

Fabricação Pessoal Orientada à Economia Circular e Produção Distribuída: estudo exploratório

Personal Fabrication for Circular Economy and Distributed Production: an exploratory study

DA COSTA JUNIOR, Jairo; Pós-doutorando; Universidade Federal do Paraná

jairo.dacosta@ufpr.br

SANTOS, Aguinaldo; Professor Titular; Universidade Federal do Paraná

asantos@ufpr.br

TENORIO, Rosangela; Professora Doutora; *University of Western Australia*

rosangela.tenorio@uwa.edu.au

A fabricação pessoal está aumentando em um ritmo notável devido à popularização das tecnologias de fabricação digital, à proliferação dos espaços *makers* e à ampla disseminação de soluções *open-source*. Embora a fabricação pessoal permita as pessoas assumirem um papel ativo na construção de melhores padrões de vida, ela não é intrinsecamente sustentável. Nesse artigo, apresentamos os resultados de um estudo exploratório da fabricação pessoal sustentável. O método adotado na pesquisa consiste em revisão bibliográfica assistemática, atividades projetuais para o desenvolvimento de protótipos funcionais e testes de fabricação pessoal em um *workshop* prático com alunos. As informações coletadas e analisadas serviram como base para identificar pontos-chaves para o *design* e manufatura de soluções orientadas a fabricação pessoal e compatíveis com os princípios da Economia Circular e Produção Distribuída. Os resultados do estudo permitiram a formulação de diretrizes de projeto para viabilizar a fabricação pessoal sustentável.

Palavras-chave: Fabricação Digital, Economia Circular, Produção Distribuída.

Fabrication at a personal level is increasing remarkably due to the popularization of digital fabrication technologies, the proliferation of makerspaces, and the widespread emergence of open-source solutions. While personal fabrication allows people to take an active role in creating better living standards, it is not inherently sustainable. In this article, we present the results of an exploratory study on sustainable personal fabrication. The method adopted in the research consists of a narrative literature review, design activities for the development of functional prototypes and a project-based workshop with students to test personal fabrication practices. Based on the information collected and analyzed during the investigation, we identified key factors for designing solutions for personal fabrication compatible with Circular Economy and Distributed Production principles. Drawing on the research findings, we propose guidelines for sustainable personal fabrication.

Keywords: Digital Fabrication; Circular Economy; Distributed Production.

1 Introdução

Os desafios enfrentados globalmente pela sociedade continuam a crescer em complexidade e escopo devido aos impactos sociais, econômicos e ambientais dos modelos de produção e consumo de energia, materiais e produtos (COSTA JUNIOR, 2020). Nesse contexto, a economia linear — modelo econômico vigente, caracterizado pela extração crescente de recursos naturais para a produção de produtos que são utilizados e descartados como resíduos, tem sido considerado um modelo de produção e consumo inviável e insustentável (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). Da mesma forma, o modelo convencional de produção centralizada e em massa traz implicações negativas para a sustentabilidade devido a características como grande distâncias e aumento de movimento entre matéria-prima e produtos, distanciamento entre a produção e consumidores, enfraquecimento da possibilidade de atores locais exercerem controle sobre seu ambiente econômico imediato, perda da identidade cultural local e limitação da diversidade econômica regional (VEZZOLI; CESCHIN, 2008).

Dentre as abordagens para combater os impactos negativos associados a esse cenário, o *Design* para a Sustentabilidade propõe contribuir para o desenvolvimento e implementação de modelos de produção e consumo mais sustentáveis (ANDERSEN; TUKKER, 2008; LEBEL; LOREK, 2008; MANZINI; VEZZOLI, 2008). Nesse sentido, destacam-se os conceitos de Economia Circular e Economia Distribuída como propulsores de uma transição para sistemas de produção descentralizada e mais sustentáveis. A Economia Circular defende um sistema industrial que seja regenerativo por intenção e *design*, visando limitar a extração de matérias-primas e a produção de poluição e resíduos por meio da recuperação e reaproveitamento de materiais e produtos, de forma sistêmica (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). A Economia Distribuída, particularmente a Produção Distribuída, representa uma mudança nos padrões de produção e consumo que tem o potencial de ser mais enxuta e limpa, mitigando ou eliminando diversos problemas socioeconômicos e ambientais associados ao modelo convencional de produção centralizada em massa (KOHTALA, 2015).

O advento de modelos de produção circulares e distribuídos não é algo novo. No entanto, hoje, tais modelos são especialmente viabilizados em uma escala sem precedente pelos avanços em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), como por exemplo, a Fabricação Digital (CACCERE; SANTOS, 2017). A Fabricação Digital refere-se aos processos de manufatura que utilizam ferramentas controladas por computador, como impressoras 3D, cortadoras a laser e fresadoras CNC, na produção de artefatos físicos a partir de modelos digitais (GERSHENFELD, 2012). Para Caccere e Santos (2017), a viabilização da Produção Distribuída por meio da Fabricação Digital tem o potencial de facilitar modelos de produção e consumo efetivamente mais sustentáveis.

Apesar de promissor, o uso da Fabricação Digital em escala pessoal e a promoção da Produção Distribuída por meio de espaços colaborativos (e.g., espaços *coworking*, *innovation labs* e *fab labs*, genericamente denominados nesse artigo como espaços *maker*) não são atividades intrinsecamente sustentáveis. Em realidade, o fenômeno de democratização do acesso às tecnologias de fabricação digital devido o barateamento dessas tecnologias e a disseminação da Cultura *Maker*¹ (Movimento Faça-Você-Mesmo ou *Do-It-Yourself*, no idioma original) por meio da proliferação de redes colaborativas de conhecimento na internet podem potencialmente favorecer o aumento do consumo, produção e descarte de produtos. Por exemplo, por meio de práticas como a fabricação pessoal (GERSHENFELD, 2012; KOHTALA, 2015), tornou-se possível

1 A Cultura *Maker* fundamenta-se na ideia central de que indivíduos devem ser capazes de fabricar, construir, reparar e alterar objetos com suas próprias mãos, bem como incentivar a compartilhamento desse conhecimento por meio de ambientes colaborativos e/ou por meio de redes de informação.

para qualquer pessoa produzir os seus próprios produtos em casa ou em um espaço *maker*, aumentado assim, a capacidade da sociedade civil em afetar significativamente a quantidade e qualidade da produção material como um todo (quantos, o que e como são fabricados os artefatos), gerando ricos adversos, como por exemplo, *rebound effects*, superprodução, e produção de produtos inadequados ou prejudiciais a saúde do usuário.

