



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

**DESIGN PARA FABRICAÇÃO DIGITAL: DIRETRIZES E BOAS
PRÁTICAS PARA FABRICAÇÃO SUBTRATIVA**

Paulo Ricardo Domingos Magalhães

2025

CAMPO GRANDE|MS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**DESIGN PARA FABRICAÇÃO DIGITAL: DIRETRIZES E BOAS
PRÁTICAS PARA A FABRICAÇÃO SUBTRATIVA**

PAULO RICARDO DOMINGOS MAGALHÃES

Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Gilfranco Alves

CAMPO GRANDE

Junho/ 2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Ricardo Domingos Magalhães

DESIGN PARA FABRICAÇÃO DIGITAL: DIRETRIZES E BOAS PRÁTICAS PARA A FABRICAÇÃO SUBTRATIVA

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em 00 de mês de 0000, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gilfranco Alves – Orientador

Unidade: PPGEES/FAENG

Instituição: UFMS

Profa. Dar. Mayara Dias de Souza

Unidade: PPGEES/FAENG

Instituição: UFMS

Profa. Dra. Tassia Vasconcelos

Unidade: PROGRAU

Instituição: UFPEL

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero de expressar minha profunda gratidão a minha família, meus pais Francisco de Assis e Maria Zelha que me apoiam de forma incondicional em todos os momentos desta jornada.

Ao professor Gilfranco Alves, meu orientador, pelas valiosas orientações no desenvolvimento desta pesquisa e pelas decisões que guiaram cada etapa deste trabalho. Demonstrando a necessidade de pautar os processos mais críticos no meio produtivo e como a tecnologia deve ser tratada como uma aliada da sociedade.

Ao Grupo Algo+ritmo, que desde 2016 tem sido fundamental na minha formação, promovendo o aprofundamento teórico e prático sobre mediação digital, com foco na fabricação digital como ferramenta de apoio ao processo de projeto.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) e ao Programa Centelha MS I, pelo financiamento que viabilizou a aquisição de uma Máquina de Controle Numérico (CNC), equipamento essencial para a realização de diversas produções e experimentos ao longo desta pesquisa.

Ao colega Adriano de Lima, pelo generoso compartilhamento de conhecimento e espaço no galpão, pela disponibilidade das máquinas CNC *Router*, da qual a utilização foi crucial para a execução deste projeto.

À família Lima, em especial ao Lucas de Lima, que conheci durante a participação em feiras locais e com quem compartilhei a elaboração de peças, montagens e viagens para exposições. Aos seus pais, Hélio de Lima e Lúcia Vieira, pelo apoio constante nas feiras e no dia a dia e pelas valiosas ideias, como a do produto Robokub, originalmente sugerida por Lúcia. E, por fim, à Célia Ávalos, querida amiga que conheci por meio da família e que foi fundamental na reta final, colaborando na elaboração desta dissertação.

A todos, obrigado!

RESUMO

Esta pesquisa investigou a aplicação da fabricação digital no desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, com foco no reaproveitamento de retalhos gerados por máquinas CNC. Como estudo de caso, utilizou-se a Empresa Co-fabricação (COFAB), de Campo Grande - MS. Fundamentado em autores como Gershenfeld (2016), Silva (2021) e Mitchell (2009), o trabalho abordou a fabricação digital como mecanismo de otimização produtiva, em modelos distribuídos e princípios de *ecodesign*. A metodologia, baseada na Teoria de Design de Produto (Milton e Rogers, 2013), combinou análise de produtos, experimentações práticas e prototipagem física, incluindo a comercialização dos itens produzidos em eventos locais. O processo resultou em nove diretrizes e boas práticas para a fabricação subtrativa, com destaque para técnicas de otimização de planos de corte, reuso de retalhos e *design* adaptativo. A pesquisa demonstrou como o *design*, orientado pela fabricação digital, pode transformar resíduos em recursos e propõe estratégias práticas para o melhor aproveitamento de materiais em processos subtrativos com máquinas CNC fresadoras e *laser*.

Palavras-chave: Fabricação digital; Retalhos; CNC; *Ecodesign*; Otimização.

ABSTRACT

This research investigated the application of digital fabrication in the development of more sustainable products, focusing on the reuse of scraps generated by CNC machines. The Co-fabrication Company (COFAB) in Campo Grande, Mato Grosso do Sul, was used as a case study. Based on authors such as Gershenfeld (2016), Silva (2021), and Mitchell (2009), the work addressed digital fabrication as a mechanism for productive optimization, using distributed models and ecodesign principles. The methodology, based on Product Design Theory (Milton and Rogers, 2013), combined product analysis, practical experimentation, and physical prototyping, including the marketing of the items produced at local events. The process resulted in nine guidelines and best practices for subtractive fabrication, highlighting techniques for optimizing cutting plans, reusing scraps, and adaptive design. The research demonstrated how design, guided by digital fabrication, can transform waste into resources and proposes practical strategies for better material utilization in subtractive processes with CNC milling and laser machines.

Keywords: Digital manufacturing; Scraps; CNC; Ecodesign; Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Prototipagens Algo+ritmo	10
Figura 2 - Retalhos Acumulados - Caçamba de Descarte	14
Figura 3 - Etapas da Metodologia	16
Figura 4 - Etapas Complementares no Processo de Pesquisa em <i>Design</i>	17
Figura 5 - Tipos de Manufatura: Subtrativa e Aditiva	22
Figura 6 - Processo Usinagem CNC <i>Router</i> 5 Eixos	23
Figura 7 - CNC <i>Router</i> com Fresa Corte Reto	23
Figura 8 - Processo de Corte <i>Laser</i>	24
Figura 9 - Geometria do Material em Formato de Chapa	26
Figura 10 - <i>Nesting</i> de Planejamento de Corte	28
Figura 11 - Modelo de Produção Customizada e Eficiente	30
Figura 12 - Diagrama Modelo Fechado de Produção (MFP)	31
Figura 13 - Diagrama Modelo Segmentado de Produção (MSP)	31
Figura 14 - Cozinha Estilo Provençal e Estrutura para Decoração de Eventos.	33
Figura 15 - Plano de Corte e Padrão Residual.	33
Figura 16 - Cadeira Produzida e Instruções de Montagem	36
Figura 17 - Autópsia do Produto: Mesa <i>Studio Desk</i>	39
Figura 18 - Mesa <i>Studio Desk</i> Produzida	40
Figura 19 - Protótipo e <i>Mockup</i> Cadeira Roxane Modificada.	41
Figura 20 - Peças Cadeira Roxane Modificada	42
Figura 21 - Plano de Corte <i>Design Flat Pack</i> da <i>Opendesk</i> e Execução do Autor	43
Figura 22 - Processos de Acabamento	45
Figura 23 - Exposição em Feira Local das Primeiras Peças Comerciais/ Redes Sociais	46
Figura 24 - CNC <i>Router</i> (2x3m) e CNC <i>Laser</i> (60x90cm)	46
Figura 25 - Acabamentos e Peças Produzidas em <i>Laser</i>	47
Figura 26 - Diagrama Setorização Produção	48
Figura 27 - Recorte do Estoque Digital da Produção	49
Figura 28 - Abajur Plano de Corte	50
Figura 29 - Tabela de Matéria-Prima Utilizada	51
Figura 30 - Mesa de Apoio/Plano de Corte	53
Figura 31 - Modulação de uma Peça de Sobreposição	54
Figura 32 - Porta Facas, Cabideiro de Parede e Caixa em Madeira	55
Figura 33 - Produtos Oriundo de Retalho MFP	55
Figura 34 - Plano de Corte Retalho de MDF 15mm	56
Figura 35 - Banco COFAB	57
Figura 36 - Sistema de Trilhos em MDF	57
Figura 37 - Plano de Jogos Criados a partir de Retalhos em MDF e Fórmica 6mm	59
Figura 38 - Jogos em Exposição para Venda em Feira de Artesanato Local	59
Figura 39 - Plano de Corte para Peças Bloco de Montar e Dominó	60

Figura 40 - Vetor de Peças para Leitura CNC <i>Laser</i> e Peças Produzidas	61
Figura 41 - Jogos Desenvolvidos, Caixas e Peças.	62
Figura 42 - Parasitas: sapateira e fruteira com acessórios.	64
Figura 43 - Produção Banco Palito	65
Figura 44 - Plano de Corte Caixas Modulares	66
Figura 45 - <i>Hack</i> com Tijolos	67
Figura 46 - Diferentes Configurações de um Móvel e Projeção do Corte nos Retalhos	68
Figura 47 - Plano de Corte Adequado aos Retalhos e Peça Produzida	69
Figura 48 - Retalho de MDF 6mm - Mosaico Brasil e Cabeceira de Cama	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

CAD - *Computer-aided design* – Desenho auxiliado por computador

CAM - *Computer-aided manufacturing* – Manufatura auxiliada por computador

CNC - *Computer Numeric Control* – Controle numérico computadorizado

COFAB - Empresa Co-Fabricação

FUNDECT - Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul

MS - Mato Grosso do Sul

UFMS - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

MM - Milímetros

CM - Centímetros

MDF - *Medium Density Fiberboard* – Placa de Fibra de Média Densidade

HDF - *High Density Fiberboard* – Painéis de Fibras de Alta Densidade

MDP - *Medium Density Particleboard* – Painel de Partículas de Média Densidade

OSB - *Oriented Strand Board* – Painéis Orientados

DXF - *Drawing Exchange Format*

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	1
AGRADECIMENTOS.....	3
ABSTRACT.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	8
SUMÁRIO.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Contexto da pesquisa.....	11
1.2 Estrutura da pesquisa.....	13
1.3 Problema de pesquisa.....	14
1.4 Objetivos da pesquisa.....	15
1.4.1 Objetivo geral.....	15
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
1.5 Justificativa.....	16
1.6 Metodologia.....	16
2 Fabricação Digital: processos produtivos e tecnologias.....	20
2.1 Uma ferramenta de controle dos processos.....	20
2.2 Tecnologias e operações.....	22
2.2.1 A tecnologias de produção CNC.....	22
2.2.2 Materiais para fabricação digital.....	26
2.2.3 Nesting.....	28
2.3 Fabricação digital e seu modo de transformar a manufatura.....	30
2.4 Open source para produção local.....	35
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO: APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	39
3.1 Etapa 01: Autópsia de um projeto open source.....	39
3.2 Etapa 02 - Produção para atender o mercado local.....	46
3.3 Etapa 03 – Avaliação e proposição de melhorias para otimização dos retalhos....	53
3.3.1. Maximização de ocupação no plano de corte.....	53
3.3.2. Substituição de ferragens e componentes por peças de retalhos.....	57
3.3.3. Artefatos Compactos: criando em pequena escala.....	59
3.3.4. Design para previsibilidade.....	64
3.3.5. Visualizar função para os retalhos padronizados.....	65
3.3.6. Conceito Boneca Russa na otimização do plano de corte.....	66
3.3.7. Use conforme seu entorno.....	67
3.3.8. Adeque-se ao seu retalho.....	68
3.3.9. Em último caso: mosaicos.....	70
4. CONCLUSÃO.....	73
4.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	74
5. REFERÊNCIAS.....	76

6. APÊNDICES.....	79
6.1 Guia visual para aproveitamento de planos de corte CNC Router e Laser: 09 diretrizes e boas práticas em fabricação subtrativa.....	79
6.2 Artigo: Fabricação Digital: modelos de produção e design para otimização de planos de corte. Graphica, 2024.....	79
6.3 Artigo: Design para fabricação digital: Diretrizes para reduzir impactos na produção de objetos Flat pack. - Revista design, tecnologia & sociedade, 2025....	79
6.4 Artigo: Design para fabricação digital: Modelos de produção e Produtos para otimização de planos de corte - Revista Brasileira de Expressão Gráfica.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da pesquisa

O embasamento em fabricação digital apresentado, teve início em um período anterior ao recorte da pesquisa, que ocorreu efetivamente em 2016, na graduação em Arquitetura e Urbanismo, em que o pesquisador fez parte do Grupo *Algo+ritmo*. Durante esta participação do grupo de pesquisa surgiram as primeiras experimentações com a fabricação digital e a percepção de seu potencial como ferramenta de transformação na maneira de projetar e produzir objetos.

Atualmente, entende-se que os processos digitais de projeto são fundamentais para estruturar a atividade de concepção projetual, uma vez que cumprem o papel de agentes da mudança dos paradigmas da própria arquitetura e urbanismo e, por consequência, das suas atividades de ensino. (ALVES, DIAS, TRUJILLO, 2022, p. 21).

De 2016 a 2021, por meio de participação em projetos de pesquisa e extensão do grupo de pesquisa *Algo+ritmo*, iniciou-se os estudos relacionados ao conceito de fabricação digital, prototipagem e ao uso de máquinas de controle numérico (CNC), como fresadoras e impressoras 3D (Figura 1).

Figura 1 - Prototipagens *Algo+ritmo*



Fonte: (<https://habitemerg.wordpress.com/portfolio/p0-casa-dobavel/#jp-carousel-167>),

2025

O período de participação no grupo foi marcado por intensa produção e experimentação, tanto em nível prático quanto teórico. Essa vivência proporcionou uma

aproximação com o tema, ao longo de toda a graduação, influenciando de forma significativa a maneira de conceber projetos, tanto durante a formação acadêmica quanto a profissional.

De 2020 a 2022, o pesquisador desenvolve uma linha de produtos de médio e pequeno porte, utilizando a fabricação digital como processo principal de produção. Nesse período foi idealizado e desenvolvido o projeto da Empresa COFAB, que participa do Programa Centelha MS¹, como uma empresa de inovação tecnológica, viabilizando a aquisição de maquinários e ferramentas para otimizar a produção. De março a outubro de 2021, o autor atuou como bolsista na modalidade Fixação e Capacitação de Recursos Humanos - Fundos Setoriais - da FUNDECT - MS, em que a empresa COFAB, desenvolveu uma linha de produção que combinava técnicas de manufatura tradicional com fabricação digital, visando ao desenvolvimento de móveis de pequeno e médio porte.

Após o período de 2022 a 2024, o autor passa a expandir a atuação no ramo de prestação de serviços especializados de corte e usinagem computadorizada. Nessa nova frente de atuação foi exequível atender diversas demandas de *designers*, marceneiros, arquitetos, projetistas de móveis planejados, *makers*, produtores de eventos, gráficas locais e outros nichos de mercado que necessitam desses serviços.

Considerando essas experiências produtivas foi possível identificar problemas e oportunidades no uso da fabricação digital em Campo Grande - MS. Em 2022, o pesquisador inicia o Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), para auxílio no desenvolvimento de alternativas mais eficientes e sustentáveis, e documentação resultante das soluções desenvolvidas nesse período.

A partir dessa perspectiva, esse Trabalho de Conclusão de Curso busca relatar e fundamentar, com base em experiências práticas e teóricas, o uso da fabricação digital para a elaboração de estratégias de boas práticas e de *design* de produtos mais sustentáveis.

¹ Programa Centelha MS, chamada FUNDECT/FINEP N° 05/2019, objetivo: geração de novas empresas de base tecnológica; a geração de inovações que sejam de interesses sociais e empresariais; e a formação da cultura do empreendedorismo inovador, a fim de fortalecer os ecossistemas de inovação do país.

1.2 Estrutura da pesquisa

A pesquisa foi estruturada em três capítulos, investigando como a mediação digital e a fabricação digital podem contribuir para a otimização dos processos de manufatura, promovendo a criação de produtos e métodos mais sustentáveis localmente.

No primeiro capítulo, são introduzidos contextualização, estruturação da pesquisa, problema de pesquisa, justificativa, objetivos e metodologia adotada.

No segundo, é apresentado o referencial teórico da pesquisa, abordando a fabricação digital como uma ferramenta estratégica no controle e otimização dos processos produtivos. São discutidos os avanços tecnológicos, operações, materiais e técnicas de produção, com base em autores como Gershenfeld (2017), Caccere (2017), Ballerini (2017), Barros (2011), Thompson (2007) e Silva (2011). Também são exploradas as possibilidades da fabricação distribuída e do *design open source*, com apoio de Mitchell e Watt (2009), Bernardo e Cabral (2014) e Regiane Pupo (2009), evidenciando o potencial da fabricação digital para promover práticas mais sustentáveis e adaptadas à produção local.

Além disso, são abordados modelos de produção adotados por empresas como a *Opendesk*, com suporte de autores como Mitchell e Watt (2009), e Silva (2021), que fornecem embasamento para o estabelecimento do processo de produção utilizado pela empresa COFAB. O capítulo também aborda a fabricação digital como uma oportunidade para práticas voltadas ao *ecodesign*, com base nos estudos de Silva (2021), evidenciando seu papel no desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e adaptadas ao contexto local. Os referenciais teóricos e *insights* apresentados são fundamentais para compreender como a tecnologia tem moldado as formas de fabricar e distribuir produtos no cenário contemporâneo.

O terceiro, apresenta o desenvolvimento prático da pesquisa, com foco na aplicação de técnicas de fabricação digital, por meio do estudo de caso da empresa COFAB. A seção inicia-se com a aplicação da metodologia de *design* de produto proposta por Milton e Rodgers (2013), sendo ela a autópsia de um projeto *open source*, no qual é feita a análise e produção de um objeto de *design flatpack*, destacando seus aspectos formais, produtivos e aproveitamento de matéria prima. Na sequência, são abordadas as etapas de produção desenvolvidas para atender ao mercado local, detalhando os planos de corte de nove meses da produção da COFAB, dedicados à criação de móveis de

pequeno e médio porte com base no conceito *flatpack*. Por intermédio de diagramas, imagens e prototipagens são apresentadas experiências, que envolveram a adaptação de projetos e validações pela prototipagem física. Essa fase foi orientada pelos princípios de *design* da *Opendesk*, pelas diretrizes de *ecodesign* de Silva (2021) e pelos processos metodológicos descritos por Milton e Rodgers (2013).

