorporado no objeto (Karana et al., 2015).

Em relação aos sistemas de conexão padronizados de madeira comum para estruturas arquitetônicas e mobiliário, tem se utilizado no Brasil, majoritariamente nas últimas décadas, a união de peças de madeira maciça por meio de cola e componentes metálicos, tais quais os pregos e parafusos, por se tratar de um sistema de união de menor custo e maior velocidade de fixação, porém, tal prática tem caráter corrosivo sobre a madeira, em caso de oxidações (Gonzaga, 2006). Em outras culturas de carpintaria, como a japonesa, há práticas tradicionais de encaixe que exploram as propriedades do material e a geometria para o travamento de estruturas de longa durabilidade, facilitando a substituição de peças degradadas, e maior resistência à maresia das áreas litorâneas e terremotos, tais técnicas são denominadas *Tugite* e *Shiguchi*. A primeira se trata do projeto de conexão simples para unir duas partes, já a segunda tem maior complexidade e podem haver mais peças entrecruzadas em vários planos, inclusive com angulação entre si (Pfeil, 1978; Sumiyoshi, 1991; Kanasaki, Tanaka, 2013).

## **2.2. Obtenção, pré-seleção, transporte e armazenamento do resíduo**

O material de trabalho da pesquisa foi obtido pelas equipes de poda terceirizadas da universidade e foi encaminhado para uma área cedida na Prefeitura do Campus da USP -Butantã, onde ficou armazenado sobre o gramado, exposto às intempéries por volta de 12 meses e demandou um trabalho intensivo de pré-seleção e remoção de peças indesejadas, pois havia considerável heterogeneidade de espécies e qualidade de peças brutas lenhosas que estavam misturadas em pilhas no local (FIGURA 2).

Figura 2 – (a) Poda feita no campus; (b) material bruto recolhido por equipe de podas e depositado na Prefeitura do Campus da USP -Butantã; (c) fase de pré-seleção das espécies em lotes ;(d) armazenamento na Seção técnica (STMEEC) da Fau-usp.



Fonte: Podalab e autores

Foram escolhidos os galhos brutos de duas espécies exóticas: jambolão-*syzygium cumini* (de origem indiana) e tipuana-*tipuana tipu* (Benth.) Kuntze (de origem boliviana), em razão de serem espécies com potencial madeireiro e abundância na Cidade Universitária. Na Tabela 2, a segunda espécie, é considerada a de maior frequência no município de São Paulo, cujo plantio se deu no início do século XX e tais indivíduos arbóreos com porte superior, se encontram no fim do seu ciclo de vida, resultando em tombamentos e remoções frequentes (Brazolin, Tomazello, 2009; Buckeridge, 2015; Cardim, 2019). Em seguida, o resíduo triado foi transportado, posto à sombra e protegido da chuva por cerca de seis meses em uma área semi-coberta de armazenamento do pátio da Seção Técnica de Modelos, Ensaios e Experimentações Construtivas da Fau-usp (STMEEC), desprovido de beneficiamento físico (secagem forçada ou isolamento de topos para evitar rachamentos) e químico contra organismos xilófagos (fungos, cupins e brocas).

Tabela 2– Caracterização de espécies de arvores urbanas e suas madeiras de poda empregadas no artigo.

Nome	Família	Grã	Densidade (galhos)	Durabilidade Natural	Usos	Características
Jambolão- <i>syzygium cumini</i>	Mirtaceae	Direita/ irregular	0,55 g/cm <sup>3</sup>	Resistente a água, cupins	Construção naval, civil leve e pesada, mobiliário interno e externo, objetos	Moderadamente pesada, cerne cinza- avermelhado e alburno esbranquiçado; pouco brilho, textura fina, fibras curtas, superfície áspera, cheiro indistinto e sabor adstringente
Tipuana- <i>tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze	Fabaceae	Direita/ irregular	0,52 g/cm <sup>3</sup>	Média a cupins e brocas	Construção civil leve interna, mobiliário interno, objetos	Moderadamente pesada, cerne e alburno indistintos; branco-amarelados uniformes; pouco brilho, textura media

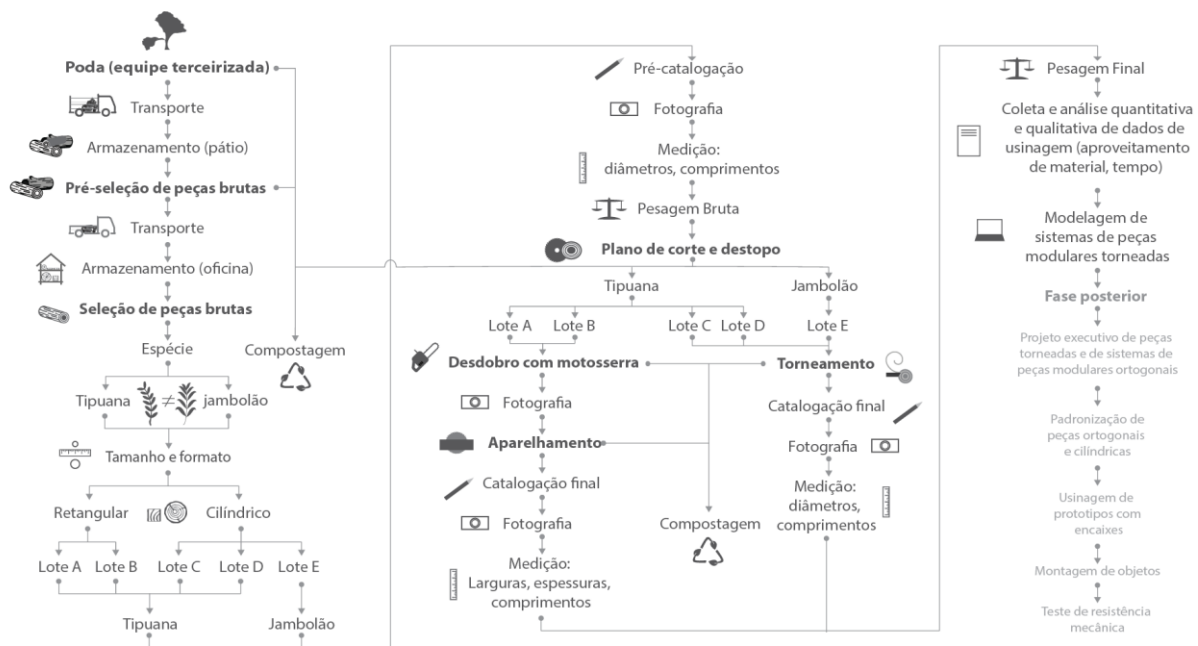
e superfície áspera,  
 cheiro e sabor  
 indistintos