Por esse motivo, torna-se imprescindível desenvolver metodologias, processos e ferramentas para a adoção da Fabricação Digital e Produção Distribuída em favor da sustentabilidade. Para contribuir com esse desafio, esse artigo apresenta os resultados preliminares de uma pesquisa de pós-doutorado que visa explorar o *design* de soluções orientadas a fabricação pessoal que sejam compatíveis com os princípios da Economia Circular e Produção Distribuída. Tal contribuição visa informar futuros *designers* e educadores de *design*, sobre as potencialidades da fabricação pessoal sustentável, bem como gerar recursos para fomentar uma nova geração de *não-designers* (e.g., cidadãos, *makers*, inovadores, entusiastas DIY) ativamente envolvidos em mudanças socioeconômicas e ambientais por meio da atividade *maker*.

2 Fundamentação Teórica

2.1 A transição para uma Economia Circular e Distribuída

O conceito de Economia Circular sintetiza uma série de importantes escolas de pensamento, incluindo a Economia Funcional (STAHEL, 1997), Capitalismo Natural (HAWKEN; LOVINS; LOVINS, 1999), *Cradle to Cradle* (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2002), *Biomimicry* (BENYUS, 2002) e a Economia Azul (PAULI, 2010). A Economia Circular se caracteriza como restaurativa e regenerativa por princípio e tem como objetivo manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor por todo o ciclo de vida. Esse conceito se baseia em três princípios: (1) Preservar e aprimorar o capital natural, controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis (Eliminar resíduos e poluição desde o princípio); (2) Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no ciclo biológico (Manter produtos e materiais em uso); (3) Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio (Regenerar sistemas naturais) (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019). Ademais, a Economia Circular também tem como objetivo redefinir a noção de crescimento, por meio da dissociação da atividade econômica do consumo de recursos finitos e minimização de riscos sistêmicos, gerindo estoques finitos e fluxos renováveis, de modo a criar capital econômico, natural e social (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019).

A Economia Distribuída é outro modelo que vem ganhando espaço dentro do contexto de novas formas de produção e consumo economicamente viáveis, socialmente justos e com baixo impacto ambiental (VEZZOLI *et al.*, 2018). Nesse modelo alternativo e complementar ao modelo convencional de produção centralizada e em massa, uma parcela da produção é distribuída em uma determinada região onde as atividades são organizadas na forma de unidades produtivas em pequena escala, flexíveis e conectadas entre si, como demonstrado por (JOHANSSON; KISCH; MIRATA, 2005). Nesse estudo, o conceito de Economia Distribuída adotado segue a abordagem de Santos *et al.*, (2021), e dessa forma, é visto como um campo de estudo mais amplo que abrange várias atividades e processos distribuídos. O artigo foca em dois tipos de Economia Distribuída, particularmente relevantes para a implementação da fabricação pessoal: o *Design* Distribuído e a Produção Distribuída. Ademais, destaca-se que no âmbito do *Design* e da Economia Distribuída, os termos Manufatura Distribuída e Produção Distribuída são frequentemente usados como sinônimos e representam mudanças nos padrões de produção e consumo que tem o potencial de serem mais enxutas e limpas, podendo mitigar ou mesmo

eliminar diversos desafios socioeconômicos e ambientais associados ao modelo convencional de produção em massa (KOHTALA, 2015).

2.2 Fabricação Digital e Produção Distribuída no contexto da sustentabilidade

Caccere e Santos (2017) destacam as oportunidades que modelos alternativos de consumo e produção trazem ao fomentar mudanças nas formas de organização (espaços e comunidades *makers*), distribuição da informação (*Design* Aberto e Distribuído) e utilização de tecnologias emergentes com a Fabricação Digital (impressão 3D, cortadoras a laser e fresadoras CNC). Para os autores, a adoção da Produção Distribuída por meio da Fabricação Digital, além de promover uma maior longevidade dos produtos de consumo, adotar ciclos fechados de produção e descarte (*Design* Circular) e viabilizar a produção local, são abordagens que em conjunto têm o potencial de viabilizar modelos de produção e consumo mais sustentável (CACCERE; SANTOS, 2017).

Apesar de ser uma forma de produção capaz de proporcionar benefícios para a sustentabilidade, como, por exemplo, a radical diminuição ou eliminação do transporte de materiais e produtos e seus custos associados, tal modelo deve ser adotado como alternativo e complementar ao modelo convencional de produção centralizada. Um dilema comum a ser considerado é o *trade-off* entre o alto impacto ambiental por unidade na produção distribuída por meio da fabricação digital em pequenos volumes, comparativamente com o baixo impacto por unidade do modelo convencional, mas que requer altos volumes de produção para atingir tal eficiência (KOHTALA, 2015). Neste sentido, um cenário preocupante é o aumento do consumo, produção e descarte de produtos e materiais devido o crescimento da fabricação pessoal.