A pesquisa avança para uma avaliação crítica e proposição de melhorias nos processos produtivos, com foco na otimização dos retalhos gerados durante o corte. Como resultado são apresentadas nove diretrizes de boas práticas para o *design* de produtos fabricados digitalmente, e, nelas são abordadas estratégias como maximização de aproveitamento no plano de corte, substituição de ferragens por peças reaproveitadas, compactação dos artefatos, previsibilidade no *design*, padronização de retalhos e adaptações criativas conforme o material disponível. Esses princípios buscam orientar o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, replicáveis e eficientes no uso dos recursos locais.

1.3 Problema de pesquisa

De 2020 a 2024, a experiência prática no uso de tecnologias de fabricação digital, para atendimento de demandas de produção de móveis de pequeno porte e atendimento de serviços de cortes diversos, revelou uma contradição significativa: de um lado, as tecnologias CNC aumentaram a produtividade, e, de outro, não trouxeram estratégias de sustentabilidade. Essa desconexão tornou evidente o problema relacionado ao alto desperdício de matérias-primas na produção de móveis, peças decorativas, cenários, peças técnicas, itens gráficos, formas complexas, dentre outros produtos.

Parte do problema foi identificado na ausência de métodos padronizados para a otimização dos planos de corte com formas complexas, na falta de estratégias para o reaproveitamento dos retalhos e na inexistência de protocolos claros para o manejo das sobras pós-produção. Além disso, o barateamento das tecnologias de fabricação digital contribui para o acesso de máquinas CNC por um público novo de *hobbistas*, *marceneiros*, *designers* e empreendedores. Abrão (2020), alerta que tal acesso não garante que o indivíduo esteja apto para tal atividade, e é isso que o distingue do *designer* “especialista”, que compreende de forma mais ampliada as questões que envolvem metodologia, especificidades técnicas e qualidade do projeto. O resultado é um sistema

que, embora esteja tecnologicamente avançado, continua gerando desperdícios evitáveis. (Figura 2).

Figura 2 - Retalhos Acumulados - Caçamba de Descarte



Fonte: autor, 2025

A Figura 02 ilustra a quantidade de retalhos gerados durante a produção de peças por meio da tecnologia CNC Router. A imagem evidencia uma elevada taxa de perda de matéria-prima, resultante não apenas da complexidade geométrica das peças cortadas, possibilitadas pela fabricação digital, mas também da ausência de um planejamento estratégico orientado ao reaproveitamento dos resíduos. A inexistência de diretrizes específicas para a reutilização ou otimização desses materiais contribui diretamente para o aumento do desperdício e compromete a eficiência dos processos de fabricação digital.

1.4 Objetivos da pesquisa

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a integração da fabricação digital em processos produtivos, com foco na minimização dos impactos ambientais da manufatura subtrativa (especialmente máquinas CNC *Router* e *Laser*). A partir de um estudo de caso aplicado, busca-se desenvolver e validar estratégias para otimização de planos de corte e

reaproveitamento de resíduos, propondo alternativas concretas que associam eficiência produtiva e sustentabilidade.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desenvolver produtos que possam ser fabricados e comercializados com menor impacto ambiental e valor de produção a partir da otimização dos planos de corte.
- Analisar e quantificar a base de dados de planos de cortes executados na produção de mobiliários *flatpack*.
- Estabelecer técnicas de otimização da produção a partir do uso de máquinas CNCs de tecnologia subtrativa.
- Estabelecer estratégias e prototipar produtos que utilizem princípios de *Ecodesign* aliados à fabricação digital subtrativa.

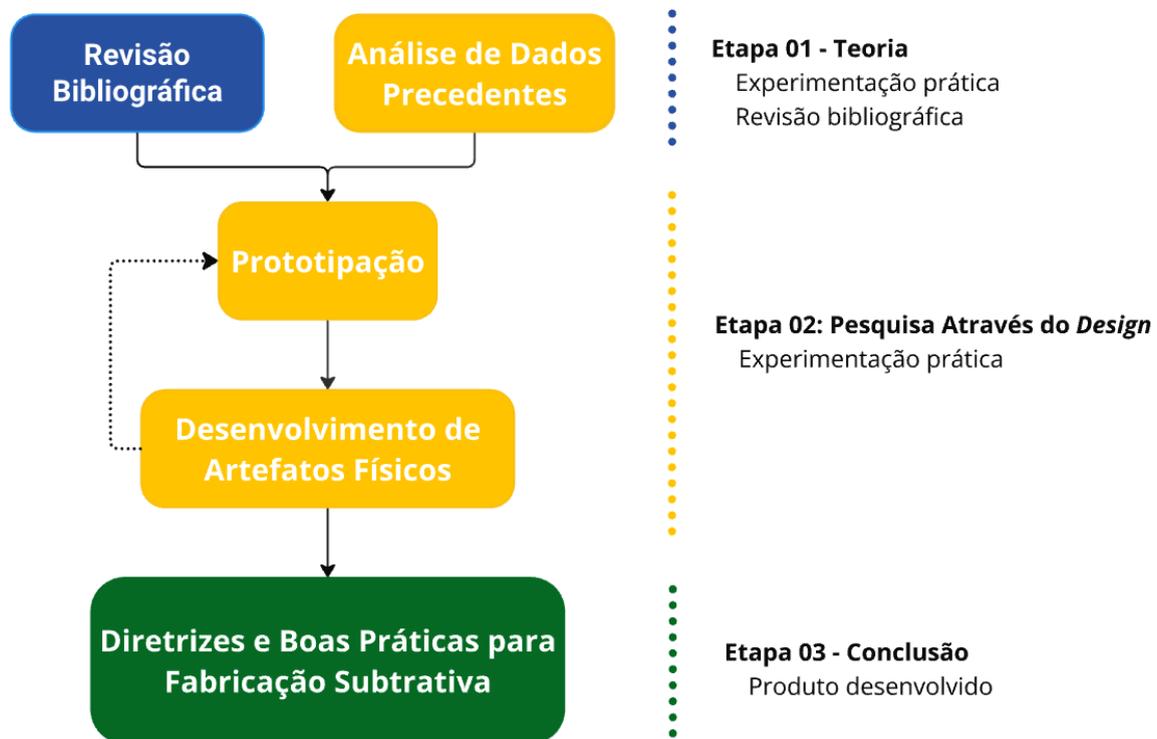
1.5 Justificativa

Diante dos desafios contemporâneos relacionados aos impactos produtivos, este trabalho investiga a relevância das máquinas de controle numérico computadorizado (CNC) como ferramentas estratégicas em abordagens projetuais voltadas à otimização de recursos e à minimização de desperdícios. Com sua crescente popularização, essas tecnologias não apenas despontam como alternativas aos meios de produção convencionais, mas também se consolidam como agentes integradores nos processos de *design*. Essa integração permite uma gestão mais eficiente da matéria-prima, viabiliza a produção customizada em pequena escala e contribui significativamente para o desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental e maior durabilidade.

1.6 Metodologia

A abordagem de desenvolvimento desta pesquisa foi organizada em três (3) etapas, conforme apresentado a seguir na Figura 3.

Figura 3 - Etapas da Metodologia



Fonte: autor, 2025

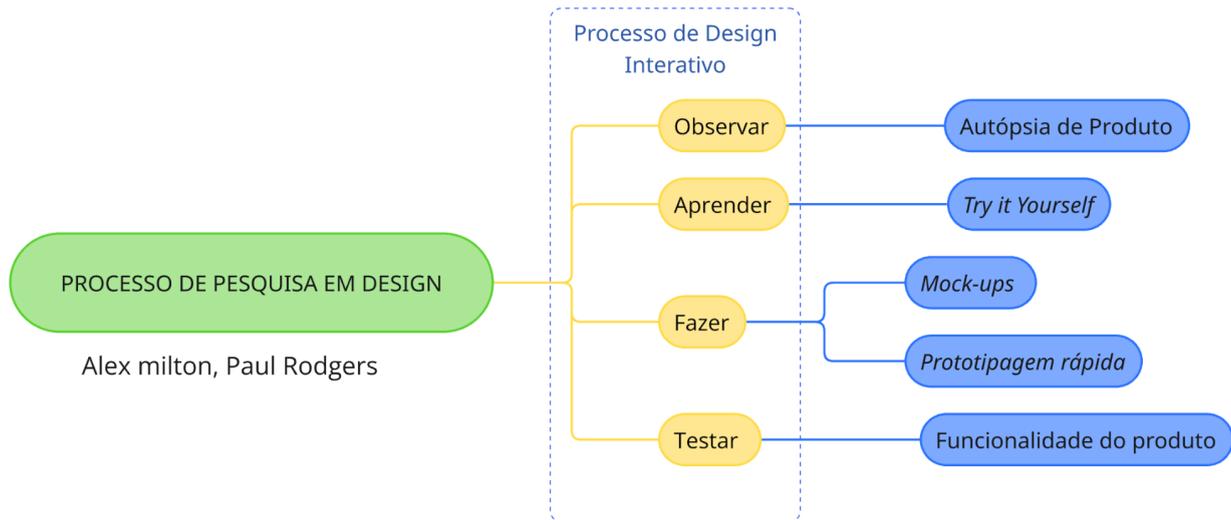
A primeira etapa, envolveu a organização e a análise de dados previamente coletados, especificamente durante o período de atuação do pesquisador como bolsista pela FUNDECT - MS, uma vez que foi desenvolvida uma linha de produção que integrava técnicas de manufatura tradicional com fabricação digital para a criação de móveis de pequeno e médio porte. Paralelamente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os temas Fabricação Digital, *Design* de Produto e *Ecodesign*, utilizando como base livros, artigos científicos, teses, dissertações e fontes *on-line*.

Na segunda, foi usada a metodologia em *design de produto* proposta por Milton e Rodgers (2013), que se constitui em uma pesquisa por meio do *design* ou “pesquisa baseada na prática”, buscando uma reflexão por meio da prática produtiva integrada aos conceitos teóricos abordados. Nessa etapa, buscou-se a coleta de dados por intermédio da modelagem dos elementos e *softwares* 3D, prototipagem e desenvolvimento de produtos.

Além disso, foram adotadas quatro (4) etapas complementares, (Observar, Aprender, Fazer e Testar), ao desenvolvimento da pesquisa, com base no livro Métodos

de Pesquisa *para Design de Produto* de Milton e Rodgers (2013), que propõe o processo de *Design Interativo* (Figura 4). Cada uma dessas etapas contribuiu para consolidar um conhecimento prático-teórico voltado à criação de estratégias e boas práticas para a fabricação digital subtrativa.

Figura 4 - Etapas Complementares no Processo de Pesquisa em *Design*



Fonte: autor, 2025

A primeira etapa complementar consistiu na **autópsia de produto**, um método de análise detalhada de produtos já existentes. Essa abordagem permitiu compreender as decisões de projeto envolvidas, como seleção de materiais, técnicas de fabricação, componentes utilizados e aspectos estéticos, fornecendo referências concretas para o desenvolvimento de novos produtos.

Na segunda complementar, foi aplicada a técnica **Try It Yourself**, que envolveu a experimentação direta de produtos similares aos que estavam sendo projetados. Essa simulação de uso por parte do próprio pesquisador possibilitou observar aspectos como montagem, funcionalidade e acabamento. As experiências foram documentadas por meio de fotografias, diagramas, modelos 3D, gerando insumos práticos para orientar decisões futuras no processo de projeto.

Na terceira complementar, para validar conceitos iniciais, construíram-se **mock-ups** (modelos físicos) em menor escala ou em escala real. Esses modelos simplificados permitiram testar proporções, escala e interação física antes de avançar

para protótipos mais complexos, na sequência envolveu-se a **prototipagem rápida**, com a produção de protótipos funcionais por meio de técnicas como corte a *laser* e usinagem CNC.

Na quarta complementar, as peças foram oferecidas para comércio em feiras e eventos locais. Essa etapa permite a validação direta dos usuários, das funcionalidades sugeridas e qualidades físicas, tornando essenciais para refinar detalhes do produto, assegurando que o *design* final atenda às necessidades e expectativas do público.

O produto da pesquisa consistiu no desenvolvimento e na criação de estratégias de *design* para otimizar o aproveitamento de materiais, utilizando retalhos e áreas de sombra provenientes de planos de corte. Além disso, são realizadas análises dos resultados obtidos, culminando na elaboração de estratégias e boas práticas para aplicação em processos de fabricação subtrativa.

Dessa forma, a pesquisa demonstrou como a abordagem prática-teórica pode enriquecer o processo de desenvolvimento de produtos, criando soluções mais embasadas, eficientes e centradas na sustentabilidade e usuário.

2 Fabricação Digital: processos produtivos e tecnologias

2.1 Uma ferramenta de controle dos processos

Segundo Neil Gershenfeld (2017), a fabricação digital inaugura o que ele denomina de terceira revolução digital, marcada pela integração entre os domínios do digital e do físico — ou, conforme sua definição conceitual, pelo controle direto sobre "átomos" a partir da manipulação de "bits". Essa transformação torna-se possível por meio do uso integrado de tecnologias de CAD (Desenho Assistido por Computador) e CAM (Manufatura Assistida por Computador), que permitem, via *softwares* especializados, a tradução de modelos digitais em instruções numéricas que são enviados para máquinas de controle numérico (CNC) e fazem a produção física. Como resultado, torna-se viável a fabricação de objetos com elevado grau de customização e adaptabilidade, capazes de atender a uma ampla gama de especificações, preferências e requisitos técnicos.

Com isso, a fabricação digital não só aprimora o controle dos processos de produção, como também transforma significativamente o modo como as indústrias, o ensino acadêmico e os projetistas operam. Caccere (2017) argumenta que, com a implementação de máquinas CNC (máquinas de controle numérico) nos processos produtivos, elimina-se a necessidade de intermediários entre o projeto e a produção. Isso se deve a possibilidade de controle das etapas de produção diretamente por um arquivo digital, por meio de dados numéricos (*file-to-factory*²).

O uso de *softwares* de modelagem 2D/3D e das ferramentas de fabricação digital transformou radicalmente os processos de criação e produção. A inserção do computador no ambiente industrial marcou uma verdadeira revolução, impulsionando o avanço da linguagem computacional e da tecnologia da informação. Essa convergência permitiu uma interação direta entre o projetista, a codificação digital e a fabricação, eliminando as barreiras entre o virtual e o material Ballerini (2017).

Essa transformação não apenas otimiza a precisão e a eficiência, mas também redefine os limites entre concepção e materialização, consolidando a fabricação digital como um novo pilar da indústria. Barros (2011) acredita que essa abordagem possibilita uma produção mais ágil e precisa, trazendo benefícios nas definições de projetos. Como

² *FILE-TO-FACTORY* - do arquivo para a fábrica, tradução livre; maneira direta com a qual os dados de determinado projeto digital 2D ou 3D se relacionam com o início de uma produção controlada por computador. (CACCERE, 2017)

resultado, observa-se uma maior proximidade entre o projetista e o processo de fabricação. Além disso, essa aproximação permite posições estratégicas na definição do artefato/produto a ser produzido e com isso é possível desenvolver sistemas dinâmicos, em oposição aos objetos estáticos e de difícil reconfiguração, o que resulta em maior flexibilidade e eficiência nos processos produtivos.

Novos processos de projetos e produção surgem na medida em que novas tecnologias são incorporadas à arquitetura e ao *design* de produto. Com o avanço e a disseminação dos meios digitais, o modo de projetar produzir vem passando por grandes transformações. Novos níveis de automação, desempenho e customizações podem ser exploradas na elaboração de soluções para problemas de *design*, arquitetura e engenharia. (BARROS, 2011, p.12).

Outro ponto está na disseminação da fabricação digital entre *designers*, arquitetos, marceneiros, pequenos produtores, *makers* e hobbistas. Com isso, torna-se essencial estabelecer padrões de produção adequados às tecnologias utilizadas. A abertura para novos padrões de consumo, apesar de positiva, expõe algumas limitações como a compreensão ainda superficial das tecnologias por parte dos *designers* e pequenos produtores e o conseqüente estabelecimento de padrões de produção. Gershenfeld (2017) argumenta sobre a necessidade de uma alfabetização para a fabricação digital (*fab Literacy*), pois o processo requer uma variedade de novas competências, como o uso de *software* CAD e CAM, familiaridade com *hardware* aditivo e subtrativo, e o conhecimento das propriedades dos materiais. Além disso, exige habilidades como *design thinking*³, criatividade, colaboração, solução de problemas e resiliência, e por fim, é necessário integrar esses conhecimentos e habilidades de forma eficaz, o que ainda é um desafio, dada a diversidade de disciplinas e domínios envolvidos.

Definimos a alfabetização fab (*fab Literay*) como as competências sociais e técnicas necessárias para alavancar as tecnologias de fabricação digital para atingir objetivos pessoais e profissionais significativos, bem como um compromisso com o uso responsável das tecnologias. (GERSHENFELD, 2017, p. 64).⁴

³*Design thinking* é fundamentado em princípios essenciais, incluindo empatia, experimentação e prototipação, que visam entender as necessidades dos usuários, gerar ideias criativas e testar soluções. Esse processo é realizado em quatro fases: imersão, ideação, prototipação e realização. SEBRAE (2022).