Comportamento em 12% umidade

Fonte: Gutiérrez, *et al*, 2002; Manandhar, 2002; Orwa, C. *et al.*, 2009; Rodrigues, 2017.

Posteriormente, houve a seleção das peças brutas por características como espécie, tamanho, formato e a suscetibilidade da peça a determinado tipo usinagem, foi definida por meio de itens de parâmetros básicos, sendo para o torneamento (1): a) retilinearidade; b) diâmetro de oito até 14 centímetros; c) ausência de degradação estrutural; d) comprimento mínimo aproveitável de 50 centímetros; e desdobro (2): a) diâmetro equivalente ao comprimento do sabre da motosserra; b) maior comprimento possível; c) retilinearidade; d) poucas rachaduras; e) ausência de degradação estrutural.

Figura 3 – Fluxograma de beneficiamento de madeira de poda urbana de tipuana e jambolão da CUASO.



Fonte: autores

O processo geral de fases de beneficiamento previamente descritos pela literatura de engenharia florestal foi adaptado no decorrer das operações e o seu encadeamento de etapas de operações foi mapeado, organizado e pormenorizado de maneira visual por meio da abordagem sistêmica do design em um infográfico (FIGURA 3). A execução da imagem foi desenvolvida com auxílio de softwares Adobe CC (Illustrator e InDesign)

### 2.3. Catalogação, medição, pesagem e fotografia

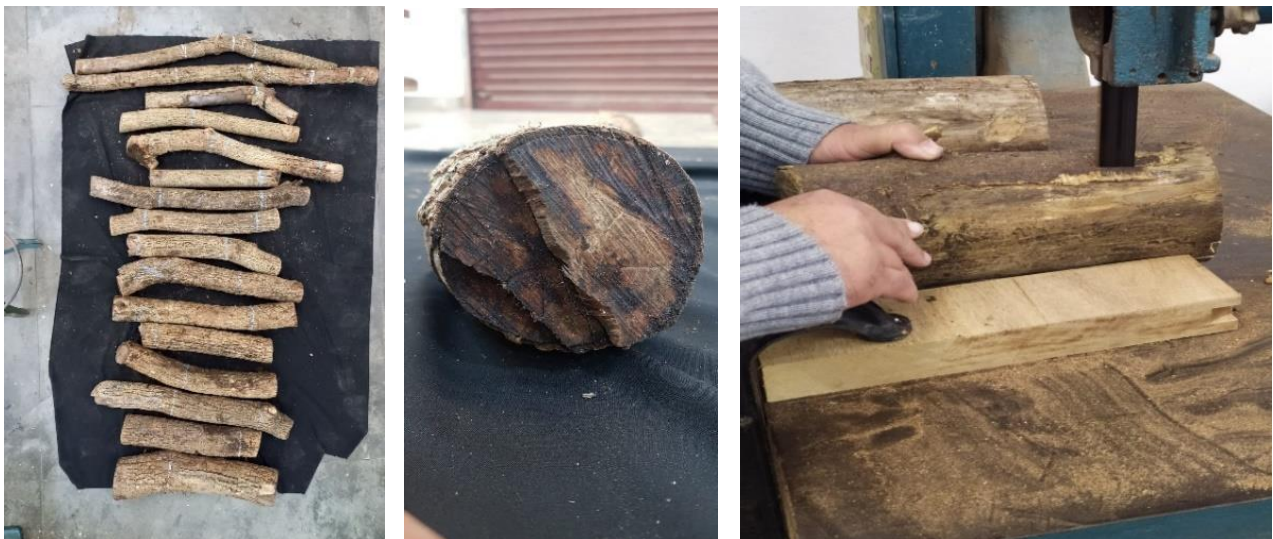


As peças organizadas e pré-catalogadas foram aglutinadas em cinco lotes (A a E), medidos (com régua de metal e paquímetro de 0,1 mm de precisão) e registrados os devidos diâmetros (o maior e o menor, em ambas extremidades), comprimentos e massas brutas com casca (em quilogramas, com balança digital). Optou-se pela pesagem devido ao fato da geometria dos galhos ser muito variável, o que tornaria o cálculo de volume impreciso e trabalhoso. Apesar da ausência de um aparelho disponível de medição de umidade durante os experimentos, ressalta-se que o período entre a pesagem dos galhos (expostos à secagem natural há mais de 18 meses) e o beneficiamento das peças foi de cerca de dois meses, gerando uma diferença irrelevante de diferença de peso por perda de umidade. O registro fotográfico foi feito com câmera semiprofissional DSLR de marca Canon Eos SL3 e os *smartphones* dos sistemas Android e IOS, enfatizando os códigos de catalogação dos lotes, marcações de limites do plano de corte, silhuetas dos comprimentos e diâmetros das amostras.