A presente investigação baseia-se na hipótese de que a Economia Circular e a Produção Distribuída por meio da Fabricação Digital são modelos promissores para enfrentar a crescente complexidade dos problemas ambientais e sociais associados ao crescimento econômico advindos do sistema industrial e consumo de bens materiais. Mas para tal, torna-se indispensável desenvolver capacidades para operacionalizar o processo de adoção da Fabricação Digital e Produção Distribuída em favor da sustentabilidade. Isso inclui capacitar *designers* para o desenvolvimento e *não-designers* para a implementação de soluções socioéticas, socioeconômicas e ambientais que auxiliem as pessoas a enfrentarem os problemas vivenciados por indivíduos, comunidades e organizações com as quais se relacionam, vivem e trabalham, por meio da atividade do fazer. Dessa forma, a pergunta de pesquisa que norteia o estudo é formulada como: *Como desenvolver soluções para fabricação pessoal compatíveis com os princípios da Economia Circular e Produção Distribuída?* Nesse artigo, denominamos essa mudança de paradigma na produção e consumo, onde cidadãos utilizam o *design* aberto, a fabricação digital e modelos de produção circular e distribuída para produzir soluções em uma escala doméstica (ou pessoal) que tornem o seu ambiente imediato mais sustentável de fabricação pessoal sustentável.

2.3 Fabricação Pessoal e implicações para a sustentabilidade

O surgimento da fabricação pessoal sinaliza uma transição nos sistemas de produção e consumo onde o processo de fabricação que costumava ocorrer em ambientes especializados com o uso de ferramentas caras operadas por trabalhadores qualificados, passa a acontecer em um novo modelo de produção onde qualquer pessoa pode fabricar quase qualquer coisa utilizando ferramentas mais acessíveis (GERSHENFELD, 2005). Neste artigo, o termo fabricação pessoal refere-se a um fenômeno disruptivo mais amplo, também conhecidos como manufatura pessoal (BAUWENS *et al.*, 2012), produção de bens físicos baseada em bens comuns (TROXLER, 2013) e *making* (ANDERSON, 2014; HATCH, 2013). Nesse modelo alternativo de produção material, ao invés de comprar ou encomendar um produto, as pessoas passam a desenvolver ou baixar

arquivos digitais distribuídos na internet e produzir pessoalmente suas próprias soluções usando equipamentos de fabricação digital (GERSHENFELD, 2005). A fabricação digital viabiliza a prototipagem da solução por meio de transformação de modelos digitais em artefatos físicos através de equipamentos como fresadoras CNC, impressoras 3D e cortadoras a laser (SOOMRO; CASAKIN; GEORGIEV, 2021).

Para que a fabricação pessoal seja possível, é necessário que três processos principais sejam conduzidos: (1) usando ferramentas de *design* computacional o usuário desenvolve artefatos tridimensionais (modelos digitais, arquivos CAD) e os prepara para fabricação digital (CAM); alternativamente usuários podem baixar modelos digitais disponíveis de forma aberta (*open source*) na internet; (2) usando ferramentas controladas por computador que (re)produzem formas tridimensionais por adição ou remoção de material (manufatura aditiva e subtrativa), usuários fabricam artefatos físicos; (3) com o auxílio de ferramentas manuais os usuários fazem o acabamento e/ou montagem do produto. Para executar os três processos mencionados anteriormente com sucesso, é de suma importância que os usuários tenham acesso a informações e recursos digitais essenciais, que incluem, por exemplo, modelos digitais do produto (desenhos 2D e/ou modelos 3D), lista de materiais (BOM), especificações do produto e instruções para construir, operar, reparar e conservar a solução.

3 Metodologia

Para alcançar os objetivos da investigação apresentada nesse artigo, a execução da pesquisa baseou-se, principalmente, em recursos metodológicos relativos à pesquisa qualitativa de caráter exploratório. De forma geral, a estratégia de pesquisa adotou a seguinte estrutura: (1) revisão bibliográfica sistemática de temas relevantes para a investigação; (2) atividades projetuais para o desenvolvimento de artefatos digitais e físicos que explorem o uso de biomateriais e fabricação digital no contexto da produção circular e distribuída; (3) validação dos conhecimentos incorporados (*insights*) pela revisão de literatura e protótipos desenvolvidos através de atividades de ensino-aprendizado (*workshops*).

A revisão bibliográfica incluiu, principalmente, trabalhos científicos e livros sobre os temas Economia Circular, Produção Distribuída e Fabricação Digital. Também foram considerados títulos relacionados à abordagem de Pesquisa Através do *Design* no âmbito nacional e internacional, em especial, enfatizando a aplicação desse conhecimento no contexto da fabricação digital. Nessa investigação, as atividades de *design* e fabricação do artefato desempenham um papel fundamental no processo de construção do conhecimento, e, dessa forma, sua análise requer a adoção da prática do *Design* como uma abordagem de pesquisa acadêmica. Nesse sentido, o método adotado na condução da pesquisa requer o olhar crítico para as contribuições da atividade projetual — uma abordagem conhecida como Pesquisa Através do *Design* (*Research through Design* ou *RtD*, no idioma original) (GIACCARDI; STAPPERS, 2017). A Pesquisa através do *Design* (*RtD*) pode ser definida como uma abordagem que usa técnicas e processos da prática do *Design* como um método legítimo e rigoroso de pesquisa acadêmica (ZIMMERMAN; STOLTERMAN; FORLIZZI, 2010).

As atividades de ensino-aprendizado relatadas nesse artigo, foram conduzidas como parte da disciplina de Mestrado “Biomateriais no Contexto Global” (*Bio-based Materials in Global Settings* no idioma original) que propõe o uso de materiais de base-biológica no desenvolvimento de soluções sustentáveis no contexto da Arquitetura e *Design* de Produto. O estudo foi realizado em colaboração com a *University of Western Australia* e o *Bio-Based Materials Design Lab*, onde estudantes Australianos utilizaram conhecimentos oriundos do presente estudo para fabricar uma cadeira circular. Com base nas atividades de *design* e prototipagem realizadas pelos autores e fabricação pessoal conduzida pelos alunos, o artigo

apresenta diretrizes preliminares de projeto que auxiliam o *design* de soluções capazes de permitir a implementação da fabricação pessoal no contexto da economia circular e distribuída.