⁴Do Inglês: we define fab literacy as the social and technical competencies necessary for leveraging digital fabrication technologies to accomplish personally and professionally meaningful goals, as well as a commitment to the responsible use of the technologies. We cannot build toward a more self-sufficient, interconnected, and sustainable society without widespread fab literacy.

Pupo (2009) analisa como as novas tecnologias de fabricação digital aplicadas ao projeto revolucionam a forma como se produz, avalia, fabrica e constrói. Pupo utiliza o campo da arquitetura para estudar e introduzir conceitos sobre as tecnologias de prototipagem e fabricação digitais, mostrando como seu uso no processo de projeto pode levar a uma produção mais responsável. Para isso, é fundamental implementar esses conceitos de forma eficaz no desenvolvimento dos projetos.

Os arquitetos têm desenvolvido novos “vocabulários” não somente para a produção final dos produtos, mas também para modelos físicos (maquetes), graças a uma variedade de ferramentas e técnicas que têm surgido para completar as tradicionais, potencializando todo o processo de projeto. A prototipagem digital é uma delas. Diversas técnicas para a produção de modelos físicos se utilizam da modelagem 3D, produzida com o avanço de *software* e programas mais interativos e amigáveis, na transformação do desenho visualizado no computador para a maquete física. (PUPO, 2009, p. 02)

Dessa forma, termos como *digital design*, prototipagem digital, CAD, CAM, *file to factory*, corte a laser, router, *nesting*, plano de corte, produção aditiva e subtrativa, entre outros, passam a compor o vocabulário essencial na investigação dos processos digitais de projeto e fabricação. Neste primeiro momento da pesquisa, é explorada a aplicação da fabricação digital em modelos de produção local, como no desenvolvimento de uma linha de mobiliários e na prestação de serviços de corte computadorizado, voltados a diferentes públicos, produtos e materiais. A partir desses processos práticos, são extraídos os experimentos que fundamentam a pesquisa, abordando aspectos como os materiais empregados, os maquinários e ferramentas utilizados, bem como os métodos adotados, com ênfase em estratégias de otimização.

2.2 Tecnologias e operações

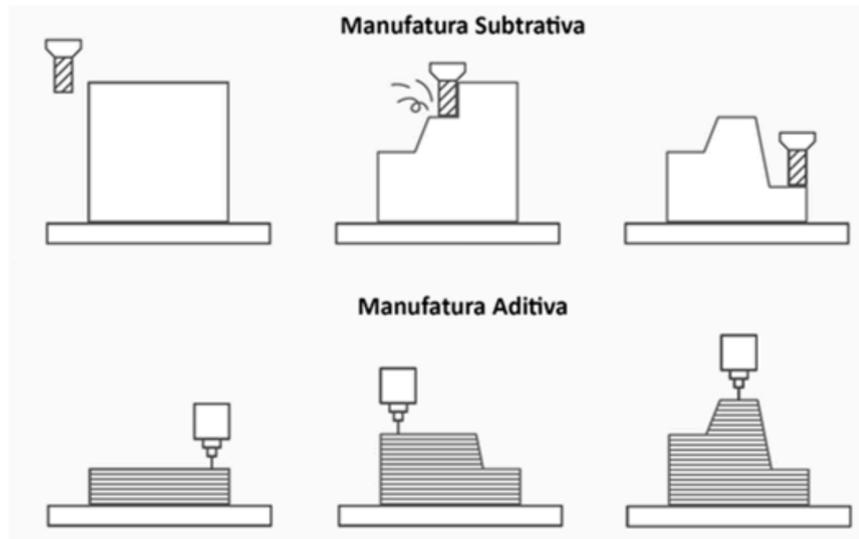
2.2.1 A tecnologias de produção CNC

Segundo Ballerini (2017), na atualidade, a maioria dos processos de produção industrial adota ao menos uma etapa com máquinas controladas numericamente. Esses sistemas permitem grande flexibilidade, incorporando novos materiais e aplicações constantemente.

A aplicação das tecnologias CNC no design e na fabricação de objetos permite explorar diferentes estratégias produtivas, entre elas os processos subtrativos, que

envolvem a remoção de material de uma peça sólida para criar a forma desejada, e os processos aditivos, como a impressão 3D por sobreposição de camadas. (Figura 5)

Figura 5 - Tipos de Manufatura: Subtrativa e Aditiva

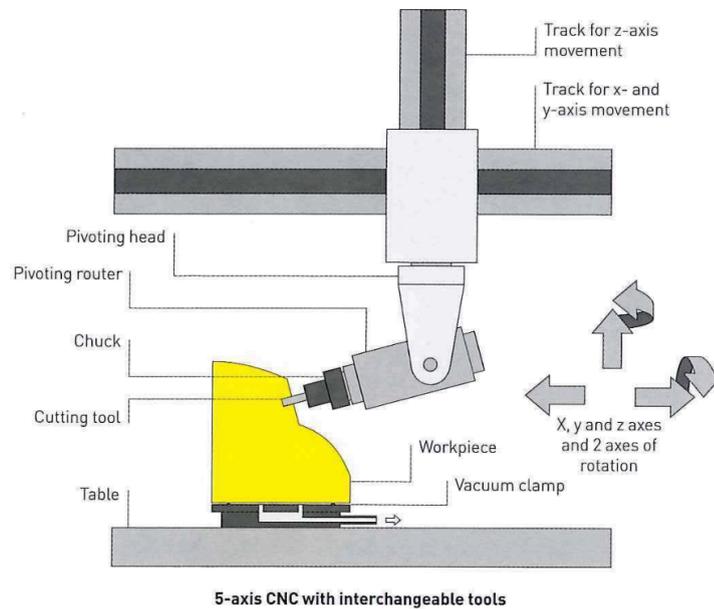


Fonte: Lajarin, 2017

Nos processos subtrativos, um bloco de material é esculpido através do desgaste controlado por fresas, que se movem em múltiplas direções, ou com o auxílio de eixos rotatórios que diminuem a necessidade de deslocamento da ferramenta (BALLERINI, 2012). Dentre os sistemas subtrativos, as máquinas mais utilizadas são as fresadoras *router* e corte laser, que operam a partir de eixos cartesianos (X, Y e Z), movimentando a ferramenta ou feixe de laser.

A fresadora CNC *Router* utiliza um método subtrativo para modelar a peça, esculpindo em uma chapa ou bloco de material, e para isso usa uma tupa ou *spindle* em sua ponta para realizar o trabalho de corte. Na Figura 6 é apresentada uma CNC router de 5 eixos. Devido ao eixo rotativo é possível inclinar a ferramenta de corte em diferentes ângulos, aumentando a versatilidade da usinagem.

Figura 6 - Processo Usinagem CNC Router 5 Eixos



Fonte: Thompson, 2007

Thompson destaca que as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem por CNC *router* são diversas e variam conforme o tipo de corte ou acabamento desejado, vão desde fresas laterais e frontais, brocas de rasgo e perfilamento, até fresas de ponta esférica, ideais para superfícies, usinagens e acabamentos precisos. Na Figura abaixo é apresentada a máquina CNC *router* com fresa para corte reto.

Figura 7 - CNC Router com Fresa Corte Reto

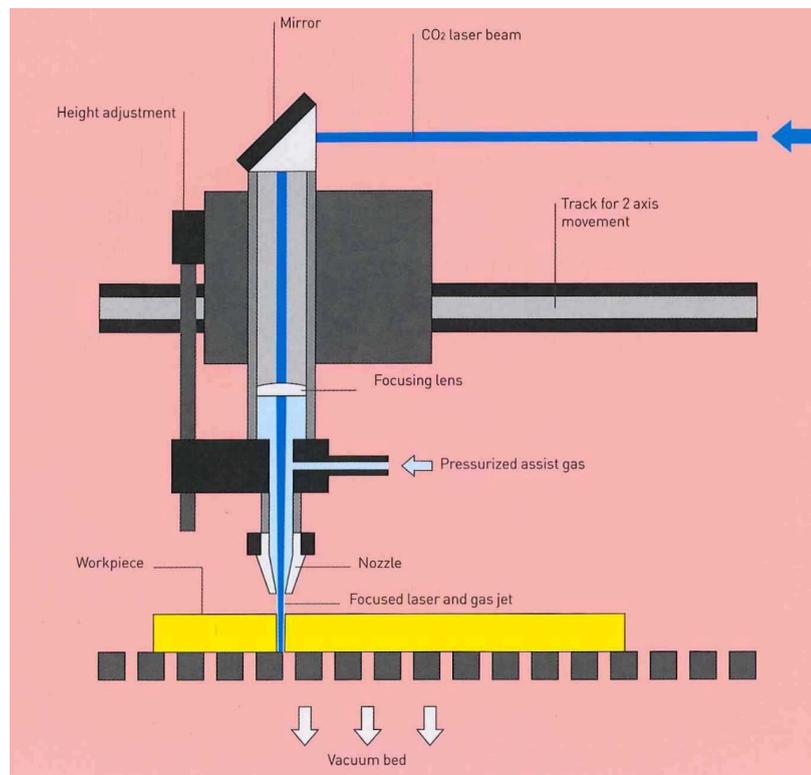


Fonte: autor, 2025

A evolução desses sistemas tem ampliado as possibilidades de projeto, especialmente com o uso de cabeçotes automatizados e trocadores de ferramentas que aceleram o processo produtivo e otimizam a precisão. A mesa de sacrifício de uma máquina de CNC *router* também pode dispor da tecnologia de sistema de vácuo, que automatiza e agiliza o processo de fixar a peça a ser usinada. Além disso, as tecnologias emergentes como robôs CNC de múltiplos eixos, que operam de forma mais livre no espaço, apontam para um futuro de fabricação ainda mais flexível e adaptável.

Nos sistemas de corte a laser, feixes de laser de CO₂ são conduzidos até o bico de corte por meio de uma série de espelhos fixos. O feixe é concentrado por uma lente, que foca a luz em um ponto extremamente pequeno, com diâmetro entre 0,1 mm e 1 mm. A altura dessa lente pode ser ajustada de acordo com a superfície do material, garantindo precisão no foco. A alta concentração de energia nesse ponto focal é suficiente para derreter ou vaporizar o material ao contato.

Figura 8 - Processo de Corte Laser



Fonte: Thompson, 2007

A pré-programação detalhada de cada operação — característica essencial dos sistemas CNC — permite não apenas a padronização e repetição de peças, mas também

o controle preciso do material a ser retirado ou adicionado, o que é fundamental quando se busca eficiência, redução de desperdícios e aproveitamento de retalhos no contexto do *design* sustentável.

O tempo de ciclo é rápido, mas depende da espessura do material. Materiais mais espessos levam consideravelmente mais tempo para serem cortados. O processo requer muito pouca mão de obra. No entanto, arquivos CAD adequados devem ser gerados para a máquina de corte a laser, o que pode aumentar os custos iniciais. (THOMPSON, 2007, p. 249)⁵

Outro fator importante do uso de máquinas CNC laser que difere da CNC fresadora *router*, está em que o processo laser não processo não exerce pressão sobre a peça, permitindo a produção de peças pequenas com alto grau de detalhes sem distorcer a peça, além da possibilidade de experimentação de diversos materiais.

2.2.2 Materiais para fabricação digital

Silva (2011) esclarece que os sistemas subtrativos utilizam materiais em estado sólido com formatos previamente definidos. Esses sistemas abrangem uma ampla variedade de materiais — como madeiras, polímeros e metais — e empregam diferentes processos para subtrair material por meio de operações de corte e usinagem. No caso específico da tecnologia CNC *router*, os materiais são usualmente processados no formato de chapas, lâminas ou placas. Essa padronização é amplamente adotada na indústria, sendo possível encontrar nesse formato diversos tipos de materiais, como metais, polímeros e derivados da madeira.

A empresa *Opendesk*, em seu *site* oficial, mantém uma série de artigos relacionados à fabricação digital e é possível observar uma padronização global na produção de dimensões espessuras de chapas de compensados, que serão as chapas de maior uso no projeto da pesquisa.

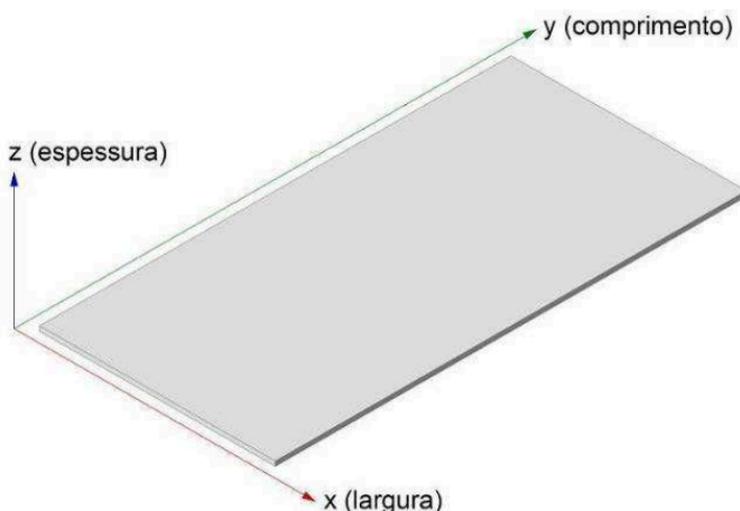
Existem muitas espessuras disponíveis em chapas, que variam de acordo com o tipo de material, mas tendem a ser bastante consistentes em compensados. Por exemplo, o compensado com face de bétula está comumente disponível em espessuras métricas de 6 mm, 12 mm, 18 mm e 24 mm. Espessuras diferentes têm qualidades diferentes, incluindo resistência,

⁵Cycle time is rapid but dependent on material thickness. Thicker materials take considerably longer to cut. The process requires very little labour. However, suitable CAD files must be generated for the laser cutting machine, which may increase initial costs.

resistência à flexão e flexibilidade, e usamos principalmente 18 mm e alguns 24 mm. (OPENDESK, 2017).

As principais características que afetam o processo de usinagem CNC são relacionadas à geometria da chapa, mais especificamente suas dimensões nos eixos X, Y e Z, correspondentes à largura, comprimento e espessura do material (Figura 9). Esses parâmetros determinam tanto a estratégia de corte quanto a configuração adequada das ferramentas, velocidade e profundidade de usinagem, impactando diretamente na qualidade final da peça e na eficiência do processo produtivo.

Figura 9 - Geometria do Material em Formato de Chapa



Fonte: Silva, 2011

Além do uso de chapas de compensado e MDF, destacam-se os materiais laminados, como a Fórmica e o PET, amplamente empregados na marcenaria. Sua aplicação ocorre, em geral, por meio da colagem direta sobre o compensado ou MDF, sendo utilizados para acabamentos diversos, como tamponamentos, frentes de portas e fechamento de armários. Essas lâminas são comercializadas em diferentes cores e apresentam espessuras entre 1 e 3 mm, com dimensões que variam de aproximadamente 60 centímetros até 5 metros, o que possibilita ampla versatilidade nos processos de revestimento e acabamento. Nos produtos desenvolvidos os laminados foram usados como elementos, cortados em cnc laser, como detalhes em peças menores, como jogos,

e substituindo processos tradicionais a exemplo da pintura ou da impressão pela colagem de componentes.

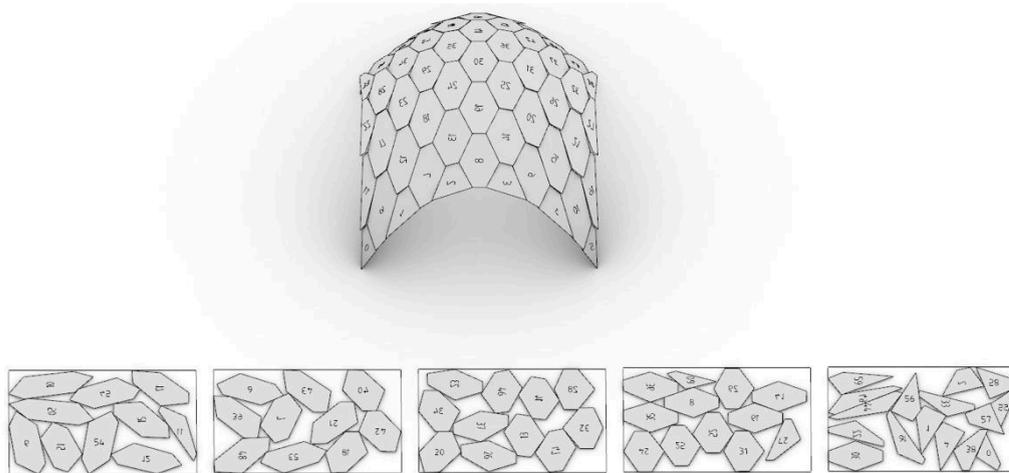
2.2.3 Nesting

O termo *nesting*, traduzido literalmente do inglês como "aninhamento", trata-se de uma técnica voltada à distribuição otimizada de peças planas sobre uma superfície, buscando o melhor aproveitamento possível da matéria-prima. Em sistemas CAD/CAM aplicados à fabricação digital, como no uso de máquinas CNC de fresagem, o *nesting* organiza geometrias a serem cortadas sem sobreposições, considerando suas dimensões, formatos e relações espaciais, a fim de reduzir desperdícios. Esse processo pode ser aplicado tanto a peças regulares quanto irregulares, sendo especialmente relevante em contextos de produção sob demanda ou de séries limitadas, como ocorre com frequência na prototipagem digital. Thompson (2007) destaca que a ordenação das peças nas chapas é essencial para reduzir o consumo de material, o tempo de ciclo e os custos em geral.