#### 2.4. Plano de corte, desrama e destopo

Dado o limite de tamanho de peça processável pelo torno mecânico em razão do comprimento de seu barramento (14 por 50 cm), foi necessária a seleção e demarcação de trechos dos galhos que tivessem maior retilinearidade e pudessem prover maior aproveitamento durante o processo de torneamento (FIGURA 4).

Figura 4 – (a) 16 galhos traçados de tipuana, vista superior; (b) galho com topo falhado e necessidade de destopo; (c) retirada de ramos e costaneiras do galho.



Fonte: autores

Figura 5 – (d) Vista superior do galho de tipuana A16; (e) segmentos e restos derivados da foto anterior. (f) galho de tipuana com costaneiras serradas para acomodação no torno.



Fonte: autores

Além disso, a marcação sinalizou áreas a serem removidas, tais quais os ramos radiais e as pontas dos galhos, que foram destopados com a serra-fita (corte das extremidades) para evitar solavancos no torno e permitir o alojamento seguro da peça na máquina. Para o processo de desdobro a marcação com giz determinou o tipo de peça retangular e a área de corte da motosserra (FIGURA 5).

## 2.5. Torneamento manual, desdobro com motosserra e aparelhamento

A etapa se deu em um torno mecânico adaptado (FIGURA 6), da oficina. Utilizou-se ferramenta de corte de  $\frac{3}{8} \times 4$ " composto por liga de aço rápido-HSS (Hard Speed Steel). Sua afiação foi adaptada para o desbaste de galhos, com ponta com um raio de nove milímetros, para suportar choques de protuberâncias e partes mais duras. Usou-se por volta de 600 rotações por minuto (RPM), com avanço de corte manual variável e profundidade máxima por passe na peça em dez milímetros (Hoadley, 2000).

Figura 6 – (a) torno mecânico; (b) tipuana bruta presa na máquina; (c) tipuana torneada na máquina; (d) tipuana após lixamento.



Fonte: autores



Durante o processo de torneamento, convencionou-se que a profundidade máxima de desbaste seria determinada ao sobrar uma faixa estreita, remanescente da casca com o intuito de se priorizar o aproveitamento geométrico em relação à estética. Em razão da presença de fibras longas na madeira de tipuana, o acabamento de torneamento não resultou em uma textura satisfatória, resultando em farpas grossas, demandando a necessidade de lixamento nas etapas posteriores com lixas de granulometria de 80; 120 e 220.

O tempo de operação variou de três a 30 minutos por unidade, dependendo do tipo de geometria (quantidade de ramos, excentricidade, etc) e dureza e a relação de torque do torno e capacidade de tração e fixação da madeira em relação à contraponta da máquina. O aumento de avanço manual da ferramenta provocou a parada da peça e a usinagem. A trabalhabilidade de tipuana mostrou-se razoável mesmo com a peça seca, resultado inferior ao das peças recém-cortadas, no entanto as mesmas têm resina vermelha na casca, que causam impregnação

Figura 7 – (a) seis galhos traçados de jambolão, vista superior; (b) jambolão bruto preso na máquina; (c) jambolão torneado; (d) jambolão com lixamento.



Fonte: autores

A trabalhabilidade do jambolão no torneamento é boa, apesar da casca se soltar em pedaços maiores, podendo ocasionar lesões no operador na ausência de um protetor facial, já os cavacos desprenderam-se com textura fina, diferentemente da tipuana (FIGURA 7). O perfil transversal da tipuana tende a ser próximo de um círculo, enquanto o jambolão tem forma predominante de elipse, já em relação ao comprimento, a primeira tende a ser levemente curvada com segmentos retos, em oposição à segunda, que conta com geometria mais tortuosa (FIGURA 8), com isso, convencionou-se que o intervalo-padrão mínimo de comprimento de corte de suas peças seria de mais de 25 centímetros (mais três polegadas de sobrematerial), pois então poderia se evitar o desperdício de material e compor módulos longitudinalmente encaixáveis, de comprimento extensível e respectivo potencial de composição de componentes empregáveis em eventuais peças na escala de mobiliário (cadeiras, mesas, camas, estantes, biombos, etc).

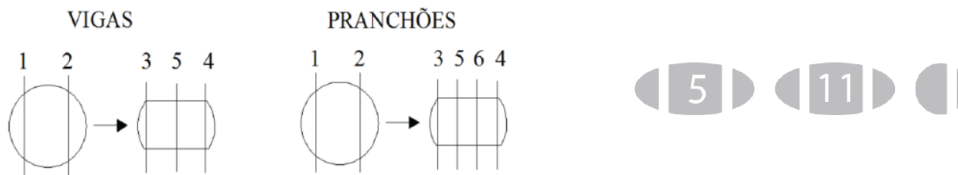
Figura 8 – (a) Perfil do topo- tipuana; (b) Perfil do topo- jambolão; (c) geometria de galho e casca-tipuana; (d) geometria de galho e casca- jambolão.



Fonte: autores

Os cortes longitudinais foram feitos de modo livre, seguindo as marcações prévias, sem dispositivo para ajuste e guia de deslizamento. Baseados na habilidade do operador e preocupação em regularidade de espessura, se deu a segmentação da madeira bruta (oriundas também dos fustes de supressões arbóreas) por meio da motosserra, com sabre de 30 cm de comprimento e motor à gasolina com dois cavalos de potência.

Figura 9 – (a) Padrões-referência de perfis de desdobro da literatura; (b) tipos de perfil de desdobro adotados.