4 Resultados

O objetivo principal da presente pesquisa é oferecer diretrizes de projeto para *designers* que permitam a criação de soluções para a fabricação pessoal sustentável alinhadas aos modelos de Economia Circular e Produção Distribuída. Nesse contexto, os resultados dessa pesquisa têm o potencial de promover o tema por meio do fomento do conhecimento (diretrizes de projeto) e artefatos (protótipos funcionais), bem como prover suporte para o desenvolvimento de novos métodos e ferramentas relevantes para acelerar a transição para uma Economia Circular e Distribuída. Nas próximas sessões, os autores apresentam os resultados preliminares da pesquisa baseado na conceituação do projeto, desenvolvimento de modelos e ferramentas digitais, construção de protótipos funcionais e condução de um *workshop* de fabricação pessoal com usuários (estudantes).

4.1 Cadeira Uma

O projeto Uma nasceu em 2020, a partir de uma demanda do Instituto do Bambu em Tibar (Timor-Leste) em atender o mercado de exportação de moveis de bambu. Apesar do sucesso do Instituto na produção de móveis básicos para o mercado local, a instituição não produzia produtos compatíveis com os requisitos de mercados internacionais. O objetivo principal do projeto foi desenvolver um produto piloto com maior valor agregado que pudesse atrair o interesse do mercado de exportação e desenvolver capacidades locais presentes na agenda do Instituto (e.g., investimento em *design* de produto, novas tecnologias e técnicas de produção). Entre os desafios identificados durante a pesquisa inicial do produto, destaca-se a quantidade de material necessária para a fabricação das cadeiras do portfolio do Instituto, considerada alta devido às técnicas utilizadas (i.e., forma de laminação) e os resíduos produzidos e não recuperados no processo de fabricação. Ademais, o reprocessamento do material no final do ciclo de vida do produto é dificultado devido o uso de cola e pregos na fabricação e montagem do produto, que também tornam a desmontagem destrutiva. As cadeiras produzidas pelo Instituto do Bambu são robustas e difíceis de desmontar para o transporte, e de forma geral, o peso das cadeiras torna o custo de transporte proibitivo para o abastecimento de mercado fora do contexto local. Dessa forma, os requisitos para o novo mobiliário foram reduzir o desperdício durante a fabricação, diminuir o peso total do produto, facilitar a montagem e desmontagem e ocupar menos espaço durante o transporte (flat-pack), introduzir tecnologias emergentes de fabricação, promover a capacitação de *stakeholders* locais e atender demandas de exportação. O projeto desenvolvido para o Instituto do Bambu resultou na primeira versão da Cadeira Uma (TENORIO; DA COSTA JUNIOR, 2020). Na presente pesquisa, a cadeira continuou a ser desenvolvida para atender o contexto da fabricação pessoal sustentável, resultando na elaboração do protótipo finalizado, —Cadeira Uma (2022) (Figura 1).

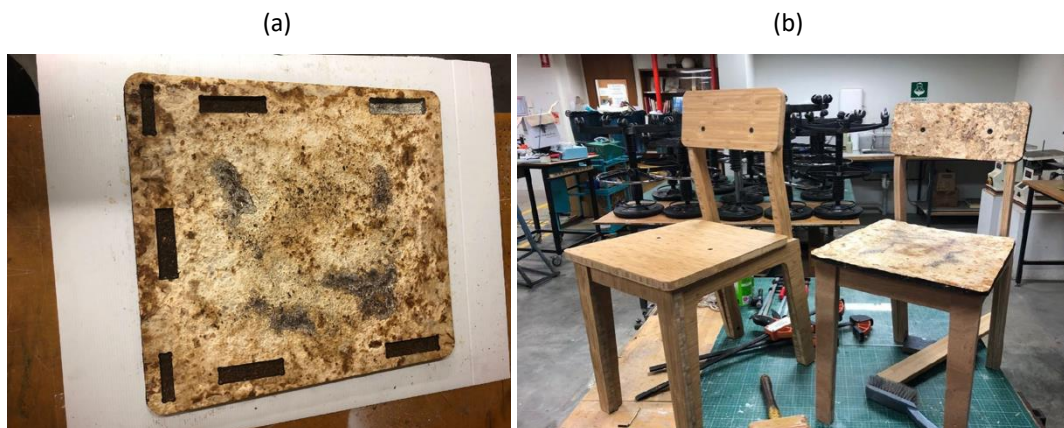
Figura 1 – Cadeira Uma Instituto Bambu (2020) (a). Cadeira Uma (2022) (b) em compensado de bambu (esquerda) e compensado naval (direita).



Fonte: Autores.

A Cadeira Uma, é um mobiliário circular otimizado para a produção distribuída por meio da fabricação digital (fresadoras CNC de 3 eixos) que tem como principal característica a fácil montagem e desmontagem. A cadeira prioriza o uso de materiais de base-biológica, como o compensado de bambu e óleo naturais não tóxicos, que são utilizados no acabamento do produto. Ela pode ser montada sem o uso de cola ou pregos (mas, utiliza cola atóxica na etapa de fabricação de um componente), utilizando apenas uma ferramenta, e desmontada completamente (e.g., separação de materiais biológicos e técnicos para fins de reprocessamento ou descarte) de forma não destrutiva com o uso de uma ferramenta adicional. Também foram desenvolvidas versões da cadeira (Uma Micélio) utilizando o biocompósito de micélio (parte vegetativa de um fungo ou colônia bacteriana) com substrato de bambu, arroz ou restos do processo de corte em CNC, explorando assim o uso de resíduos da produção como matéria prima para o desenvolvimento de novos materiais locais (Figura 2). A cadeira apresenta uma estética atemporal e incorpora diversos princípios do *design* circular, resultando em um produto modular, que pode ser customizado, adaptado e reparado.