Outra vantagem do *nesting* está na sua integração com *softwares* que identificam automaticamente as peças durante o processo, muitas vezes gravando informações diretamente sobre os elementos cortados, o que facilita significativamente a montagem posterior dos objetos.

Nesse contexto, Abrão (2020) destaca o uso do *software Rhinoceros*, utilizado para modelagem tridimensional com precisão em diferentes escalas, e de seu *plugin Grasshopper*, que permite a criação de algoritmos visuais para a automação de tarefas repetitivas e a parametrização de modelos. O *Grasshopper* funciona como um editor de algoritmos com interface gráfica e permite desenvolver lógicas específicas para organização de planos de corte e distribuição de peças, incluindo o uso do *plugin OpenNest*, voltado à otimização do aproveitamento de chapas planas. Essa abordagem torna o processo de *nesting* mais flexível e adaptável às particularidades de cada projeto, reduzindo a necessidade de ajustes manuais e promovendo um controle mais eficiente dos critérios de reaproveitamento.

Figura 10 - Nesting de Planejamento de Corte



Fonte: <https://www.food4rhino.com/app/opennest>, 2025

A Figura ilustra a aplicação de técnicas de nesting para o corte de elementos com geometrias complexas. As peças são numeradas para identificação durante a montagem e estrategicamente distribuídas nas chapas de corte. Embora esse processo otimize o uso da matéria-prima, observa-se um significativo desperdício decorrente das formas irregulares dos componentes, que geram espaços vazios entre os cortes.

Além da economia de matéria-prima, o *nesting* contribui diretamente para a eficiência operacional do processo produtivo. Ao organizar previamente os caminhos das ferramentas de corte, é possível reduzir o tempo de *setup* da máquina e evitar colisões entre peças e ferramentas, aspecto destacado por Ferrary (2015). Isso não apenas assegura a integridade do produto, como também reduz o tempo total de operação da máquina CNC, impactando positivamente no custo da produção, que frequentemente é calculado com base no tempo de usinagem.

Nesting é a disposição das peças em uma chapa para corte. A eficiência do material é uma consideração essencial para qualquer *designer* com consciência ambiental. É importante projetar um móvel levando em consideração o material do qual ele será cortado. Não fazer isso pode resultar em *designs* ineficientes, extremamente dispendiosos. Recomendamos deixar 20 mm entre as peças e ao redor da borda da tábua. (OPENDESK, 2017).

Portanto, o *nesting* configura-se como uma etapa estratégica da fabricação digital, permitindo alinhar economia de recursos, precisão técnica e controle produtivo,

especialmente em processos que envolvem máquinas CNC e produção distribuída. E para a pesquisa ele se torna um elemento essencial na maximização da ocupação dos planos de cortes com peças diversas.

2.3 Fabricação digital e seu modo de transformar a manufatura

Ao contrário da investigação científica tradicional, a investigação em *design* não se preocupa com o que existe, mas com o que deveria ser. Segundo Milton e Rodgers (2013), enquanto a investigação científica baseia-se e utiliza explicações matemáticas abstratas, a investigação em *design* utiliza imagens representativas, modelos físicos e protótipos 3D na concepção e desenvolvimento de coisas que não existem ainda.

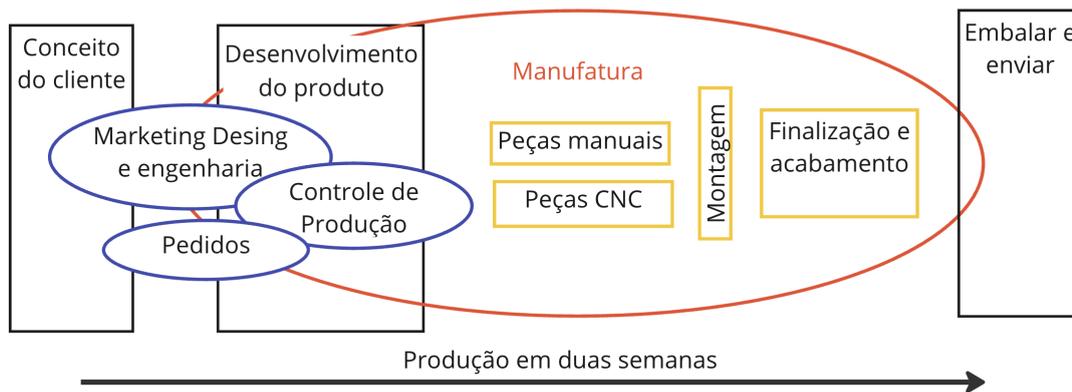
Estabelecer uma metodologia fundamentada em modelos de produção aliando à fabricação digital pode configurar como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de soluções mais eficazes frente aos desafios contemporâneos do *design*. Integrar ferramentas de prototipagem rápida e simulação digital ao processo de projeto e produzir/prototipar um produto permite, compreender com mais profundidade problemas em todas as etapas produtivas, possibilitar ajustes e testes precisos ao longo do processo projetual. Assim, o *designer* passa a atuar de forma mais crítica e criativa, conectando suas decisões a processos produtivos mais sustentáveis, ágeis e adaptáveis.

Barros (2014) observa um panorama global na produção de mobiliário, sendo ele dominado por grandes indústrias especializadas com produtos padronizados, linha de produção rígida e produção em grande escala. Enquanto, ao longo do século XX, a produção artesanal perdeu espaço para as grandes indústrias devido à dificuldade de competir em termos de economia de escala, Mitchell e Watt (2009) sugerem uma mudança nesse cenário, com a ascensão de modelos de produção mais flexíveis e adaptados às demandas individuais dos consumidores. Esses novos modelos surgem como resposta à aplicação de novas tecnologias e às deficiências das produções em larga escala, que enfrentam desafios como falta de flexibilidade, excesso de estoque e impactos ambientais.

Mitchell e Watt (2009) caracterizam uma manufatura contemporânea quando esta possui uma linha de produção curta, redução de etapas da manufatura, customização rápida, equipe empoderada e que utiliza *softwares* específicos para *design*. O processo entre o conceito do cliente, desenvolvimento de produto customizado, marketing, controle

de produção, manufatura e embalagem devem acontecer dentro de duas semanas. Para um modelo de produção customizado e eficiente, eles sugerem uma organização da manufatura conforme a Figura abaixo.

Figura 11 - Modelo de Produção Customizada e Eficiente



Fonte: Mitchell P; Watt H, 2009, tradução do autor

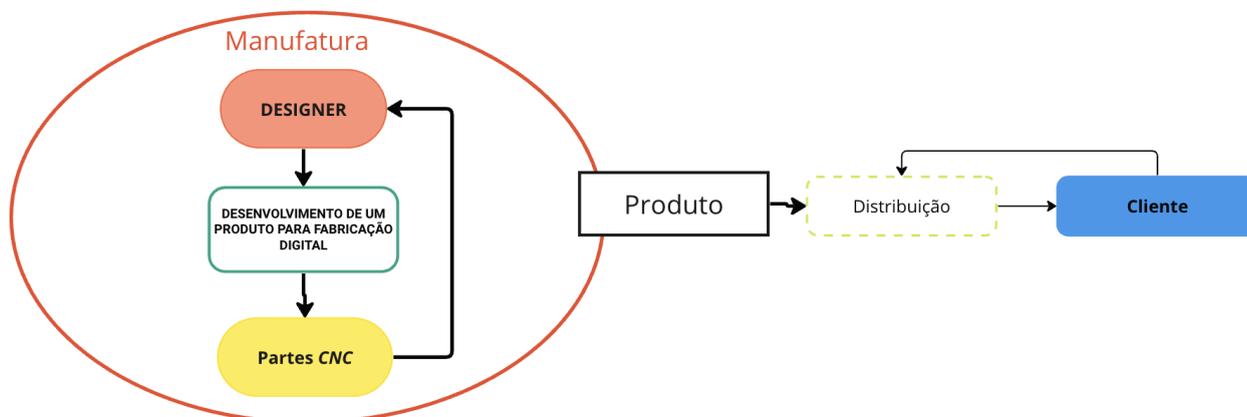
Nesse contexto, a fabricação digital torna-se uma ótima aliada devido a aproximação entre o projetista e o processo de produção, podendo estabelecer soluções mais eficientes, permitindo uma resposta mais ágil e customizada às necessidades dos consumidores e de problemas ambientais.

Com base no diagrama de Mitchell e Watt (2009) e no recorte de experiência prática da empresa COFAB (capítulo 3), foi possível compreender e experienciar dois modelos distintos da produção da fabricação digital na produção local.

A pesquisa em *design* também difere da pesquisa científica, em sua maior parte, porque preocupa-se com estabelecimento de soluções plausíveis, enquanto a pesquisa científica preocupa-se com verdades universais. Dessa filosofia iniciamos a conceituações para a produção de Modelo Fechado e Modelo Aberto. A definição dos *designs* fabricados pode interferir diretamente em toda a cadeia produtiva de um produto.

Ao primeiro modelo, sugere-se a denominação de **Modelo Fechado de Produção** (MFP), no qual o *designer* faz parte do processo de manufatura e concentra-se no desenvolvimento do equilíbrio ideal entre concepção e produção de um produto. Isso é obtido por meio da integração de estratégias de *design* nos processos de fabricação digital, que envolvem prototipagem e análise de modelos digitais. O objetivo é criar produtos mais eficientes e sustentáveis para oferecer ao mercado (Figura 12).

Figura 12- Diagrama Modelo Fechado de Produção (MFP)

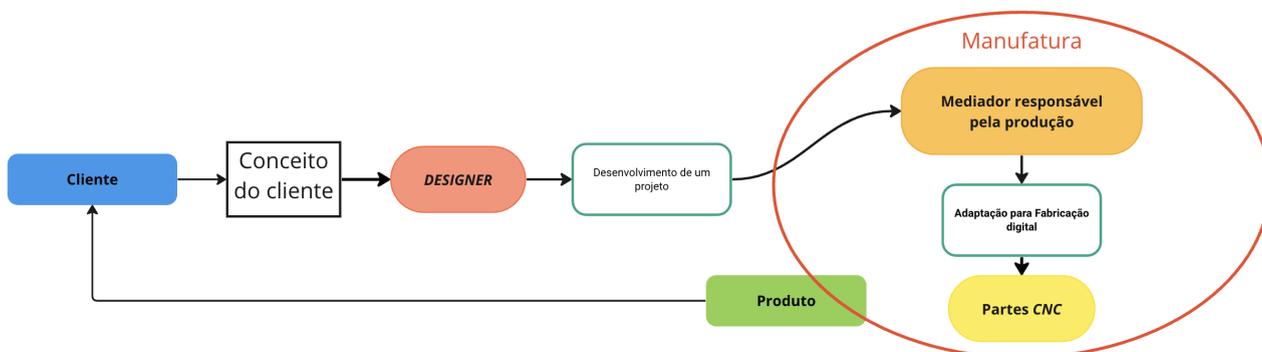


Fonte: Domingos, Alves, 2025

Nesse modelo de produção a incorporação da fabricação digital no processo de *design* abre um campo de experimentação, que com as técnicas certas pode proporcionar um ambiente ideal para produção, com objetivo de desenvolver uma linha de produto que forneça materiais padronizados, com apoio de modelos digitais e padrões de produção focados na sustentabilidade.

O segundo modelo diferencia-se pela abertura da fabricação digital para uma ampla gama de usuários e novos *designers*, como: marceneiros, arquitetos, engenheiros, organizadores de eventos, gráficas, *makers*, entre outros, desenvolverem seus produtos e projetos de forma customizada. A esse processo, propõe-se chamar de **Modelo Segmentado de Produção (MSP)** (Figura 13).

Figura 13 - Diagrama Modelo Segmentado de Produção (MSP)



Fonte: Domingos, Alves, 2025

O MSP diferencia-se pelo fato de o desenvolvimento do projeto acontecer fora da manufatura, seja por amadores, ou até projetistas com menos experiência em fabricação digital. Nesse modelo, geralmente não são contemplados durante o processo de projeto as melhores técnicas, materiais, formatos e especificações de projeto para uso de ferramentas de controle numéricos (CNC).

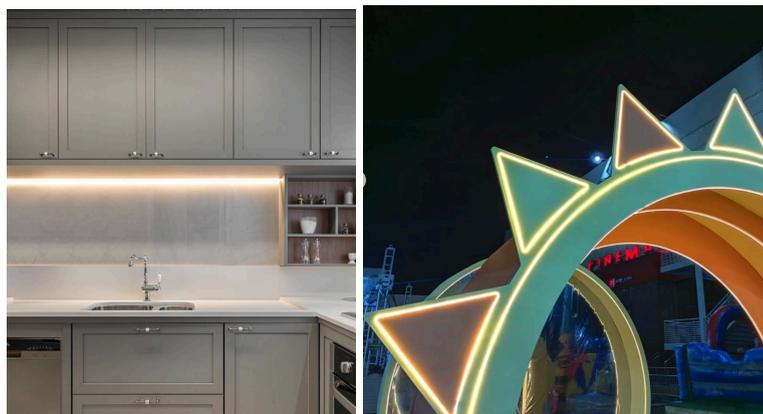
A diferença entre os novos métodos de produção baseados em modelos digitais e os antigos métodos de produção de massa é que os primeiros não se destinam a produzir cópias idênticas de um mesmo produto. Pelo contrário, constituem-se em sistemas suficientemente adaptáveis para produzir um grande espectro de formas diferentes. Esse novo conceito tem sido chamado de “*mass customization*” (personalização em massa) e foi definido por autores como Stan Davis (1996), Tseng e Jiao (2001), Pine (1993), e Kaplan e Haenlein (2006) (PUPO, 2009, p. 20).

A customização em massa possibilita que arquitetos e engenheiros explorem uma diversidade de soluções e personalizações em seus projetos, mantendo a viabilidade econômica e a sustentabilidade. Com essa abordagem, a manufatura digital torna-se uma ferramenta poderosa para inovar na criação de ambientes construídos, adaptando-se às necessidades e preferências específicas de cada projeto.

Logo ao receber o projeto desenvolvido externamente à manufatura, é necessário um mediador para adaptação do projeto para fabricação digital e desenvolvimento do produto. Esse modelo, também abrange uma ampla variedade de materiais, como no exemplo a seguir: uma marcenaria pode solicitar cortes de chapas de MDF, enquanto uma gráfica pode necessitar de cortes de PVC expandidos, e uma produtora de eventos pode utilizar acrílico. Essa diversidade de demandas resulta em uma maior complexidade na gestão dos retalhos gerados pela equipe de manufatura.

Para o modelo MSP, utilizar-se-á de exemplo a execução de dois serviços distintos. O primeiro refere-se ao atendimento de um marceneiro especializado em móveis planejados, no qual demandou a confecção de molduras em MDF de 6mm para aplicação em portas de móveis no estilo provençal. O segundo serviço envolveu o atendimento a uma empresa de eventos, que solicitou o corte de peças em MDF de 15mm para a criação de uma estrutura decorativa em formato de sol, conforme ilustrado na Figura 14.

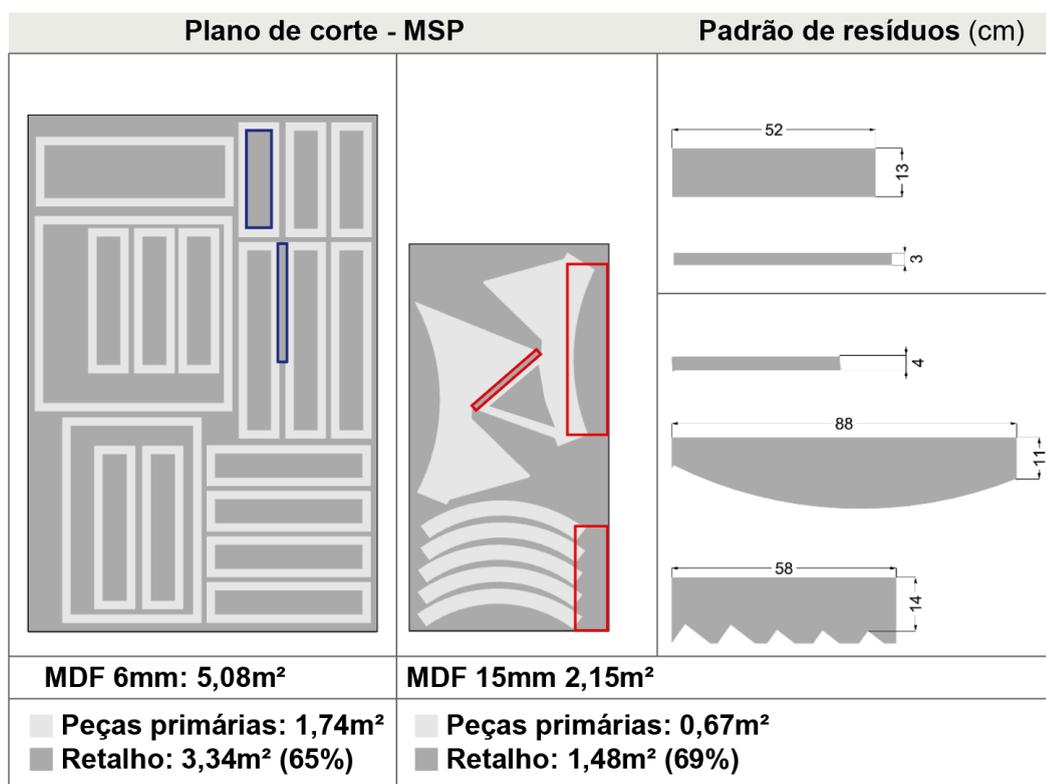
Figura 14 - Cozinha Estilo Provençal e Estrutura para Decoração de Eventos.