Fonte: adaptado de Batista, *et al* 2013 e autores

Os lotes desdobrados seguiram os parâmetros de aproveitamento espessura em peças descritos por Batista *et al* (2013), adotando-se a espessura de cinco e 11 centímetros na maioria das peças e corte excêntrico (FIGURA 9).

Figura 10 – (a) peça de tipuana desdobrada com perfil em D; (b) desdobro com 11 cm de largura; (c) desdobro com cinco cm de largura.





Fonte: autores

A ação se deu com teste sobre quatro suportes diferentes: a) peças de poda recortadas e fixadas no solo por cunhas (uma alternativa de baixo custo para beneficiamento *in loco* na fase de poda); b) suporte de tablado elevado (ergonomia para o operador, porém instável); c) base feita com tablados pregados (maior estabilidade na operação e altura ergonômica); d) estacas fincadas no chão (estabilidade e baixo custo) (FIGURA 11).

Figura 11– (a) suporte A; (b) desdobro de tipuana sobre o suporte B; (c) suporte C; (d) suporte D.



Fonte: autores

Figura 12 – (a) Conjunto de peças cortadas e costaneiras de tipuana, vista superior.



Fonte: autores

O aparelhamento dos lotes (FIGURA 12) se deu por meio de uma serra circular estacionária de seis cavalos de potência e uma desempenadeira, sendo ambas da marca Invicta, com boa trabalhabilidade da madeira de tipuana (FIGURA 13).

Figura 13 – (a) Operação na desempenadeira de tipuana; (b) esquadreamento inicial na serra; (c) esquadreamento final.



Fonte: autores

Verificou-se que as peças de poda podem ser cortadas por discos de corte comuns para madeira (FIGURA 14), desde estejam bem afiados e que o material esteja com baixo nível de umidade, caso o material de corte esteja verde (com alto nível de umidade) ou com nós excessivos, pode travar o disco durante a operação, causando contragolpe e até acidentes.

Figura 14 – (a) Sequência de aparelhamento com esquadreamento (b) esquadreamento de tipuana suporte B; (c) destopo da madeira esquadrejada.





Fonte: autores

As partes desdobradas foram reservadas à uma eventual composição futura de módulos de perfis retangulares (FIGURA 15)

Figura 15 – (a) Lote de peças após o aparelhamento; (b) costaneiras remanescentes do desdobro.



Fonte: autores

Durante o decorrer dos experimentos, foi notada a presença frequente de resíduos nas peças, na forma de poeira condensada em pequenos canais tubulares, vestígio de besouros ou brocas, da ordem dos Coleópteros, que de acordo com Mendes; Alves, 1988, atacam a madeira durante todo o ciclo de vida, desde larvas até chegar à fase adulta. Em um eventual uso in natura ou sem escovamento após o processamento, o dejetos dos insetos é liberado aos poucos com o manuseio (FIGURA 16).

Figura 16 – (a) Resíduos de broca em peça; (b) Peça torneada com ataque de brocas.



Fonte: autores e adaptado de Castro, 2018.

Consequentemente, cogitou-se a possibilidade de se realizar o revestimento com resina de origem vegetal (mamona), para uma fixação mais efetiva desse pó, assim como a aplicação prévia de um acabamento carbonizado, para a melhoria da durabilidade natural ante tais organismos e como oferecimento de uma alternativa estética.

## 2.6. Concepção de modelos virtuais tridimensionais.

Durante o desenvolvimento dos modelos do projeto, por questão de segurança do usuário e característica da madeira de poda, dada a sua compensação estrutural de esforços sofridos com os ventos e o próprio peso do galho, prezou-se pela questão de superdimensionamento e adotou-se 50 milímetros de diâmetro e espessura nas peças ortogonais, sob observância da amplitude de possibilidades de esforços e aplicações futuras dos módulos encaixáveis, pois se tratam de medidas maiores que o necessário para a composição dos pés de uma cadeira ou da estrutura de um biombo feitos de madeira tal qual o pinus, por exemplo. Em termos de proporções, procurou se pensar em cavilhas com medidas superdimensionadas também, (12 e 15 milímetros de diâmetro) e a espigas com no mínimo um terço de espessura em relação à base (Pfeil, 1978; Garcia, 2018).

A elaboração do projeto se deu por meio do uso de softwares de modelagem 3D (Rhinoceros 6.0, Adobe Illustrator CC e Photoshop CC). Já os seus sistemas de encaixe foram desenvolvidos a partir da fusão entre modelos da carpintaria tradicional japonesa e os sistemas alternativos, para que pudessem oferecer formas de conexão entre peças somente com encaixe por meio de cavilhas, com proporções e formas que maximizassem a resistência à compressão, tração, flexão, torção e choque. O projeto é voltado para a usinagem posterior em máquinas operatrizes convencionais não-automatizadas (tupia, serra circular, torno, furadeira radial) e emprego de gabaritos (para operação em ângulo, de travamento de cilindros, etc) e ferramentas especiais (broca para furo quadrado, fresa rabo-de-andorinha), visto que se torna mais acessível em termos econômicos, com maior robustez e dinamicidade em uma eventual aplicação em marcenarias de pequeno porte.