Figura 2 – Assento em micélio fabricado em uma cortadora a laser (a). Cadeira Uma em compensado de bambu (esquerda) e micélio (direita).



Fonte: Autores.

As principais estratégias circulares adotadas no *design* da Cadeira Uma são apresentadas em detalhes no Quadro 1. Enfatiza-se que além das estratégias de design circulares direcionada a melhoria dos ciclos biológicos a técnicos, é importante atentar-se para a mudança no comportamento de consumo (e.g., suficiente ao invés de eficiente) e foco na extensão do ciclo de vida do produto, incentivando assim a promoção da economia compartilhada e adoção de sistemas produto serviço.

Quadro 1 – Principais estratégias circulares adotadas no projeto.

Estratégias de Design Circular	Descrição
i) Manter e Prolongar	A manutenção e limpeza é facilitada pela fácil (des)montagem e acabamento da superfície (lixamento fino). O produto acompanha um manual de conservação que orienta o usuário, entre outros, ao uso periódico de óleo natural de linhaça para conservar o produto.
ii) Reutilizar e Redistribuir	O manual de conservação do produto também educa os usuários e incentiva a redistribuição de móvel por meio de mudança de propriedade ao invés do descarte ao final da vida de serviço ² do produto. Propõe-se também o estabelecimento de um programa de <i>take-back</i> por meio de uma rede de espaços <i>maker</i> .
iii) Reparar, Reformar e Remanufaturar	O reparo pode ser feito facilmente através da troca da parte danificada, que pode ser produzida individualmente com o uso da fabricação digital. Da mesma forma, devido ao uso de compensado como matéria prima, que apresenta durabilidade superior a alternativas como MDF e aglomerado, é possível reformar partes e atingir uma aparência externa similar ao estado de novo. Ainda, a remanufatura pode ser atingida a partir do recolhimento de componentes usados (Programa de <i>Take-Back</i> em redes de espaços <i>maker</i>), que reformados, podem ser combinados com partes novas para criar um produto com aparência e funcionalidade igual a de um novo.
iv) Reaproveitamento e <i>Upcycling</i>	As cadeiras podem ser utilizadas para a criação de novos produtos. Está em desenvolvimento a criação de um manual de reaproveitamento que permitem a transformação da Cadeira Uma em um banco de meditação. Outro exemplo das possibilidades dessa estratégia de reaproveitamento é a Cadeira Homan, uma nova cadeira que incorpora o <i>weaving</i> no assento e encosto, e pode até mesmo utilizar componentes de outro modelos, reduzindo o uso de material e aumentando o impacto social (pela utilização de mão de obra abundante em técnicas tradicionais), através da produção distribuída no Timor-Leste.
v) Reciclagem	Todos os componentes da cadeira podem ser facilmente separados com o uso de duas chaves allen (4mm para parafusos e 6mm para buchas de fixação) de forma a permitir o reprocessamento.

² Vida de serviço de um produto é o período em que um único usuário ou organização usa um produto, considerando que o produto ainda possa entregar o desempenho técnico para o qual foi projetado.

vi) Reaproveitamento em cascata	Os resíduos da produção em fabricação digital, proveniente do corte em fresadoras CNC e as peças danificadas recolhidas de usuários que não podem ser reintroduzidas em ciclos anteriores (reparar e reformar), podem ser reutilizadas como substrato na produção do biocomposto de micélio, que é utilizado na fabricação dos assentos e encostos do modelo Cadeira Uma Micélio (Figura 2).
vii) Retorno seguro a biosfera	Para que a cadeira possa ser descartada de forma segura, os componentes não biodegradáveis como as ferragens (parafusos e buchas de fixação) podem ser facilmente separados para reprocessamento dos componentes biodegradáveis, que utilizam acabamento não tóxicos, como óleos naturais, para evitar a contaminação do ambiente (por exemplo, solo), permitindo dessa forma um processo de biodegradação seguro. Adicionalmente, a versão da Cadeira Uma micélio, tem até 50% dos materiais utilizados de rápida biocompostagem (assento e encosto) ao final de seu ciclo de vida e utiliza 50% menos materiais processados (compensado naval ou laminado de bambu), e dessa, forma reduz significativamente o consumo de energia no seu processo de manufatura e ciclo de vida. Ainda, utiliza 20% menos parafusos que a Cadeira Uma nas versões tradicionais de compensado.

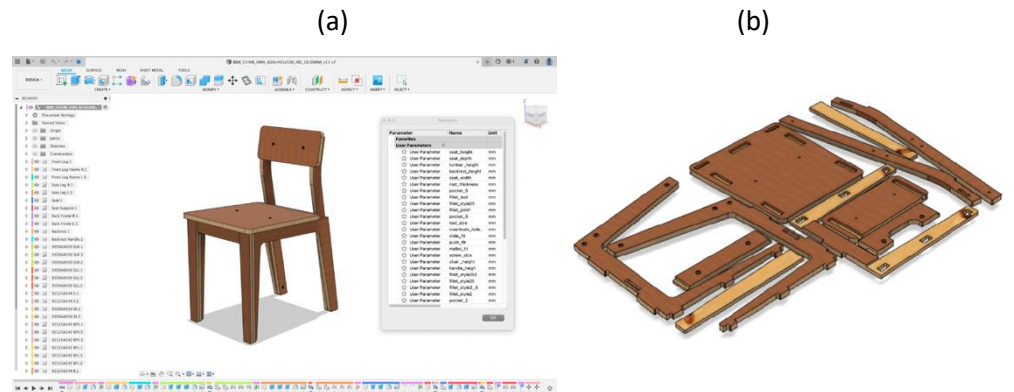
Fonte: Autores.