Fonte: Instagram (@marcomoveis_ e @cnccut.cortes), 2025

A adaptação desse estilo de móvel para o plano de corte resultou em um produto com baixo aproveitamento de matéria-prima, conforme demonstrado no plano de corte e o padrão de resíduos gerados na Figura a seguir:

Figura 15 - Plano de Corte e Padrão Residual.



Fonte: autor, 2025.

A ineficiência no aproveitamento do material pode ser atribuída à complexidade do *design* e às especificações exigidas pelo cliente, que frequentemente resultam em desperdício de matéria-prima. Esse cenário destaca a necessidade de otimização dos processos de corte e planejamento, com o intuito de aumentar a eficiência na utilização dos recursos e reduzir os custos associados à produção. Os retalhos gerados durante a produção desses dois produtos consistem em peças com dimensões variáveis, que podem oscilar entre 2 cm e 50 cm, por exemplo. Essa grande variação dimensional, em muitos casos, inviabiliza a criação de produtos de médio porte, limitando o reaproveitamento desses resíduos.

Ambos os processos de produção enfrentam o desafio do aproveitamento de retalhos, porém, o MFP destaca-se pela sua capacidade de controle dos impactos. Isso deve-se à integração do *designer* desde a concepção ao processo de produção, permitindo a seleção dos melhores materiais, *designs* e processos para aprimorar e otimizar a produção. Porém, por oportunidade de mercado local, o modelo MSP foi identificado com maior demanda de prestação de serviços, devido à agilidade e flexibilidade, mais pessoas optam por desenvolver suas peças e produtos principalmente para marcenarias e identificações visuais de fachadas.

Para o estudo de caso foi investigado o modelo MFP, para estabelecer técnicas de *design* e ferramentas necessárias para aprimorar o processo de projeto. Tal metodologia pode oferecer ao *designer* a oportunidade de compreender e influenciar diretamente o processo de produção, visando à criação de produtos com melhor desempenho econômico e ambiental.

2.4 Open source para produção local

Indústrias que integram fabricação digital e métodos contemporâneos tendem a liderar a inovação no setor. Bernardo e Cabral (2014) destacam a *Opendesk*, cujos produtos são comercializados no Brasil pela *Studio Dlux*, como exemplo desse modelo emergente.

Contraopondo-se à produção industrial os movimentos de desenvolvimento e compartilhamento online de *open hardware*, como o *Open Source*, *Wikihouse*, *Thingiverse*, *Yeggi*, *Instructables*, *SketchChair*, *Open Desk*, entre tantos outros, aliados a espaços de produção compartilhada, como os *FabLabs*, *Tool Libraries*, *Free Farms*, *Comunity Workshops*, estão crescendo no mundo todo e trazem a

promessa de uma nova revolução industrial descentralizada. (BERNARDO E CABRAL 2014, p. 320).

Souza (2020) ressalta que o conceito de *open source*, surgido nos anos 1990, promove o uso, modificação e redistribuição colaborativa de códigos e projetos, incentivando uma produção intelectual coletiva. A empresa *Opendesk* define e fomenta essa prática como *Open Making*, caracterizada pela fabricação de peças em oficinas descentralizadas equipadas com máquinas CNC, substituindo o modelo tradicional de grandes fábricas por redes digitais de produção sob demanda.

Open Making é um novo movimento socioeconômico na manufatura, impulsionado por uma maior acessibilidade a ferramentas de fabricação digital – e à internet. No Open Making, o conceito de fábrica é invertido – não mais uma única grande instalação operada onde terra e mão de obra são mais baratas, mas uma rede global de oficinas independentes, operando roteadores CNC e outras ferramentas de fabricação digital. Ao conectar essas oficinas pela web, é possível criar um sistema de manufatura distribuído, e os bens podem ser feitos onde são necessários, quando são necessários. (OPENDESK, 2017).

Essa abordagem reduz custos logísticos, amplia a flexibilidade e exige que os projetos sigam padrões universais, assegurando qualidade e precisão em diferentes contextos de fabricação — seja na Malásia, Moldávia ou México. Trata-se, portanto, de uma convergência entre fabricação digital, colaboração global e *design* adaptável, orientada por um sistema produtivo mais democrático, sustentável e eficiente.

Os primeiros protótipos deste estudo, aplicando a metodologia de *design* de produto de Milton e Rodgers (2014), denominada de autópsia de produto, foram analisados projetos de *design flat pack* da *Opendesk*, como a mesa *Studio Desk* e a cadeira *Roxanne Chair*. Os protótipos foram produzidos a partir de planos de cortes modelos 3D disponibilizados pela própria *Open Desk*. Isso possibilitou explorar os ajustes em encaixes, montagem e acabamentos, em *design* já validados, iniciando a compreensão dos desafios e soluções na fabricação de produtos *Flat Pack*.

De acordo com Silva (2021) para desenvolvimento de um produto é necessária a compreensão do Ciclo de Vida deste produto. Esta abordagem focada na vida do produto é considerada desde a extração de cada matéria-prima empregada, fase de projeto, manufatura, distribuição, fase de uso, até a completa degradação de cada um dos seus

componentes no aterro sanitário. Sendo um conceito central para o *Ecodesign* e *Design* para sustentabilidade.

Desse modo, como princípio de projeto, foi adotado o *design Flat Pack*, também conhecido como "produtos de embalagem plana" ou "móveis de kit". Esses produtos são projetados a partir de componentes planos que se encaixam, buscando pouco uso de parafusos e outros elementos além das próprias peças do mobiliário, tem como principal matéria prima a chapa de madeira e as peças de encaixes possibilitam o envio de peças desmontadas, diminuindo volume de transporte, com guia para montagem seguindo instruções com pouco uso de ferramentas (Figura 16).

Figura 16 - Cadeira Produzida e Instruções de Montagem



Fonte: autor, 2025

O princípio de *design Flat Pack* permite uma abordagem em diversas fases do ciclo de vida do produto. Na fase de obtenção de matéria prima é possível especificar materiais provenientes de fontes renováveis como chapas de compensado, MDF ou madeiras. A possibilidade de montagem e desmontagem das peças com ferramentas simples, acarretam uma série de fatores positivos no ciclo de vida do produto, indo desde à fase da distribuição; diminuindo o volume para transporte e embalagem, na manufatura; a necessidade de menos ferramentas e componentes do produto, à fase de uso; estimulando o reparo e manutenção de partes, e até a fase de fim de vida; sendo possível a sua desmontagem para reciclagem ou descarte adequado.

De acordo com Silva (2021), o impacto de um produto é, em grande parte, determinado na fase de projeto, quando são tomadas decisões que irão influenciar a forma de uso, especificação de materiais, processos de fabricação, durabilidade, logística

de distribuição, descarte ou reuso. Ele também destaca que a compreensão do ciclo de vida de um produto abrange desde à extração das matérias-primas, manufatura, distribuição, uso e degradação final de seus componentes, sendo fundamental a compreensão dessas etapas pelo *designer*. Corrêa e Souza (2024) definem *Ecodesign* conforme Manzini e Vezzolli (2002), como aquele produto que incorpora aspectos de sustentabilidade em alguma etapa do seu ciclo de vida, seja no âmbito ambiental, social ou econômico, e esse processo deve contemplar desenvolver produtos que, de alguma forma, irão reduzir ou uso dos recursos naturais e minimizar o impacto ambiental no seu ciclo de vida.

Assim, estes princípios, incorporam práticas de *Ecodesign* e otimização de processos possibilitados pela fabricação digital, podem reduzir o impacto ambiental e promover a criação de soluções inovadoras e criativas para problemas produtivos, como sobras e descartes de matéria-prima.

O capítulo 3 trata de experimentos realizados na Empresa COFAB localizada em Campo Grande - MS, no período de 2021 a 2023, em que desenvolveu produtos e móveis usando máquinas CNC *router* e laser. Esse período permitiu não apenas a aplicação prática de conhecimentos teóricos, mas também a exploração de novas possibilidades no campo do *design* e da fabricação de móveis.

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO: APLICAÇÕES PRÁTICAS

Para o estudo de caso foi utilizada a experiência da COFAB, que durante o processo de pesquisa participou do programa Centelha MS 01. O programa tem como objetivo estimular a criação de empreendimentos inovadores e disseminar a cultura empreendedora no Brasil. A COFAB, utilizando o MFP (Modelo Fechado de Produção), buscou estabelecer técnicas de *design* e utilizar ferramentas que aprimorassem o processo de desenvolvimento de projetos, focando na redução da quantidade de retalhos gerados durante a fabricação. Essa abordagem foi fundamental para otimizar o uso de materiais e promover práticas sustentáveis no processo produtivo.

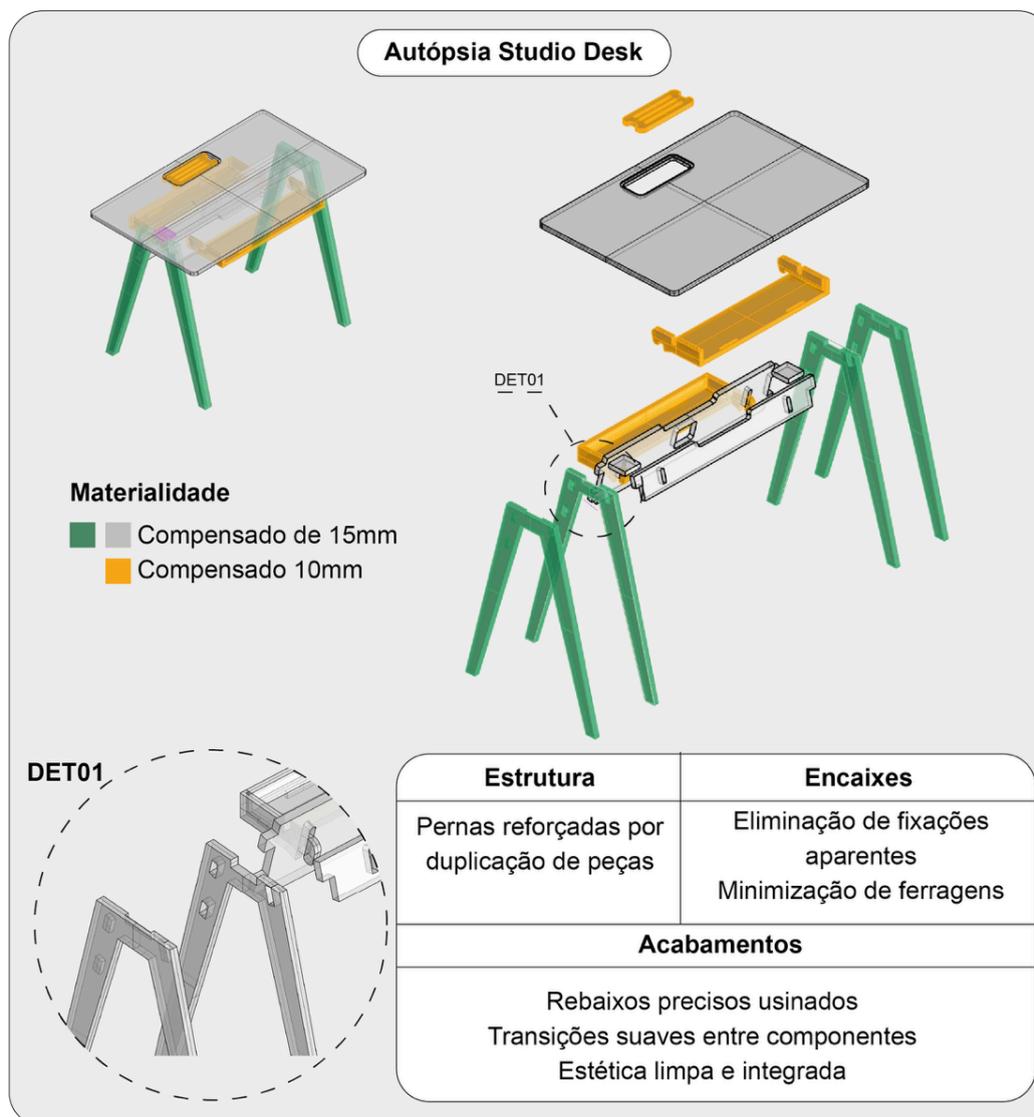
3.1 Etapa 01: Autópsia de um projeto *open source*

Segundo Milton e Rodgers (2014), a autópsia do produto é um método usado para obter uma melhor compreensão das decisões de *design* que foram tomadas em um artefato existente, como: os materiais utilizados; as técnicas e processos de fabricação no desenvolvimento do produto; o porquê de certos componentes usados e quais decisões estéticas sobre a forma, a cor e o acabamento do produto foram tomados. Uma autópsia do produto começa com uma análise visual do artefato, prestando atenção aos materiais usados, formas, texturas, dimensões e estruturação do mobiliário.

A primeira peça selecionada para estudo foi a *Studio Desk*, mesa desenvolvida pela *OpenDesk*. Os arquivos de plano de corte foram disponibilizados pela *Studio Dlux* durante um *Open Maker Day*, promovido via Instagram.

Para a reprodução da mesa foram analisadas as categorias de materialidade; estrutura, sistemas de encaixes e acabamentos (Figura 17).

Figura 17 - Autópsia do Produto: Mesa *Studio Desk*



Fonte: autor, 2025

A Figura acima apresenta uma estrutura composta por compensado de 15mm, com reforço nas pernas mediante sobreposição de camadas para maior resistência. O sistema de montagem emprega encaixes invisíveis padronizados e colagem, dispensando fixações aparentes. O acabamento apresenta rebaixos usinados, garantindo transições suaves entre componentes, e uma estética minimalista. Além disso, é usado selante, e acabamento manual de lixa para polimento.

Figura 18 - Mesa *Studio Desk* Produzida

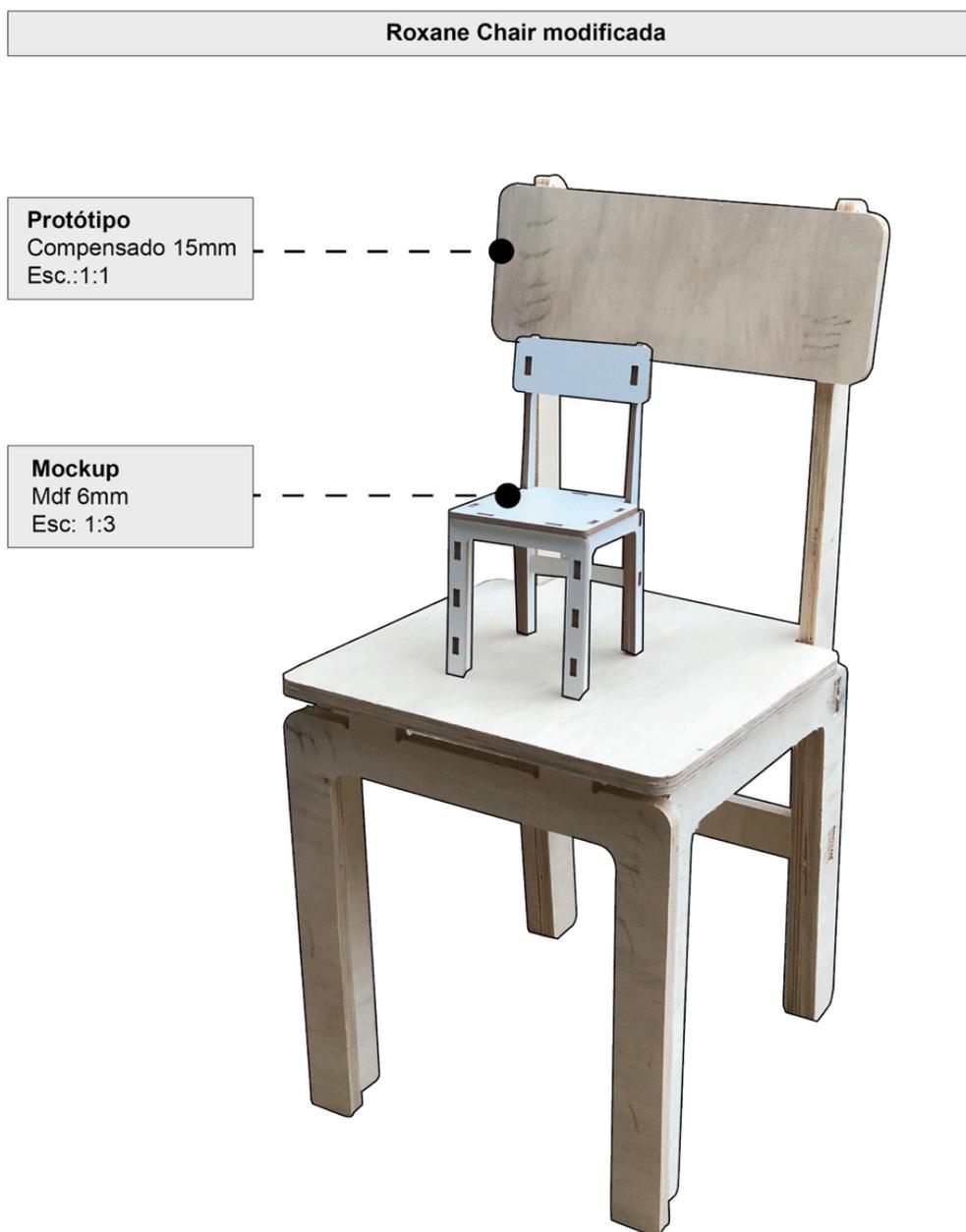


Fonte: autor, 2025

Outros protótipos foram produzidos para composição do escritório da COFAB, sendo a mesa *Lift Standing Desk* e a cadeira *Roxanne*. Dessa vez os modelos produzidos não tiveram os arquivos dos planos de cortes disponibilizados, e, assim, foi usado como referência para modelo de estudo o arquivo 3d de *SketchUp* disponibilizado na plataforma Warehouse⁶. Na sequência, foram ensaiadas as primeiras alterações de arquivos como, alterações de dimensões, folgas, encaixes, materiais e suas consequências no projeto. Primeiramente foi produzido um *mockup* da cadeira, com a intenção de testar os encaixes e o funcionamento estrutural da peça, e em seguida o artefato foi produzido em escala 1:1 (Figura 19).