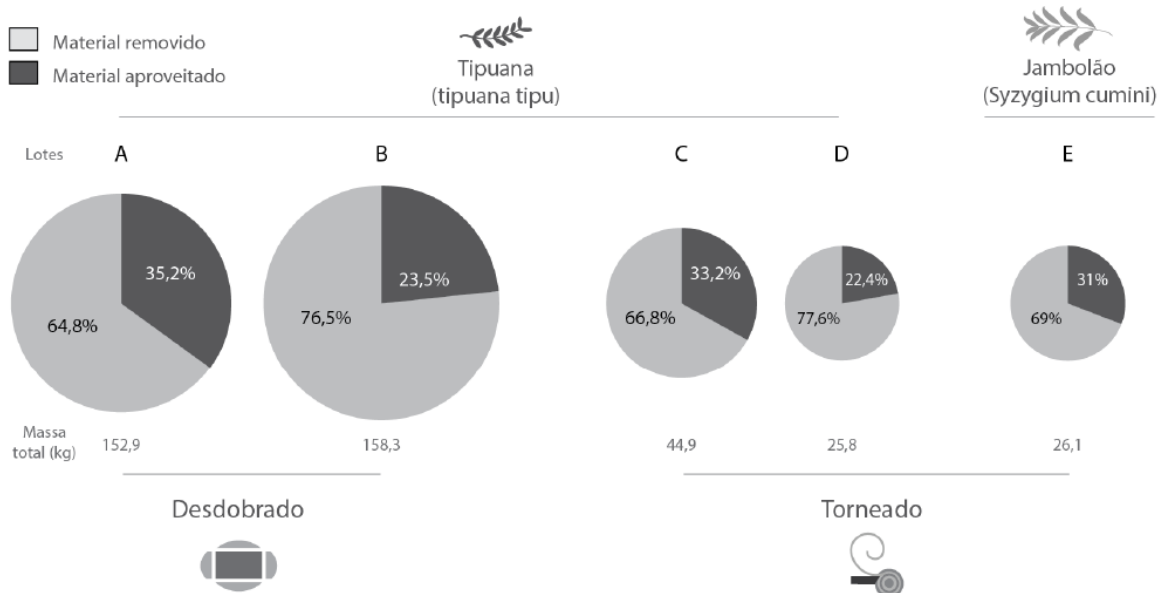
### 3. Resultados

#### 3.1. Compilação dos quantitativos de aproveitamento de madeira de poda

O montante de matéria-prima utilizada no projeto alcançou cerca de 381 kg, e em termos de média, aproveitou-se 33,57% de tipuana em todos os processos, e sobre a média total das madeiras processadas, aproveitou-se 30,8% do peso, com 69,2% de material descartado.

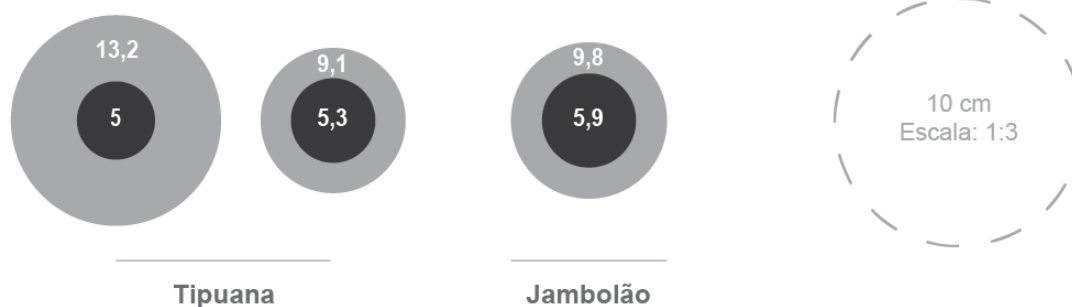
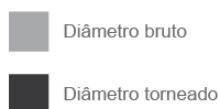
Por meio de análise dos dados registrados, se obtiveram resultados quantitativos compilados nos gráficos a seguir, nos quais se discriminaram por espécie e tipo de operação, o nível de aproveitamento de material de poda e supressão por porcentagem de massa (FIGURA 17) e dimensões (FIGURA 18).

Figura 17 – Aproveitamento de cinco lotes de madeira de poda de tipuana e jambolão em processo de beneficiamento (torneamento, desdobro e aparelhamento).



Fonte: autores (2024)

Figura 18 – Diâmetro médio de galhos brutos e torneados em três lotes de tipuana e jambolão.



Fonte: autores (2024)

### 3.2. Compilação dos dados quantitativos de ensaios de resistência em madeira de poda

Mais dados quantitativos de relevância foram obtidos nos ensaios de compressão e cisalhamento paralelos às fibras (Melo, 2002), realizados em setembro de 2022 pelo corpo técnico do Laboratório de árvores, madeira e móveis (LAMM) do Instituto de pesquisas tecnológicas (IPT), onde testou-se os limites de resistência mecânica da madeira de poda obtida na Cidade universitária Armando de Salles Oliveira da Universidade de São Paulo (CUASO/USP) de tipuana — *tipuana tipu* (Benth.) Kuntze, árvore dicotiledônea (folhosa), da família Fabaceae (Leguminosa), cujo resultado obtido (Tabela 3), se enquadrou na classe C20 de resistência, ou seja, resistente a 20 Mpa (Megapascals) de esforço de acordo com a tabela referente às dicotiledôneas especificadas na norma NBR 7190:1997 da ABNT, classificando-a como uma madeira com resistência suficiente e equiparável à madeira comercial e equivalente na categoria

Tabela 3 – Resultados de ensaios físicos e mecânicos de madeira de poda de tipuana — *tipuana tipu* (Benth.) Kuntze.