4.1.1 Processo de Design

O método de *design* adotado no desenvolvimento o produto foi o *Stanford Design Thinking*, que oferece uma abordagem sistemática e centrada no humano para solucionar problemas de *design*. Esse método foi utilizado com sucesso em pesquisas anteriores para explorar o *design* e prototipagem sustentável no contexto de ensino do design (SOOMRO; CASAKIN; GEORGIEV, 2021). O método consiste em cinco etapas principais: empatia, definição, ideação, prototipação e validação. A escolha do método foi motivada pelo seu formato circular e compacto, permitindo iteração e retroalimentação em ciclos curtos de criação, revisão, prototipagem e validação.

O desenvolvimento da cadeira foi conduzido de forma colaborativa seguindo o modelo “Design Global, Fabricação Local”, com membros da equipe no Brasil e Austrália. Esse modelo de design colaborativo e produção distribuída foi possível através de uso de um *cloud-based software* de modelagem paramétrica (Fusion 360™), que foi crucial para mediar o processo iterativo entre modelagem 3D, revisões técnicas e prototipagem rápida. Ademais, recursos *Algorithms-Aided Design* (AAD) foram utilizados para aumentar o uso eficiente de material (*nesting*), garantindo que o número máximo de cadeiras pudesse ser produzido por chapa de compensado.

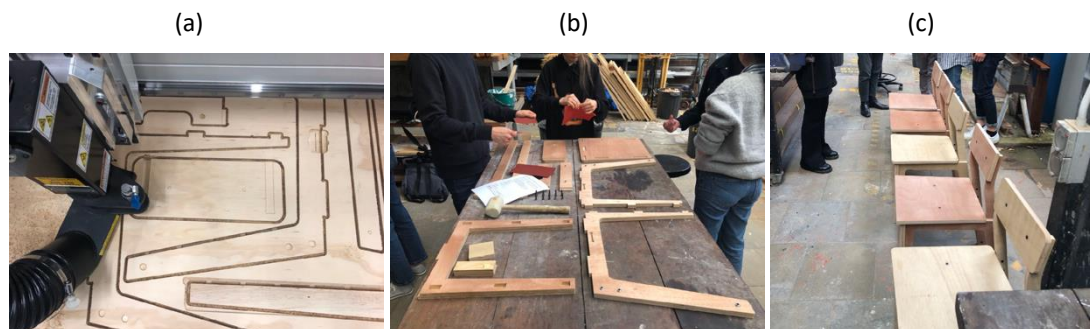
Figura 3 – Modelagem paramétrica da cadeira (a) e estudo de eficiência de corte (*nesting*) (b).



Fonte: Autores.

Para aumentar a acessibilidade e viabilizar a fabricação do produto no ambiente acadêmico (*design workshops*), bem como em infraestruturas mais modestas como espaços *makers*, a cadeira foi otimizada para fabricação em Fresadoras CNC de 3 eixos de pequeno porte, modelo considerado o mais popular e acessível do mercado (ARIZTON CONSULTING, 2021). Após a aprovação do protótipo final, toda a documentação necessária para a fabricação foi produzida, incluindo manuais e os modelos digitais (com múltiplas tolerâncias, espessuras de material e compatíveis com uma ampla gama de *softwares* CAD/CAM). Na fase de validação do produto, a cadeira foi fabricada por alunos de pós-graduação da *University of Western Australia* (UWA) utilizando recursos locais (materiais e componentes) e equipamentos disponível no *workshop* da universidade.

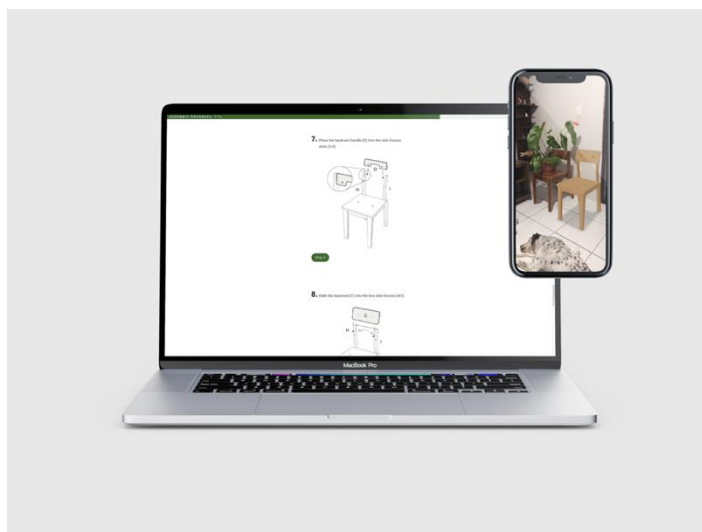
Figura 4 – Processo de fabricação (a), acabamento (b) e montagem (c) dos protótipos finais durante o *workshop* de validação.



Fonte: Autores.

Baseado em *insights* provenientes do *workshop* com alunos (como por exemplo, oportunidades para maior interação com o produto, versão digital do manual, recursos *online*), foi desenvolvida uma versão interativa do manual de montagem do produto que visa melhorar a experiência de planejamento, visualização e montagem do produto. No manual digital, atenção particular foi dedicada ao desenvolvimento de guias passo-a-passo e recursos interativos por meio do uso de realidade aumentada e recursos visuais para aumentar a acessibilidade e adequar-se ao nível de conhecimento e habilidade de usuários com menor experiência (Figura 5). Ademais, uma ferramenta de customização *online* está em desenvolvimento para facilitar o processo de adaptação do produto ao contexto do usuário.

Figura 5 – Manual de montagem interativo com guia passo-a-passo e recursos de realidade aumentada.



Fonte: Autores.