⁶ O 3D Warehouse é um site que fornece modelos 3D pré-projetados e que funciona perfeitamente com o SketchUp. O 3D Warehouse é um tremendo recurso e comunidade online para qualquer um que crie ou use modelos 3D. (<https://3dwarehouse.sketchup.com/search/models?q=opendesk>)

Figura 19 - Protótipo e *Mockup* Cadeira Roxane Modificada.



Fonte: autor, 2025

Foram registrados os processos de produção das peças, e na Figura seguinte é possível ver as peças das cadeiras organizadas para a montagem, observando que não foram utilizados nenhum parafuso ou cola para montagem (Figura 20).

Figura 20 - Peças Cadeira Roxane Modificada

Fonte: autor, 2025

Para a produção dos dois artefatos, na Figura seguinte é possível analisar no plano de corte das peças um alto índice de espaços vazios de chapa devido ao formato mais complexo das peças e suas dimensões. A chapa de compensado utilizada tem como área total de $3,52\text{m}^2$, sendo usado a área de $1,2\text{m}^2$ para peças da *Studio Desk* e $0,5\text{m}^2$ para cadeira *Roxane chair* modificada, somadas ocupam $1,7\text{m}^2$ de matéria prima, ocasionando em sobras de $1,82\text{m}^2$, sendo um desperdício de 51,7% (Figura 21).

Figura 21 - Plano de Corte *Design Flat Pack* da *Opendesk* e Execução do Autor



Fonte: Domingos, Alves, 2025

Analisar esses dois objetos, sendo modelos já consolidados e testados, possibilitou compreender a manufatura das peças de *design* autoral para produção. Na etapa de autópsia do produto foi imprescindível para validar a ideia, conhecer os desafios que seriam enfrentados na produção de móveis *flat pack*. Após os estudos dos primeiros protótipos com *design* validado da *Opendesk*, foi possível compreender quais seriam os primeiros desafios e potencialidades encontradas na produção e as possíveis soluções.

Potencialidades

É possível desenvolver produtos que possam ser fabricados em escala industrial e replicados, desde que se disponha de uma máquina CNC *router*. A possibilidade do corte de diversas peças em diferentes formatos permite uma significativa agilidade e eficiência comparado a métodos tradicionais de marcenaria.

As matérias primas compensado e MDF apresentaram ideias para a produção, devido a padronização da espessura e dimensões da chapa. O compensado apresentou uma boa resistência para produção de peças como cadeiras, bancos, mesas, além da resistência superior à água, comparada ao MDF. É importante considerar o tamanho do material do qual seu objeto será produzido. Chapas de compensado tem como padrão 1,6x2,2m enquanto chapas de MDF 1,85 x 2,75m. As espessuras variam de 3mm a 30mm.

- A produção por encaixes permite uma padronização de montagem e acabamento das peças, além de agilizar todo o processo de produção, conseguindo estabelecer um prazo de produção de 2 semanas, conforme sugerido por Mitchell e Watt (2009).

Desafios

- A máquina CNC precisa estar muito bem calibrada em todos os eixos (XYZ). Detalhes como encaixes, rebaixos e folgas não podem ultrapassar erros de 1mm que começam a dificultar o processo de montagem e acabamento da peça. Tecnologias como mesa a vácuo, troca automática de fresas e esquadreamento automático da peça, otimizam a produção e aumentam a precisão das peças cortadas.
- Técnicas como aplicação de fórmica/PET laminados; acabamentos extras como polimento, pintura, geram um período maior de trabalho manual (Figura 22). Além da necessidade de ferramentas, como: furadeira, lixadeiras, grampos, sargentos, colas, resinas, entre outros. Outro aspecto relevante é a necessidade de aprimoramento em técnicas de carpintaria/marcenaria para um bom serviço e agilidade no processo.

Figura 22 - Processos de Acabamento



Fonte: autor, 2025

- A necessidade de espaço para produção envolve a consideração de áreas adequadas para o armazenamento de matéria-prima, a organização de peças destinadas a acabamentos, montagem e prototipagem, bem como um espaço dedicado ao estoque dos produtos finalizados. Esse planejamento é essencial para garantir eficiência no fluxo de trabalho e na gestão e qualidade dos materiais.

3.2 Etapa 02 - Produção para atender o mercado local

Para produção, a COFAB estabeleceu-se em um galpão onde uma marcenaria de móveis planejados já fazia uso como fábrica, localizada em Campo Grande - MS. O espaço possui uma localização favorável próxima às distribuidoras de Chapas de compensado e MDF, além de infraestrutura razoável. A máquina CNC *router*, era aquisição da marcenaria, e a máquina de corte Laser foi adquirida a partir do início do Centelha 01, em 2021.

Assim a COFAB lançou sua primeira linha de produtos, composta por móveis de pequena e média escala, como abajures, porta-trecos, escrivaninhas, poltronas, sapateiras, espelhos, entre outras peças. Esses produtos foram divulgados principalmente na rede social *Instagram* (https://www.instagram.com/_cofab/), além de serem apresentados em feiras locais (Figura 23), promovendo a marca e atraindo consumidores interessados em designs funcionais e produzidos com técnicas de fabricação digital.

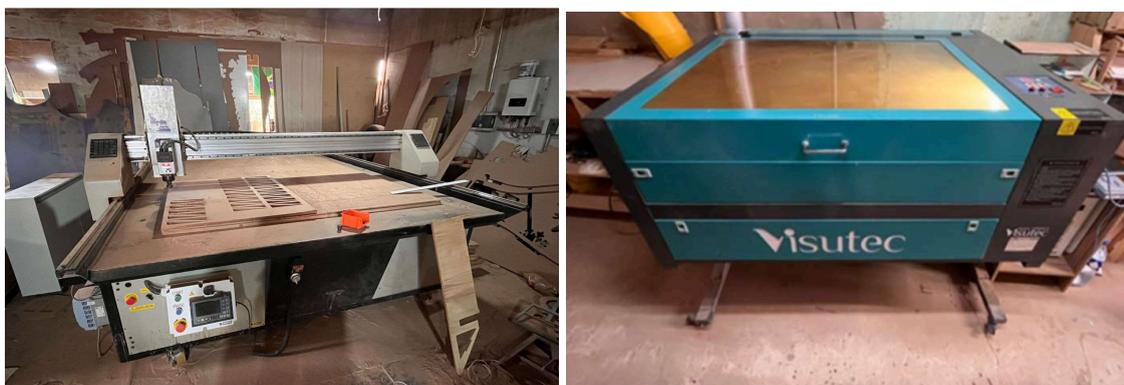
Figura 23- Exposição em Feira Local das Primeiras Peças Comerciais/ Redes Sociais



Fonte: autor, 2025

Desse modo, teríamos então duas máquinas CNC para a produção, sendo uma fresadora *router* com área útil de corte 2x3 metros (possibilitando o corte de chapas inteiras de MDF e compensado) e uma outra máquina de corte laser com área útil de 90x60cm e potência de 80w (Figura 24).

Figura 24 - CNC Router (2x3m) e CNC Laser (60x90cm)



Fonte: autor, 2025

Na máquina CNC *router* foram fabricadas as peças que exigiam encaixes, rebaixos, usinagem ou detalhes específicos. Foram estudadas diversas soluções de encaixes para montagem e acabamentos, com o objetivo de destacar os produtos no mercado, criando um diferencial competitivo tanto em termos de design quanto de funcionalidade e diferencial de mercado.

A potência de 80w da máquina CNC Laser, limitada ao corte de MDF de espessura máxima de 6mm, sua área útil menor também limitou sua utilização na produção de peças maiores. A máquina foi usada então para as customizações, gravações de identificação das peças COFAB e produção de peças menores como, chaveiros, organizadores de escritório, porta celulares e entre outros. (Figura 25)

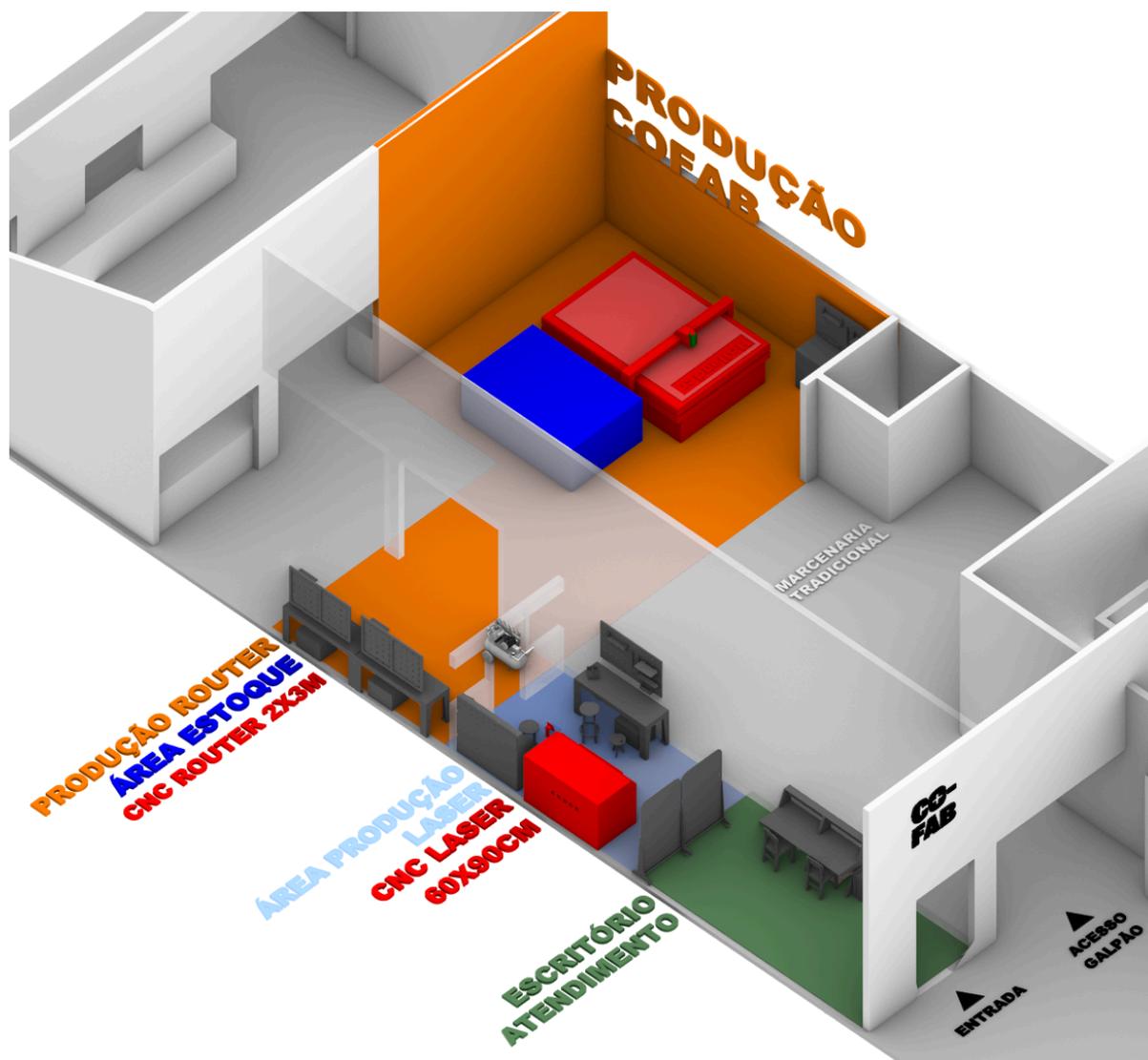
Figura 25 - Acabamentos e Peças Produzidas em Laser



Fonte: autor, 2025

Durante o período do primeiro ano (2021), conforme a demanda foi crescendo, foi setorizando o espaço de produção em três áreas principais. A primeira, foi o escritório, que também funciona como área de atendimento ao público. A segunda, a área de produção com a máquina de corte a laser, em que foi reservado um espaço para o estoque de peças pequenas e um armário para armazenar ferramentas. Por fim, a terceira, a de produção com a máquina CNC *router*, que conta com espaço para estoque de matéria-prima ao lado da máquina, para facilitar a troca de chapas, além de um espaço para armazenar os produtos protótipos e os retalhos gerados durante o processo (Figura 26).

Figura 26 - Diagrama Setorização Produção

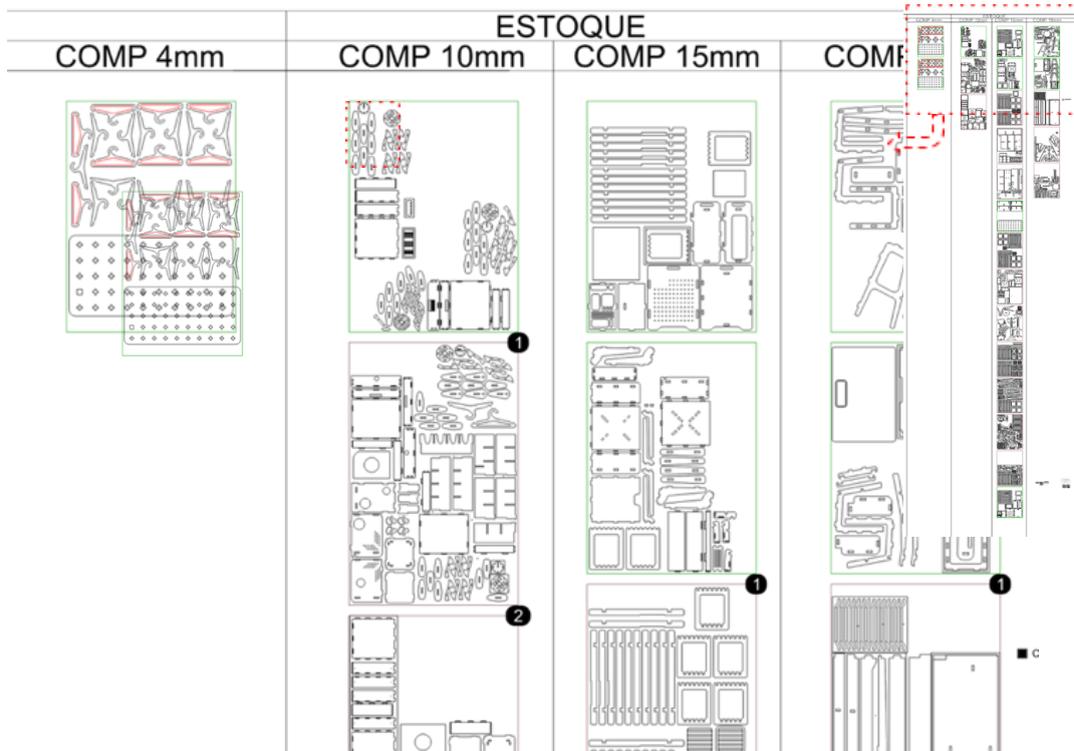


Fonte: autor, 2025

Além de acompanhar o estoque no espaço físico também foi desenvolvida uma biblioteca digital do estoque da COFAB, com o *software* de modelagem digital *Rhinceros*, auxiliando na gestão da produção e do estoque de matéria-prima bem como na compreensão visual dos retalhos e impactos gerados. O estoque virtual possibilitou centralizar, em um arquivo, todas as chapas disponíveis e os planos de corte executados, facilitando o controle do uso de materiais e a otimização dos processos produtivos.

A partir desse procedimento, foi possível gerar dados visuais e numéricos dos tipos de materiais usados, valores em área das chapas utilizadas e descartadas, e visualização dos planos de cortes dos produtos desenvolvidos nesse período (Figura 27).

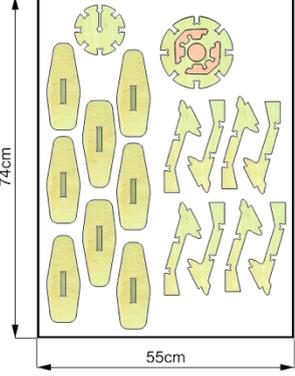
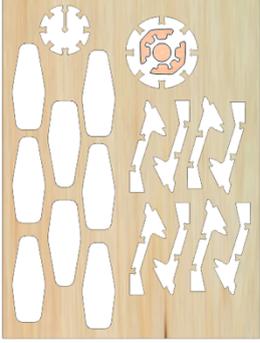
Figura 27 - Recorte do Estoque Digital da Produção



Fonte: Domingos, Alves, 2025

Ao examinar os planos de corte, a fabricação digital torna-se essencial para a melhoria dos processos de manufatura, fornecendo informações precisas sobre o uso de matéria-prima e dos resíduos gerados. O primeiro passo foi calcular o desperdício gerado, utilizando a área em metros quadrados da matéria-prima e subtraindo a área das peças cortadas. O cálculo de aproveitamento foi realizado diretamente pelo *software Rhinoceros*, conforme demonstrado na Figura acima. É apresentado abaixo na Figura 28, o exemplo do abajur desenvolvido e seu cálculo de resíduos. Os retalhos foram definidos como retalhos de placa, retalhos soltos e pó residual. No exemplo do abajur, os resíduos gerados incluem o retalho de placa, os retalhos soltos resultantes das subtrações nas peças do produto e o pó residual, proveniente do fresamento do material para criar os rebaixos dos encaixes.