Amostra	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Compressão paralela às fibras (Mpa)		Cisalhamento paralelo às fibras (Mpa)
	Aparente a 12%	Básica	Resistência -fc0	Módulo de elasticidade – Ec0	
1	592	462	42,3	12036	11,6
2	596	465	29,2	7323	8,4
3	627	490	53,4	12026	10,9
4	597	467	34,9	8900	6,0

5	627	490	37,5	9444	10,1
6	686	536	49,0	14133	12,0
Média	621	485	41,1	10644	9,8
CV (%)	5,7	5,7	22,0	23,6	23,1
V. caracterização	—	—	29,2	—	6,9

Fonte: adaptado de Melo, 2002; Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), (2022)

### 3.3. Compilação dos sistemas de encaixes modulares de madeira de poda

Foram desenvolvidos seis modelos virtuais distintos, com características discriminadas na Tabela 4, para a confecção posterior de peças majoritariamente cilíndricas com seus respectivos desenhos técnicos simplificados e renderização 3D realista, (a partir da fotografia da textura da madeira de tipuana), dos modelos modulares com exemplares montados, desmontados em vista explodida e em perspectiva.

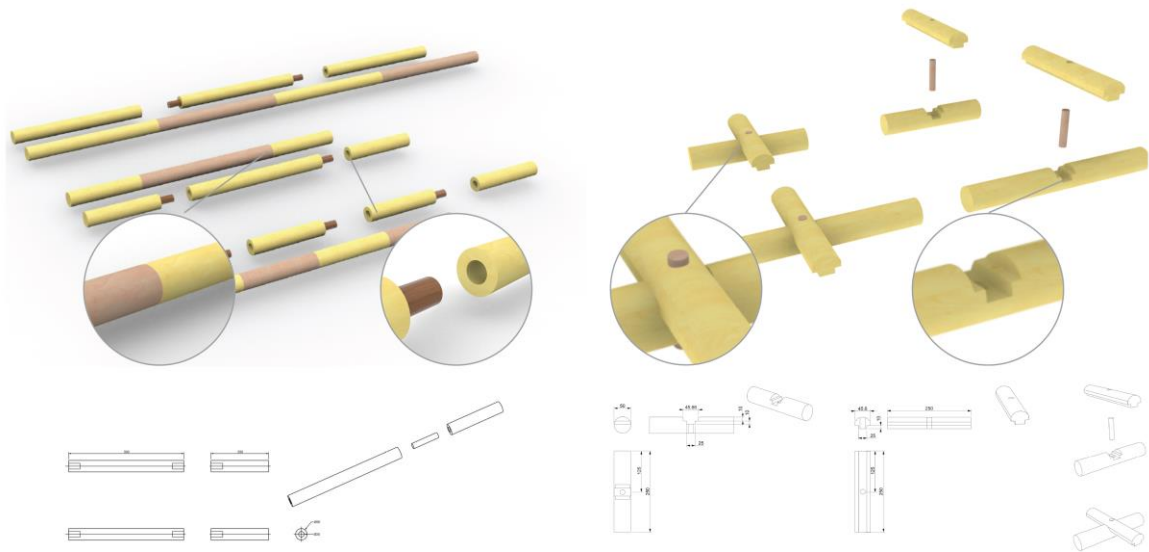
Tabela 4 – Sistematização de tipos de conexões modulares de madeira.

Modelo	Tipo de encaixe	Fixação	Peças	Posições	Inclinação	Dimensões (mm):
						Peça/ Componente
A	Topo	Cola/ Cavilha	3 ou mais	1	0°	50 ø x 250 / 25 x 75
B	Meia-madeira radial		3	1	90°	50 ø x 250 / 15 x 75
C	Radial		5	2	90° / 0°	50 ø x 250 / 15 x 75
D	Furo-espiga e espiga rasgada		5	1	90° / 0°	50 ø x 250 / 12 x 50
E	Furo-Espiga inclinado		5	2	45°	50 ø x 250 / 12 x 50
F	Rabo de andorinha		3	1	0°	50 ø x 250 / 12 x 50

Fonte: autores

O módulo A tem potencial para elaboração de estruturas de moveis que tem esforços maiores de compressão e demandam varas longas e ajustáveis ou fixas (biombo, estante, mesas e pedestais), já o módulo B pode compor *frames* com resistência aos esforços correspondentes ao de uma mesa montada por ripas (FIGURA 19).

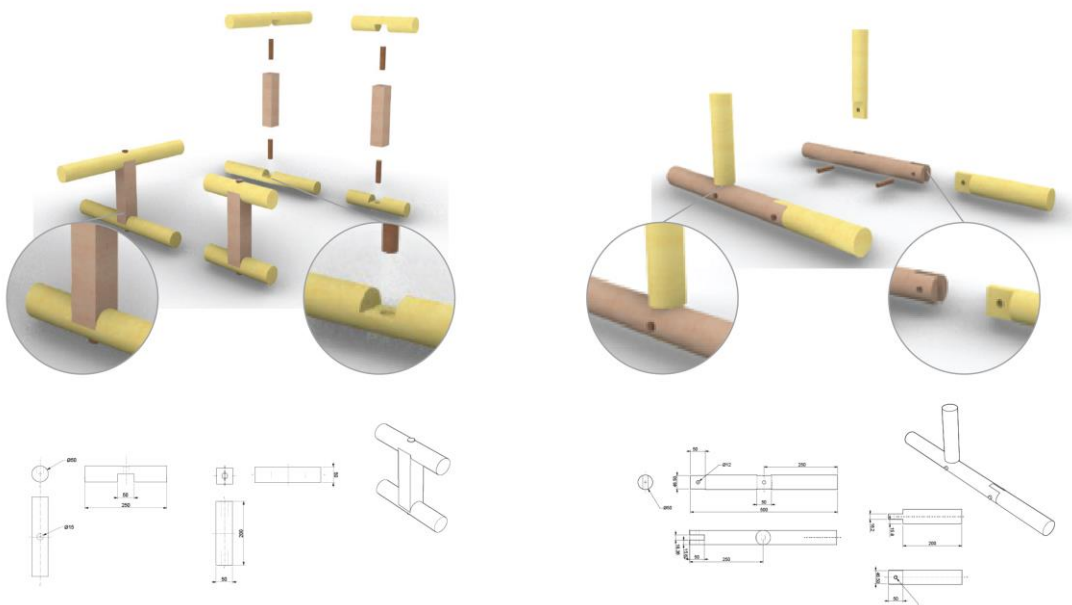
Figura 19 – (a) Módulo A macho e fêmea com encaixes de topo; (b) módulo B com encaixe meia-madeira radial.