Como mencionado anteriormente, um dos principais objetivos do desenvolvimento da versão inicial da Cadeira Uma (2020) foi permitir a produção de móveis para exportação para o Instituto do Bambu, que precisam ser leves e fáceis de montar e embalar, consumindo menos espaço para transporte e também permitindo menos desperdício durante o processo de fabricação. No entanto, um dos maiores desafios para o setor do bambu em Timor-Leste é a degradação dos seus recursos de bambu, devido à má gestão (TENORIO; DA COSTA JUNIOR, 2020). Apesar de ser abundante em recursos de bambu, é um desafio estabelecer o fornecimento de material de alta qualidade ao longo do ano em Timor-Leste, o que é agravado pelas más condições das estradas (em particular, durante a estação chuvosa). Em algumas áreas, a acessibilidade é difícil devido às regiões montanhosas, falta de proximidade de estradas e devido a questões fundiárias. As plantações são pequenas e espalhadas pelo país, com baixa produtividade. Além disso, a capacidade dos agricultores de investir em mudas de bambu e plantações em terras que podem estar no centro do conflito costumeiro é um problema real em todo o país. Sem a plantação de bambu em larga escala e a resolução da posse da terra em Timor-Leste, é quase impossível desenvolver um setor comercialmente viável no país, com incentivos aos agricultores e comunidades para plantar bambu. Nesse contexto, o uso de tecnologias de fabricação digital e produção distribuída no desenvolvimento de soluções circulares com recursos locais permitiriam não apenas a geração de renda para os agricultores, mas também a proteção contra a erosão do solo, principalmente em áreas montanhosas, que é um problema significativo em todo o país.

Nas versões mais recentes da Cadeira Uma (2022), focou-se na possibilidade de habilitar qualquer pessoa a produzir a cadeira por meio da fabricação digital e ferramentas habilitadoras (manual interativo, realidade aumentada e material audiovisual educativo), bem com o uso de recurso locais e novos materiais de base-biológica. Assim, resíduos agrícolas como a casca de arroz, o próprio bambu e muitos outros podem ser utilizados na produção de substratos para micélio, permitindo maior rotação de culturas e diversidade de produção. Ademais, novas possibilidades, como por exemplo, incluir técnicas tradicionais de fabricação, como *weaving* (tecelagem), foram oportunidades exploradas para agregar valor e contribuir para a geração de renda inclusiva para indivíduos e comunidades locais. No Timor-Leste, técnicas tradicionais de fabricação passam dos mestres e mestras para os jovens, incluindo uma variedade de padrões

visuais de tecelagem, cores e materiais, como bambu e folhas de palmeiras. As diferentes versões da Cadeira Uma, oferecem oportunidades de geração de renda por meio da diversificação de culturas, crescimento de novas indústrias e desenvolvimento de cadeias circulares de produção.

4.1.2 Diretrizes para o Design e Fabricação Pessoal Sustentável

Baseados nos resultados do estudo, foi possível estabelecer diretrizes gerais de projeto que podem aumentar o sucesso da implementação da fabricação pessoal sustentável (Quadro 2). Essas diretrizes foram agrupadas em quatro categorias principais: (1) *Design*; (2) Processos; (3) Material/Componentes; (4) Usuários/Contexto.

Quadro 2 – Diretrizes de projeto para a fabricação pessoal sustentável.

Categoria	Diretrizes de Projeto
<i>Design</i>	Adote um método de <i>design</i> iterativo e cíclico que permita a revisão e refinamento dos processos, permitindo a melhoria contínua em qualquer estágio do projeto.
	Utilize a modelagem paramétrica e recursos AAD, que permitam o gerenciamento de alterações e facilitem o processo de análise, modificação e otimização dos modelos digitais, garantindo assim maior eficiência (no uso de materiais), modularidade, atualização (<i>upgradability</i>) e adaptabilidade as diversas tecnologias de fabricação digital.
	Crie modelos digitais compatíveis com softwares CAD/CAM familiares ao maior número possível de usuários e equipamentos.
	Adote estratégias de <i>design</i> circular.
Processos	Desenvolva soluções compatíveis com os princípios da economia circular e produção distribuída (produção local, (re)aquisição de materiais e componentes, fácil manutenção, redistribuição, remanufatura).
	Certifique-se que a solução pode ser fabricada em equipamento mais acessíveis em termos custo, conhecimento técnico necessário para operação e disponibilidade, bem como evite criar soluções que necessitem funções avançadas do equipamento (fresadoras com mesa com bomba a vácuo, equipamentos de grande porte).
Materiais/Componentes	Crie soluções que usem recursos locais (materiais e componentes), preferencialmente de base-biológica e não tóxicos, mas evite a perda de funcionalidade ou qualidade técnica.
	Otimize a solução para o uso de materiais e componentes que permitam a adoção estratégias de extensão da vida.
Usuário/Contexto	Envolva os usuários desde os estágios iniciais de projeto de forma a garantir que a solução possa adaptar-se as suas necessidades, bem como seu contexto de uso.
	Desenvolva soluções adequadas ao usuário e seu contexto local em termos sociais, culturais e ambientais.

Crie soluções *open-ended* que permitam a adaptação ao contexto em termos de infraestrutura disponível, normas culturais, limitações econômicas (baixo custo) e técnicas de produção.

Fonte: Autores.