Figura 28 - Abajur Plano de Corte

OO Abajur	PC Peças produzidas 0,151m ²	RP Retalho Placa 0,256m ²	RS Retalho Solto 0,005m ²
			
Cálculos peças e material	<input type="checkbox"/> Área Total (AT): 0,407m ²	<input type="checkbox"/> Retalho Solto: 0,05m ²	
	<input checked="" type="checkbox"/> Área Peças (PC): PC - RS 0,156 - 0,005m ²	<input checked="" type="checkbox"/> Retalho TOTAL = (AT- PC)+(RS+PR) = RT RT = (0,407 - 0,151)+ (0,005+ PR)= 0,256m²	

Fonte: Domingos, Alves, 2025

Os retalhos em placas e soltos são acumulados com os resíduos dos outros marceneiros que usam o galpão de produção (Figura 2), sendo necessária utilização de uma caçamba a cada 2 meses para recolhimento, porém variável, conforme a produção mensal. O pó pode ser recolhido durante o processo de usinagem por um coletor de pó residual instalado na máquina ou varrido em sacos de lixo e enviado para a coleta comum de lixo.

A análise via *software* forneceu os quantitativos apresentados na tabela. Com isso, foi possível atingir uma eficiência de aproximadamente 55% no uso das chapas ao longo desse período (Figura 29).

Figura 29 - Tabela de Matéria-Prima Utilizada

Compensados								
Espessura (mm)	4mm	10mm	10mm	15mm	15mm	18mm	18mm	Total
Tipo	Amescla	Amescla	Naval	Amescla	Naval	Amescla	Naval	
Total chapas usadas	2	1	2	4	10	2	3	24
Área unitário	3,52	3,52	4	3,52	4	3,52	3,52	
Área matéria prima total	7,04	3,52	8	14,08	40	7,04	10,56	90,24
Produtos	2	6		18		5		31
Área usada	4,0568	1,0839	5,3152	8,51	22,3927	3,17	5,43	49,9586
Retalhos (m ²)	2,9832	2,4361	2,6848	5,57	17,6073	3,87	5,13	40,2814
Porcentagem retalhos (%)	42%	69%	34%	40%	44%	55%	49%	45%
Eficiência da chapa (%)	58%	31%	66%	60%	56%	45%	51%	55%

Fonte: Domingos, Alves, 2025

A análise dos dados da tabela acima é essencial para se compreender os materiais utilizados, otimização de produção padrão, bem como estabelecer novas abordagens nos processos e produtos desenvolvidos na linha de produção. Isso se alinha ao conceito de *design* interativo proposto por Milton e Rodgers (2013).

Apesar do *design flat pack* possibilitar o *nesting*, suas formas de encaixe irregulares e complexas influenciam na produção de retalhos de difícil reuso. Durante a pesquisa foi buscado o uso de *plugins*, como o *OpenNest*⁷, para auxiliar na ordenação das peças e na automatização do processo de plano de corte. No entanto, devido à complexidade das formas e das linhas de vetores complexos, como rebaixos, linhas externas, linhas internas, percursos de vetores, rebaixos e encaixes, o *software* apresentou limitações no processamento desses dados. E seguindo a lógica da *Pesquisa*

⁷ *OpenNest* é um *plugin* para *Rhinoceros* que organiza automaticamente polilinhas 2D, otimizando planos de corte para máquinas CNC laser e *router*.

em design buscou-se, saídas mais ágeis para atender a otimização dos planos de cortes como a ordenação manual das peças.

A geração de 45% de retalho foi considerada como um baixo nível de aproveitamento das peças. Por isso, a próxima etapa da pesquisa foca no desenvolvimento das diretrizes para melhoria do uso desses retalhos, usando técnicas de fabricação digital.

3.3 Etapa 03 – Avaliação e proposição de melhorias para otimização dos retalhos

Nessa etapa, são investigadas estratégias de *design* de produto voltadas para o uso mais eficiente dos materiais e a redução de resíduos gerados nos processos de fabricação digital subtrativa. As estratégias surgiram a partir da análise prática dos planos de corte realizados durante a produção, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria no aproveitamento das chapas. A partir dessas observações, foi possível propor soluções que tornam o uso dos recursos mais racional, sem comprometer a qualidade, a funcionalidade ou a estética dos móveis desenvolvidos.

As diretrizes adotadas nesta etapa dialogam com os princípios de *ecodesign* descritos por Silva (2021), ao priorizar um processo produtivo mais consciente e sustentável. Com base nesse referencial, as decisões de projeto buscam equilibrar desempenho e responsabilidade ambiental, promovendo alternativas viáveis para a produção local.

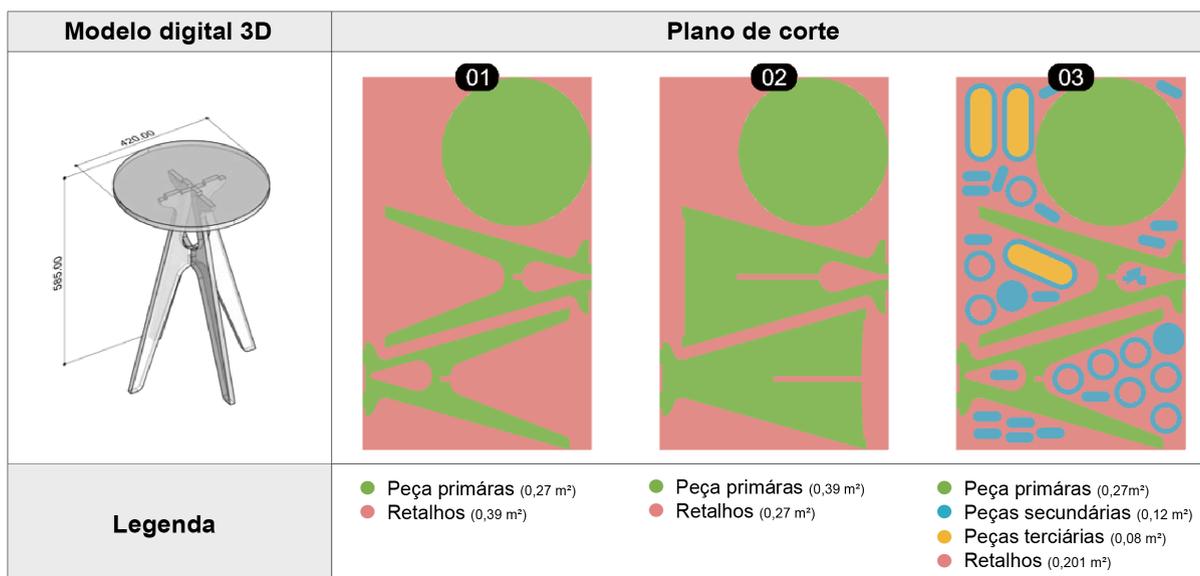
As estratégias possuem como princípios: a maximização dos planos de corte, reaproveitamento de retalhos padronizados, substituição de componentes, melhoria do desempenho dos produtos fabricados a partir de prototipagem e modelos customizados de produtos. Essas abordagens permitiram o desenvolvimento de soluções que aproveitam melhor tanto as chapas quanto os retalhos gerados, contribuindo para a redução de resíduos e a eficiência dos processos produtivos.

3.3.1. Maximização de ocupação no plano de corte

A maximização da ocupação do plano de corte tem como objetivo transformar a maior quantidade possível de material em peças e produtos, reduzindo ao mínimo a geração de

retalhos. Essa estratégia pode ser aplicada de três maneiras, conforme ilustrado na Figura 30: (01) **Corte das peças necessárias para a produção**, priorizando a disposição adequada das peças no *layout* da chapa; (02) **Desenvolvimento de designs que otimizem o espaço disponível**, criando formas de peças que ocupem o plano de corte de maneira mais eficiente, evitando formas esbeltas e complexas; e (03) **Aumento do número de peças retiradas**, produzindo peças menores, como porta-chaves, cabideiros ou caixas, para aproveitar áreas de retalhos que seriam descartadas. Para minimizar os retalhos gerados, é essencial adotar estratégias como a otimização do *design*, que permite um melhor aproveitamento da chapa e a criação de peças adicionais que complementam o uso do material.

Figura 30 - Mesa de Apoio/Plano de Corte

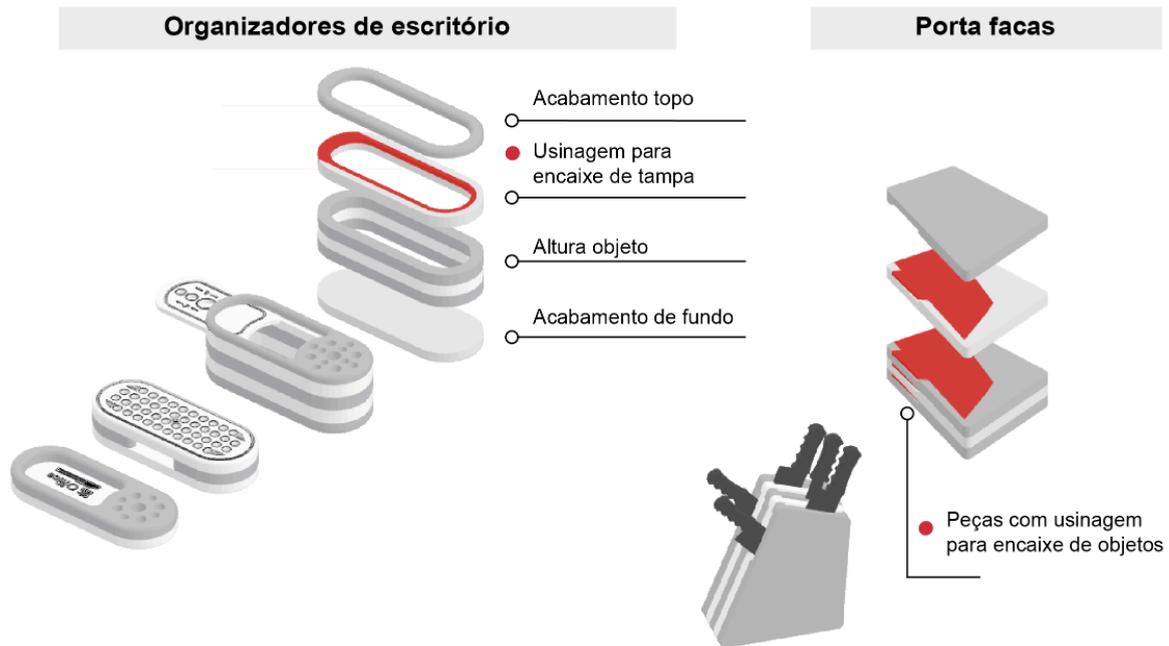


Fonte: Domingos, Alves, 2025

As peças foram categorizadas como: **Primárias (verde)**: essenciais para atender à demanda; **Secundárias (azul)**: para estoque de produção; **Terciárias (amarelo)**: projetadas a partir das peças secundárias para novos usos.

Considera-se interessante o uso da modularidade nas peças secundárias, que podem ser organizadas sobrepostas e podem formar diversos utensílios, como caixas, organizadores, objetos como porta-facas, entre outros. Essa abordagem utiliza formas simples para aproveitar áreas de sobras nos planos de corte (Figura 31).

Figura 31 - Modulação de uma Peça de Sobreposição



Fonte: Domingos, Alves, 2025

No exemplo acima é exemplificada a modulação de um organizador de escritórios e um porta-facas. Essa estrutura modular oferece flexibilidade de uso, as peças podem possuir detalhes como rebaixos e formatos para se adaptar a diferentes necessidades e garantir o aproveitamento dos retalhos.

Essa estratégia para plano de corte visa transformar a maior quantidade de matéria-prima em peças e produtos, reduzindo ao mínimo a geração de retalhos. Para isso, ações como a otimização do *design* e a criação de peças complementares são essenciais, ampliando o uso do material e alinhando sustentabilidade e produtividade.

Para solucionar o desafio dos retalhos, foram desenvolvidos produtos modulares em pequena escala, como porta facas, cabideiros e itens de decoração (Figura 32), que aproveitam até os menores resíduos. O uso de tecnologias como CNC *laser* e *router* foi primordial, oferecendo precisão, capacidade de cortes em pequena escala e acabamentos de alta qualidade, além de permitir customização. Esta abordagem permitiu criar soluções eficientes para o reaproveitamento de materiais que seriam descartados.

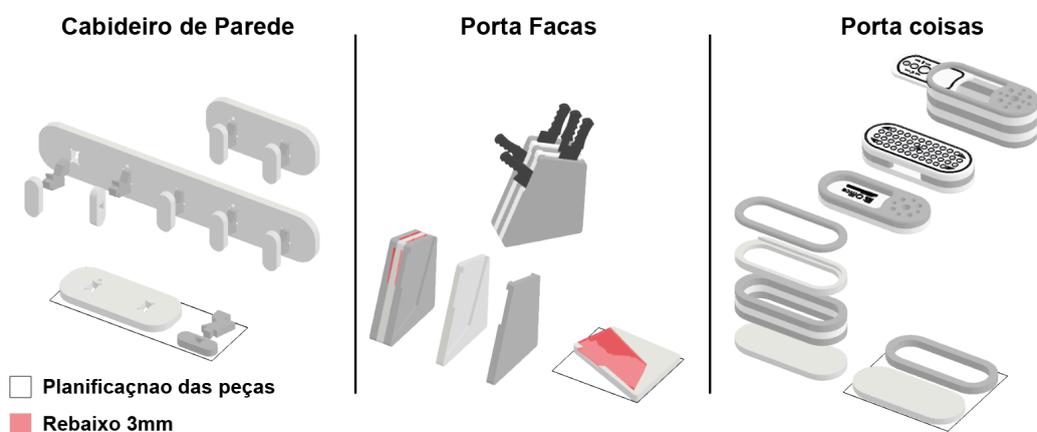
Figura 32 - Porta Facas, Cabideiro de Parede e Caixa em Madeira



Fonte: Domingos, Alves, 2025

Ao se produzir um cabideiro, por exemplo, podemos decompor sua forma em peças menores que compõem o produto, como os pegadores e a base para instalação na parede. Cada uma dessas peças é projetada de forma independente, permitindo que sejam planificadas, usinadas e cortadas com precisão antes de serem montadas. O mesmo princípio se aplica à produção de um porta facas: suas peças são projetadas de maneira modular, cortadas e usinadas separadamente, e posteriormente montadas para formar o produto. Produtos como caixas e organizadores de escritório, também podem ser desenvolvidos a partir de peças modulares que aproveitem o plano de corte, e quando montadas, criam diferentes utilidades e configurações (Figura 33). A modularidade não apenas facilita a fabricação, mas também otimiza o uso da matéria-prima, reduzindo desperdícios e permitindo a criação de produtos versáteis e com alto grau de personalização.

Figura 33 - Produtos Oriundo de Retalho MFP



Fonte: Domingos, Alves, 2025

O diagrama acima ilustra as peças "explodidas" digitalmente, mostrando como cada componente é projetado e organizado para a montagem. Essa abordagem de decomposição em peças menores não apenas facilita a fabricação, mas também otimiza o uso da matéria-prima, reduzindo desperdícios e permitindo a criação de produtos com alto grau de personalização e acabamento. Uma forma prática de aproveitar retalhos irregulares é usar uma peça já recortada como referência. Na Figura 34, a peça é fotografada sobre o retalho, projetada no computador, escalonada e vetorizada para criar um percurso de corte na CNC.

Figura 34 - Plano de Corte Retalho de MDF 15mm



Fonte: autor, 2025

No exemplo acima, é mostrado como algumas peças do porta-facas podem ser extraídas de um retalho de formato irregular e de difícil reutilização. Essa técnica demonstra como a fabricação digital, aliada à criatividade no *design*, pode viabilizar a reutilização de materiais que, à primeira vista, parecem improdutivos.

3.3.2. Substituição de ferragens e componentes por peças de retalhos

Alinhada à estratégia de desmaterialização (Silva, 2021), os procedimentos testados na pesquisa propõem a substituição de ferragens por peças de MDF cortadas a partir de retalhos. Exemplo: O Banco COFAB (Figura 35) foi produzido sem parafusos ou colagem, utilizando travas centrais e encaixes.