Fonte: autores

O módulo C tem estrutura favorável para aplicação em bancos, banquetas e aparadores, enquanto o módulo D pode servir para a montagem de camas e penteadeiras (FIGURA 20).

Figura 20 – (c) Módulo C com encaixes radiais; (d) módulo D com encaixes furo-espiga e espiga rasgada.

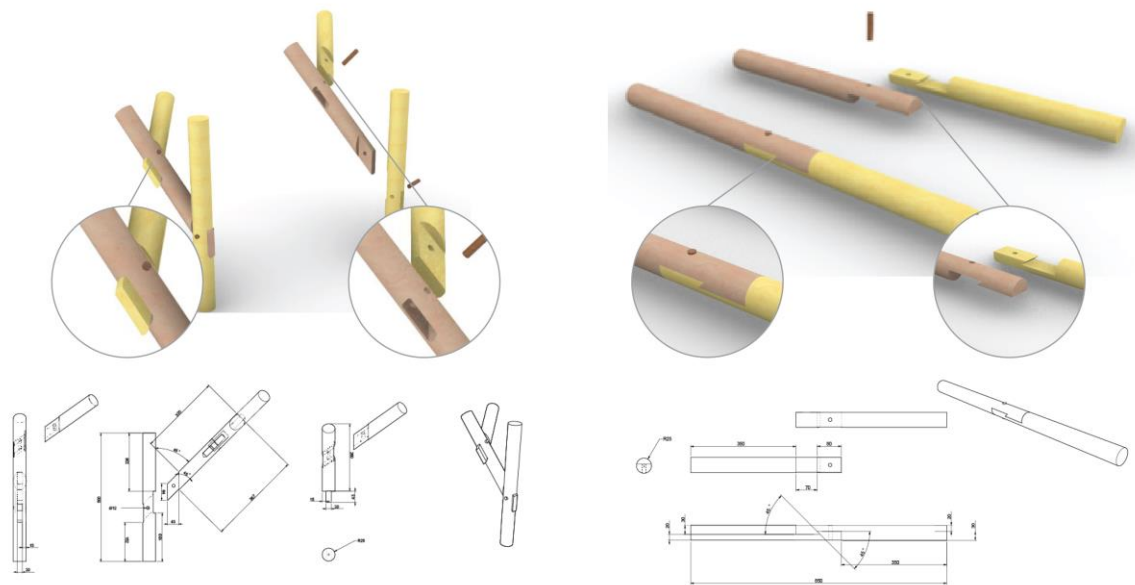


Fonte: autores



Em conclusão, o módulo E apresenta geometria diferenciada, aplicável em cabideiros, chapeleiras, mancebos e mesas, já o último o módulo F, tem ótima resistência à tração e torção servindo para luminárias, cabos, varas, etc (FIGURA 21).

Figura 21 – (e) Módulo E com encaixe furo-espiga inclinado; (f) módulo F com encaixe rabo de andorinha.



Fonte: autores

## 4. Conclusões

A respeito do seguinte trabalho, conclui-se que o rendimento apresentado pela madeira de poda e supressão usinadas nos processos primários e secundários de transformação local em baixa escala se mostra vantajoso em termos de alternativa de mitigação do volume dos resíduos arbóreos urbanos, visto que, rendeu valor próximo a um terço em termos de massa total (30,8%), com seu rejeito (69,2%) sendo destinável ao *downcycling*.

Já o desenvolvimento de sistemas de modularidade de encaixes e conjuntos de peças de madeira de poda por sua vez, pode prover uma série de vantagens aos processos projetivos e produtivos na área de design de mobiliário, pois reduz o tempo de elaboração, fabricação e custos gerais ao favorecer a padronização e previsibilidade no emprego de uma matéria-prima pouco utilizada, e além disso, possibilita maior customização para um eventual cliente final em razão da variedade de arranjos disponíveis em objetos. Em termos econômicos, conseqüentemente, o desenvolvimento desses modelos, empregando o material em questão tem potencial de se tornar uma fonte alternativa de matéria-prima, de agregar valor econômico em termos de serviço e produtos, de reduzir custos de matéria-prima para designers, artesãos e marceneiros das áreas urbanas, visto que os custos fixos da área de marcenaria e a própria demanda por mobiliário têm

sido crescentes.

Além disso, tais atividades podem estimular o crescimento do nicho, visto que há uma série de atividades derivadas da área, tais como a elaboração de cursos de longa e curta duração na área de marcenaria, e da própria indústria de ferramentas e dispositivos específicos para processamento primário e secundário da madeira de poda. Mesmo com tantas vantagens, poucas cidades do país têm programas de valorização do tema tratado nesta pesquisa (São Paulo, por exemplo, pratica somente o *downclying*), o que torna imprescindível para que o poder público e grandes empresas direcionem subsídios e investimentos para projetos e pequenos empresários da área, visto que assim, fomenta o fortalecimento da economia local, e a conscientização da importância da existência e proteção das florestas urbanas.

## 5. Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190:1997: Projeto de Estruturas de Madeira – Anexo B**. Rio de Janeiro: Associação brasileira de normas técnicas, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14807/2002: peças de madeira serrada: dimensões**. Rio de Janeiro: Associação brasileira de normas técnicas, 2002.