4.2 Conclusão

O presente artigo explora o *design* e a fabricação pessoal sustentável de soluções compatíveis com modelos de produção circular e distribuída. Por meio de uma revisão biográfica assistemática e do *design* e fabricação de protótipos utilizando tecnologias de fabricação digital e materiais de base-biológica, foi possível criar uma solução capaz de explorar a prática da fabricação pessoal de forma sustentável. Estudantes do curso de Mestrado em Arquitetura da *University of Western Australia*, fabricaram cinco cadeiras circulares para testar os recursos digitais e didáticos oriundos da pesquisa. Destaca-se que o foco do presente estudo limita-se à aplicação de tecnologias de fabricação digital de manufatura subtrativa, mais especificamente, fresadoras CNC e cortadoras laser. Tal delimitação justifica-se pela adequação dessa tecnologia ao desenvolvimento de produtos orientados ao objeto de estudo (mobiliários e outras soluções para Habitação de Interesse Social), bem como em razão da plena aplicação dos conceitos relacionados aos temas centrais da pesquisa, como *Design* Circular, Biomateriais, Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e *Design* Distribuído. Os resultados demonstram que a solução desenvolvida (Cadeira Uma 2022) forneceu aos alunos a oportunidade de explorar a fabricação pessoal e implementar práticas sustentáveis. No entanto, permanece a necessidade de introduzir recursos apropriados (por exemplo, manuais, ferramentas, serviços e habilidades relacionadas ao *design* circular) para garantir que circularidade do produto perpetue durante toda o ciclo de vida do produto.

5 Referências

- ANDERSEN, Maj Munch; TUKKER, Arnold. Perspectives on Radical Changes to Sustainable Consumption and Production. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, [s. l.], v. 9, n. 3, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ijshe.2008.24909cae.001>
- ANDERSON, Chris. Makers: the New Industrial Revolution. In: [S. l.: s. n.], 2014.
- ARIZTON CONSULTING. **CNC Milling Machines Market - Global Outlook & Forecast 2021-2026**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5403538/cnc-milling-machines-market-global-outlook-and>.
- BAUWENS, Michel *et al.* **Synthetic overview of the collaborative economy**. [S. l.]: P2P Foundation, 2012.
- BENYUS, Janine M. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. [S. l.]: Harper Perennial, 2002.
- BRAUNGART, Michael; MCDONOUGH, William. **Cradle to Cradle: Remaking the way we make things**. [S. l.]: North Point Press, 2002.
- CACCERE, João Paulo Amaral; SANTOS, Aguinaldo dos. Agenda de Inovação para o Design de soluções orientadas à Economia Distribuída via Fabricação Digital. **Estudos em Design**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 66–86, 2017.
- COSTA JUNIOR, J. **A Systems Design Approach to Sustainable Development: Embracing the Complexity of Energy Challenges in Low-income Markets**. 244 f. 2020. - Delft University of Technology, [s. l.], 2020.

DOS SANTOS, Aguinaldo *et al.* Distributed Economies. In: VEZZOLI, Carlo; GARCIA, Brenda Garcia; KOHTALA, Cindy (org.). **Designing Sustainability for All**. 1. ed. [S. l.]: Springer International Publishing, 2021. p. 23–50. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66300-1_2

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Ellen MacArthur Foundation Website**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a Circular Economy - Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition Greener Management International**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://doi.org/2012-04-03>.

GERSHENFELD, Neil. **FAB The Coming Revolution On Your Desktop - From Personal Computers to Personal Fabrication**. New York: Basic Book, 2005. *E-book*.

GERSHENFELD, Neil. How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution. **Foreign Affairs**, [s. l.], v. 91, n. 6, p. 43–57, 2012.

GIACCARDI, Elisa; STAPPERS, Pieter Jan. Research through Design. In: [S. l.: s. n.], 2017. p. <https://www.interaction-design.org/literature/book>.

HATCH, Mark. **The maker movement manifesto: Rules for innovation in the new world of crafters, hackers, and tinkerers**. [S. l.]: McGraw-Hill Education, 2013.

HAWKEN, Paul; LOVINS, Amory; LOVINS, Hunter. Capitalismo Natural. In: [S. l.: s. n.], 1999. p. 360. Disponível em: <https://doi.org/Estante de Casa 3a prateleira>

JOHANSSON, Allan; KISCH, Peter; MIRATA, Murat. Distributed economies – A new engine for innovation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 13, n. 10–11, p. 971–979, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.12.015>

KOHTALA, Cindy. Addressing sustainability in research on distributed production: An integrated literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 106, p. 654–668, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.039>

LEBEL, Louis; LOREK, Sylvia. Enabling Sustainable Production-Consumption Systems. **Annual Review of Environment and Resources**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 241–275, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.33.022007.145734>

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, C. **Design for environmental sustainability**. [S. l.]: Springer-Verlag, 2008. *E-book*.

PAULI, Gunter. **The Blue Economy**. [S. l.]: Paradigm Publications, 2010.

SOOMRO, Sohail Ahmed; CASAKIN, Hernan; GEORGIEV, Georgi V. Sustainable design and prototyping using digital fabrication tools for education. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 1–17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13031196>

STAHEL, Walter R. The functional economy: cultural and organisational change. In: THE INDUSTRIAL GREEN GAME. Washington: National Academy Press, 1997. p. 91–100.

TENORIO, Rosangela; DA COSTA JUNIOR, Jairo. Fomenting the Bamboo Building Industry in Timor-Leste: Changing public perception, enhancing research and land governance with social partnerships. **Journal of Bamboo and Rattan**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 1–12, 2020.

TROXLER, Peter. Making the 3rd Industrial Revolution - The Struggle for Polycentric Structures and a New Peer-Production Commons in the Fab Lab Community. **FabLab: Of Machines, Makers and Inventors**, [s. l.], n. January 2013, p. 181–194, 2013.

VEZZOLI, C. *et al.* **Sistema Produto+Serviço Sustentável: Fundamentos**. Curitiba, Brazil: Editora Insight, 2018.

VEZZOLI, C.; CESCHIN, F. Designing sustainable system innovation transition for low-industrialised contexts. *In:* , 2008, Bruxelas, Belgium. **2nd Conference of the Sustainable Consumption Research Exchange (SCORE!)**. Bruxelas, Belgium: [s. n.], 2008.

ZIMMERMAN, John; STOLTERMAN, Erik; FORLIZZI, Jodi. An analysis and critique of research through design: Towards a formalization of a research approach. **DIS 2010 - Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems**, [s. l.], n. January 2014, p. 310–319, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1858171.1858228>