BARATA, T. Q. F. *et al.* **Management of waste from the pruning of urban greenery. Experiences in São Paulo, Brazil**. *Agathón-International Journal of Architecture, Art and Design*, v. 9, p. 232-243, jun 2021.

BATISTA, Djeison Cesar *et al.* **Desdobro de Eucalyptus grandis com motosserra, Parte 1- Análise do desempenho operacional**. *Ciência Florestal*, v. 23, p. 471-481, mar 2013.

BRAZOLIN; TOMAZELLO. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo**, SP. 2009.

BUCKERIDGE, Marcos. **Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água**. *Estudos Avançados*, v. 29, p. 85-101, 2015.

CARDIM, Ricardo. **Apagão verde em São Paulo: em 10 anos, 2019**. In: *Arvores de Sao Paulo* (<https://arvoresdesaopaulo.wordpress.com/2019/08/09/apagao-verde-em-sao-paulo-em-10-anos>).

CASTRO, V. G.; GUIMARÃES, P. P. **Deterioração e preservação da madeira**. Mossoró: EdURFESA, 2018.

EMF – **Rumo à Economia Circular: O racional de negócio para acelerar a transição**. Ellen MacArthur Foundation, p.6, 2015.

EMF – **The circular design guide, 2018.** In: The Ellen MacArthur Foundation. (<https://www.circulardesignguide.com/resources>).

GARCIA, G. **Propriedades da madeira de galhos de espécies utilizadas na arborização urbana.** 2018. Tese de Doutorado. [sn].

GONZAGA, Armando Luiz. **Madeira: Uso e Conservação** [Cadernos Técnicos 6]. Brasília, DF: IPHAN/Programa Monumenta, 2006.

GUTIÉRREZ, V. H. *et al.* **Información técnica para el procesamiento industrial de 134 especies maderables de Bolivia.** Serie Técnica XII. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Santa Cruz, La Paz, Bolivia, 2002.

HOADLEY, R. Bruce. **Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology.** Taunton press, 2000.

KANASAKI, K; TANAKA, H. **Traditional wood joint system in digital fabrication.** In: eCAADe 2013: Computation and Performance—Proceedings of the 31st International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Delft, The Netherlands, 18 a 20 sep. 2013. Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 2013.

KARANA, Elvin *et al.* **Material driven design (MDD): A method to design for material experiences.** *International journal of design*, v. 9, p. 35-54, mai 2015.

KISTMANN, Virginia Borges. **Interdisciplinaridade: questões quanto à pesquisa e à inovação em design.** *Estudos em design*, v. 22, n. 3, p. 81-99, 2014.

KLINGENBERG, D. *et al.* **Aproveitamento de resíduos da arborização urbana em POMs e sua aceitação pelo público consumidor.** In: Anais do 13º Seminário Internacional Nutau 2020. São Paulo: Blucher, 2020. p. 47-54.

LÖBACH, Bernd. **Design Industrial: Bases para a Configuração dos Produtos Industriais.** São Paulo: Edgard Blücher 1976.

MANANDHAR, Narayan P. **Plants and people of Nepal,** Portland, Timber Press, 2002.

MEIRA, A. M. **Gestão de resíduos da arborização urbana.** Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2010.

MELO, Júlio Eustáquio. **Madeira: características e aplicações.** Brasília: LPF, 2002.

MENDES, A. S.; ALVES, M. V. S. **A degradação da madeira e sua preservação.** Brasília: IBDF/LPF, 1988.

ORWA, C. *et al.* **Agroforestry database: a tree species reference and selection guide version 4.0.** World Agroforestry Centre ICRAF, Nairobi, KE, 2009.



PFEIL, W. **Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

RODRIGUES, V. M. **Caracterização anatômica do lenho de *Syzygium cumini***. 2017.

SILVA, E.; FLORA, K. **Subprefeituras de SP gastam R\$ 4,6 milhões por mês com podas de árvores, 2019**. In: 32XSP. (<https://32xsp.org.br/2019/03/11/subprefeiturasde-sp-gastam-4-milhoes-por-mes-com-podas-de-arvores>).

SOUSA, C. Malaguti. Design and Waste Upcycling from Tree Pruning and Fallen Trees at the USP Campus (University of São Paulo): Potentialities. In: Leal Filho, W.; Frankenberger, F.; Iglecias, P.; Mülfarth, R.C.K. (Org.). **Towards Green Campus Operations - Energy, Climate and Sustainable Development Initiatives at Universities**. 1ed. Berlim: Springer, 2018, v. 1, p. 777-791.

SOUSA, C. S. M. **Resíduos da arborização urbana na prática do design: uma abordagem exploratória**. In: Anais do 13º Seminário Internacional Nutau 2020. São Paulo: Blucher Proceedings, 2020. p. 94-99.

SOUSA, C. S. M. *et al.* **Urban forests management. Design-driven technological routes for wood waste valuing**. AGATHÓN-International Journal of Architecture, Art and Design, v. 13, p. 291-300, 2023.

SOUZA, C. A.; GUIMARÃES, C. C.; VELASCO, G. D. N. **Reaproveitamento de resíduos de poda e sua colaboração para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. In: Anais do 13º Seminário Internacional Nutau 2020. São Paulo: Blucher Proceedings, 2020. p. 83-88.

SUMIYOSHI, Torashichi; MATSUI, Gengo. **Wood joints in classical Japanese architecture**. Kajima Institute Publishing Company, 1991.

Urban Wood Network Inc. **The urban wood toolkit, 2019**. In: Resources. (<https://urbanwoodnetwork.org/wp-content/uploads/The-Urban-Wood-Toolkit.pdf>.)

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas–SVMA, 2009.