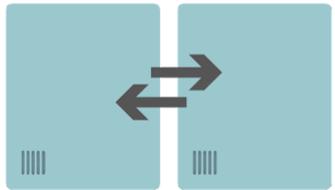
Figura 35 - Banco COFAB

Plano de corte e usinagem		Esquema 3d	Modelo físico
			
Legenda	<ul style="list-style-type: none"> ● Compensado naval 18mm ● Peças Banco 01 	<ul style="list-style-type: none"> ● Peças de travamento 	Produto montado sem ferramentas com acabamento em formica preta

Fonte: Domingos, Alves, 2025

Outro exemplo inclui a usinagem de compensado de 15 mm para a criação de encaixes, nos quais são utilizadas peças de MDF de 3mm como trilhos. Além disso, destaca-se a produção de portas com puxadores integrados, fabricados por meio de gravação a laser. Essa técnica cria um relevo na superfície da peça, permitindo uma área de pega funcional para o movimento da porta, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36. Sistema de Trilhos em MDF

Modelo digital 3d	Sistema de portas	Modelo físico
	<p>Trilhos</p>  <p>Portas</p> 	<p>Det. trilhos</p>  <p>Armário montado</p> 
Legenda	<ul style="list-style-type: none"> ● Compensado naval 15mm ● MDF 6MM ● MDF 3mm ● Usinagem para encaixe de trilhos em MDF 3mm. ● Puxador gravação laser para rebaixo 2mm 	

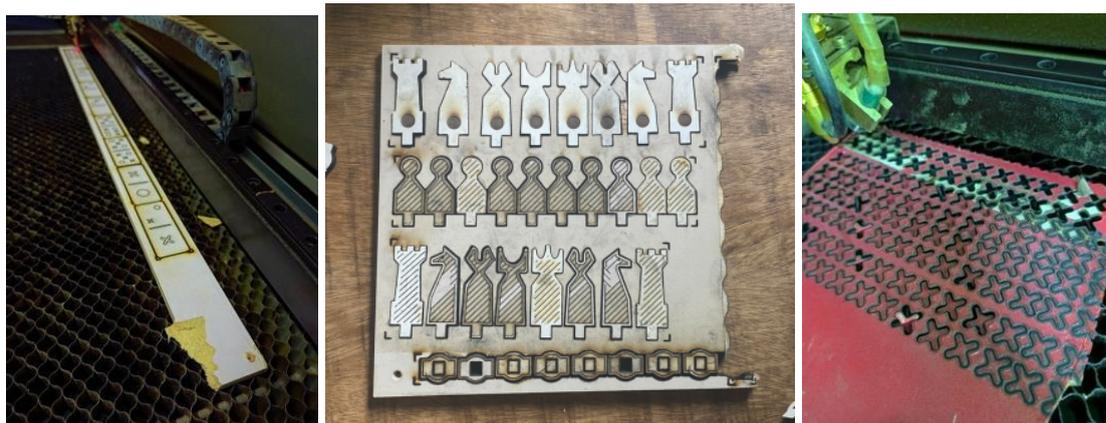
Fonte: Domingos, Alves, 2025

A diretriz proposta promove a desmaterialização, reduzindo a necessidade de componentes externos, como parafusos e colas. Além disso, reforça a sustentabilidade ao reaproveitar resíduos de produção, como retalhos de MDF, na criação de peças funcionais e estruturas modulares. A criação de encaixes funcionais como no caso do banco COFAB, evidencia como a integração de técnicas de usinagem e *design* pode resultar em produtos que dispensam parafusos e colas, ao mesmo tempo em que agregam valor estético e funcional. Ademais, a possibilidade de customização e acabamentos diferenciados, como arredondamento de bordas e aplicação de Fórmica, amplia o potencial competitivo desses produtos no mercado.

3.3.3. Artefatos Compactos: criando em pequena escala

Para essa estratégia foi explorado o desenvolvimento em pequena escala, para aproveitar os menores retalhos possíveis. Para isso, o uso da tecnologia de CNC corte à laser torna-se primordial, pois nela consegue-se precisão e cortes em pequena escala. A partir dessa tecnologia, pequenos retalhos e sobras podem ser transformados em jogos como xadrez, dominó e brinquedos infantis. No entanto, o processo de corte e gravação pode exigir limpeza química posterior para melhorar o acabamento das peças. A produção de jogos requer muitas vezes a utilização de cores e elementos nas peças para dar dinâmica às regras da jogatina. Para tanto, foram criados elementos das peças usando lâminas de Fórmica e PET. Estes materiais de uso comum na marcenaria e seus retalhos, também são pouco explorados. A estratégia foi criar peças menores de 1cm, e os materiais mostraram-se apropriados para esse tipo de acabamento (Figuras 37 e 38).

Figura 37. Plano de Jogos Criados a partir de Retalhos em MDF e Fórmica 6mm



Fonte: Domingos, Alves, 2025

Após a execução dos planos de corte na máquina laser, é necessária uma etapa de limpeza e montagem das peças, garantindo que os componentes sejam organizados e montados para que possam ser comercializados.

Figura 38. Jogos em Exposição para Venda em Feira de Artesanato Local



Fonte: Domingos, Alves, 2025

As peças produzidas como jogos e brinquedos infantis, demonstram potencial para integração em feiras de artesanato local, proporcionando uma alternativa viável para a comercialização de produtos manufaturados. Essa prática não apenas fortalece a

economia local, mas também promove a circulação de bens produzidos regionalmente, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e valorização de cadeias produtivas de pequena escala.

Esses produtos conseguem utilizar até os menores retalhos, além de aproveitar peças de diversas cores, espessuras e materiais, como MDFs, acrílicos, entre outros. Por exemplo, é possível produzir peças para jogos de tabuleiro, como Xadrez, dominó, *Rummikub*⁸, três em linha, além de blocos de montar. A Figura abaixo ilustra o projeto do corte de retalho de MDF 15 e 6mm para produzir os blocos de montar e dominó, destacando como a fabricação digital permite transformar retalhos em itens lúdicos e funcionais, agregando valor a materiais que seriam descartados (Figura 39).

Figura 39 - Plano de Corte para Peças Bloco de Montar e Dominó



Fonte: autor, 2025

No entanto, ao se produzir um jogo de tabuleiro, por exemplo, é necessário fabricar uma variedade de componentes, como a caixa para armazenamento, o tabuleiro, as peças do jogo e estruturas adicionais, como suportes e divisórias. Além disso, outros elementos podem ser considerados, como detalhes para identificação e diferenciação das peças como naipes, gravações que podem compor diferentes materiais na mesma peça (Figura 40).

⁸ Jogo de mesa que combina estratégia e sorte, no qual os jogadores formam séries e grupos com peças numeradas e coloridas. O objetivo é ser o primeiro a descartar todas as peças, criando combinações válidas. Popular por sua simplicidade e dinâmica envolvente, o *Rummikub* inspirou o desenvolvimento do *Robokub*, uma versão adaptada para a pesquisa, mantendo a lógica estratégica.

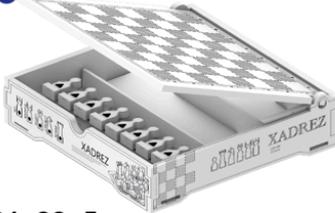
Figura 40 - Vetor de Peças para Leitura CNC Laser e Peças Produzidas



Fonte: autor, 2025

Na Figura acima, são apresentados os vetores utilizados para os percursos de gravação e corte em uma máquina CNC a laser, bem como o resultado após a aplicação dos detalhes na peça. Observa-se uma limitação do processo: o material utilizado, como o MDF de 6mm, pode influenciar diretamente o acabamento e a limpeza das peças. Durante o corte e gravação a laser em alta temperatura, o MDF libera uma resina que impregna a superfície, exigindo uma limpeza química com solventes multiuso para remover os resíduos. Isso aumenta o tempo de produção e a complexidade do acabamento. Além disso, é importante considerar a produção de peças extras, como caixas e suportes, que complementam o produto principal e agregam valor. Por exemplo, em jogos de tabuleiro, como xadrez ou *Robokub*, as caixas podem incluir divisórias internas para organização, enquanto os suportes melhoram a experiência de uso (Figura 41).

Figura 41 - Jogos Desenvolvidos, Caixas e Peças.

	Case/armazenamento	Peças	Produto
Três em Linha	 <p>8x8X2cm</p>	 <p>9 pç</p>	
Xadrez	 <p>21x22x5cm</p>	 <p>36 pç</p>	
Blocos de montar	 <p>26x20x6cm</p>	 <p>60 pç</p>	
Robokub (Rummikub)	 <p>35X25X9cm</p>	 <p>106 pç</p>	
<p>● Compensado (10mm) ● MDF (15MM) ● MDF (6MM) ● Acrílicos ● Formica</p>			
<p>⚡ CNC Laser 🏠 CNC Router</p>			

Fonte: autor, 2025

A Figura 41, ilustra exemplos de caixas e peças desenvolvidos para os jogos de tabuleiro, destacando como esses componentes adicionais podem ser integrados ao

design do produto, tornando-o mais funcional e atrativo para o consumidor. As peças produzidas, como jogos e brinquedos infantis, mostram-se eficientes para comercialização e exposição. Os produtos de jogos e de pequena escala por ocuparem menos espaço em comparação a móveis e objetos maiores facilitam o transporte, venda e a organização nesses eventos. Essa maior praticidade auxilia na manutenção da saída e circularidade das peças produzidas localmente, contribuindo para a economia regional a partir da oferta de produtos complexos e de qualidade, fabricados na própria cidade.

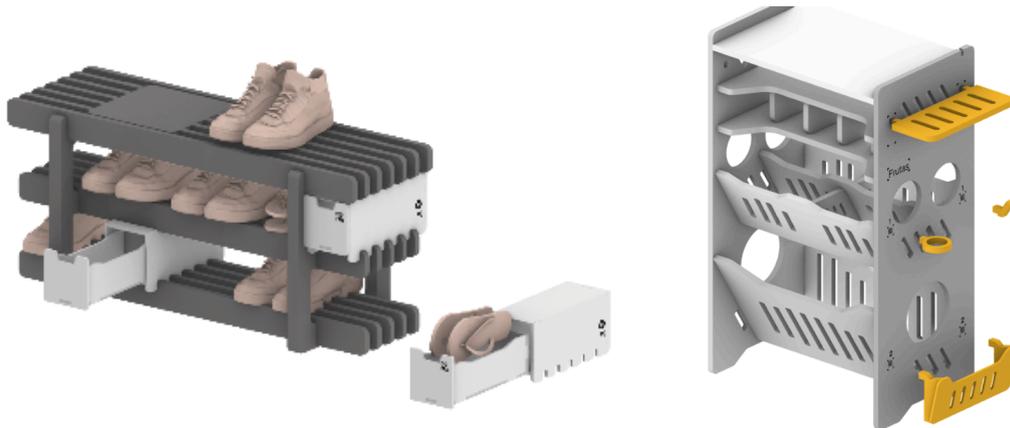
Os produtos vendidos, originados a partir de retalhos, eram identificados por meio de marcações nas próprias peças. Essas marcações, além de destacar a origem sustentável do produto, serviam como uma ferramenta de conscientização para os consumidores, comunicando o valor ambiental e social da reutilização de materiais. Esta estratégia não apenas reforça a responsabilidade ambiental da marca, como também educa o público sobre o impacto positivo de escolhas de consumo mais conscientes.

3.3.4. *Design* para previsibilidade

Segundo Silva (2021), promover uma conexão duradoura entre o usuário e o produto contribui para reduzir a substituição precoce, incentivando um uso mais consciente e prolongado. Essa conexão pode ser desenvolvida por meio de um *design* que estimule o vínculo afetivo com o objeto, aliando a possibilidade de personalização e instruções claras de uso.

A linha de móveis “Parasitas” exemplifica essa abordagem ao expandir a funcionalidade de objetos existentes, projetando peças que podem ser acopladas ou adaptadas a móveis já distribuídos (figura 42). Dessa forma, é possível agregar novos usos e prolongar a vida útil do produto original, incentivando uma experiência mais integrada e sustentável entre o usuário e o objeto.

Figura 42 - Parasitas: sapateira e fruteira com acessórios.



Fonte: Domingos, Alves, 2025

Esta abordagem incorpora a modularidade como princípio essencial, caracterizando-se pela criação de produtos com componentes independentes e intercambiáveis. Essa concepção proporciona flexibilidade, adaptabilidade e possibilidade de expansão conforme demandas dos usuários, permitindo a integração de peças adicionais por meio de conexões padronizadas e interativas.

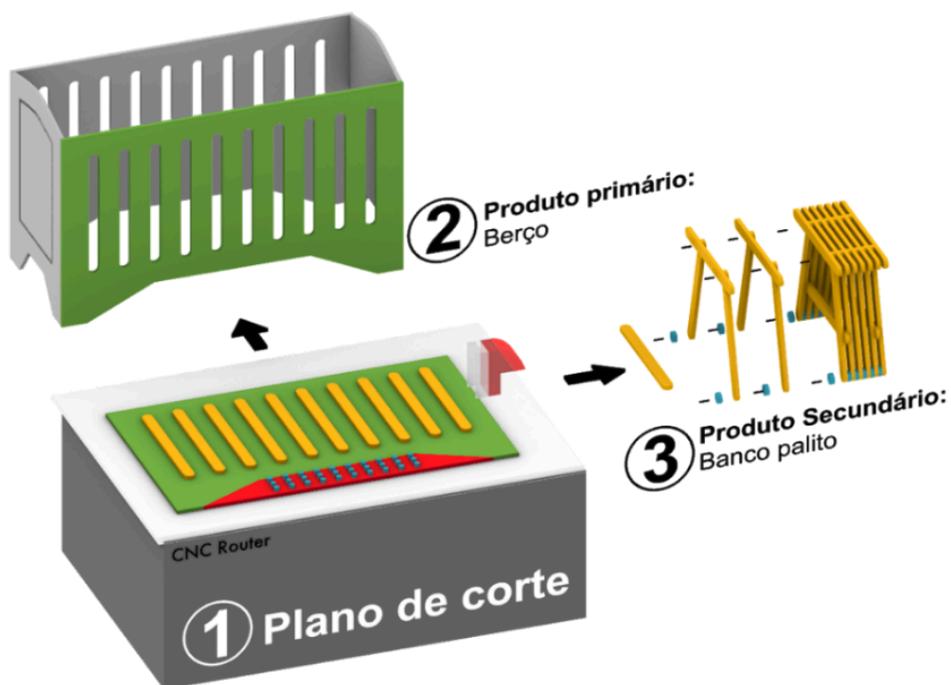
Conforme destaca Silva (2021), a modularidade é um dos conceitos-chave do *Ecodesign*. Ela envolve o desenvolvimento de módulos configuráveis, em que partes sujeitas a desgaste ou obsolescência podem ser facilmente substituídas ou atualizadas. Essa estratégia favorece práticas sustentáveis como manutenção, desmontagem, remanufatura, reuso e reciclagem, ampliando significativamente o ciclo de vida dos produtos.

3.3.5. Visualizar função para os retalhos padronizados

O aproveitamento dos retalhos padronizados é um aliado na otimização de recursos, e isso se deve porque nessa estratégia há um alto aproveitamento da matéria prima, que pode já ter o formato ideal para se criar um produto secundário, ou que precise de alguma alteração de usinagem para se transformar em um novo produto. Na Figura 43, é exemplificado como o corte de uma peça lateral de um berço gera resíduos padronizados,

assim como essas peças ordenadas e montadas geram um novo produto, no caso um Banco Palito.

Figura 43 - Produção Banco Palito



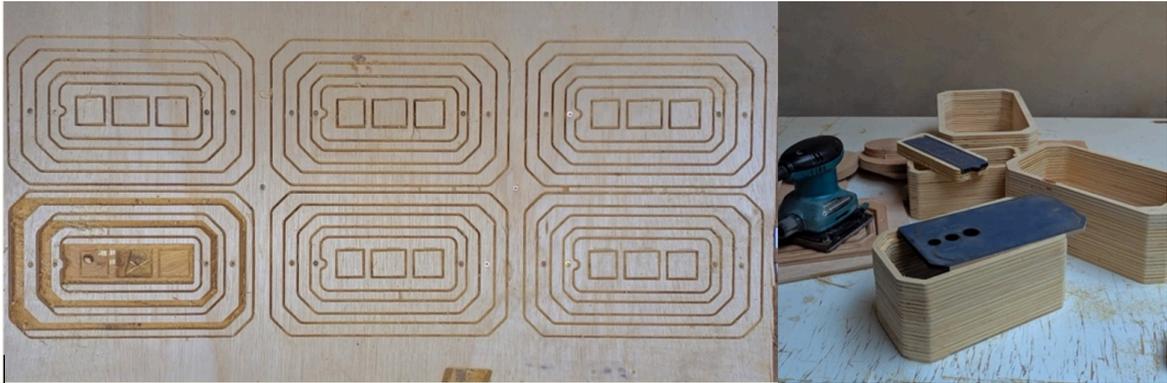
Fonte: Domingos, Alves, 2025

Essa abordagem permite, não apenas reduzir o desperdício, mas também criar valor adicional nos planos de corte e na matéria prima considerada retalho, aproveitando ao máximo cada recurso e gerando peças complementares com o mesmo padrão de acabamento.

3.3.6. Conceito Boneca Russa na otimização do plano de corte

Inspirado na boneca russa (em que bonecas surgem de dentro de outras), o *nesting* otimiza o material criando peças modulares. Essa técnica é ideal para objetos decorativos ou funcionais (Figura 44).

Figura 44. Plano de Corte Caixas Modulares



Fonte: Autor, 2025

Com essa abordagem, torna-se interessante desenvolver peças modulares, em que cada uma, encaixa-se dentro da outra, otimizando as áreas de corte. Portanto, o projeto da disposição das peças não é um coadjuvante no processo, mas um definidor da performance programada pelo *designer*.

3.3.7. Use conforme seu entorno

Esse método baseia-se no uso de materiais além das chapas de corte, para experimentar usar objetos do seu entorno. Sugere-se iniciar observando os recursos locais, como sobras de madeira, chapas de MDF, peças metálicas ou tijolos.

No exemplo da Figura seguinte, é criado um *Hack* usando tijolos e sobras de compensado. O processo começa com o dimensionamento das peças no *software* para criar um encaixe que se ajuste ao tamanho padrão dos tijolos (Figura 45). Após a produção, o mobiliário final pode ser montado com o mínimo de fixação, facilitando a desmontagem e permitindo que as peças sejam reaproveitadas ou rearranjadas em outro ambiente.

Figura 45. Hack com Tijolos



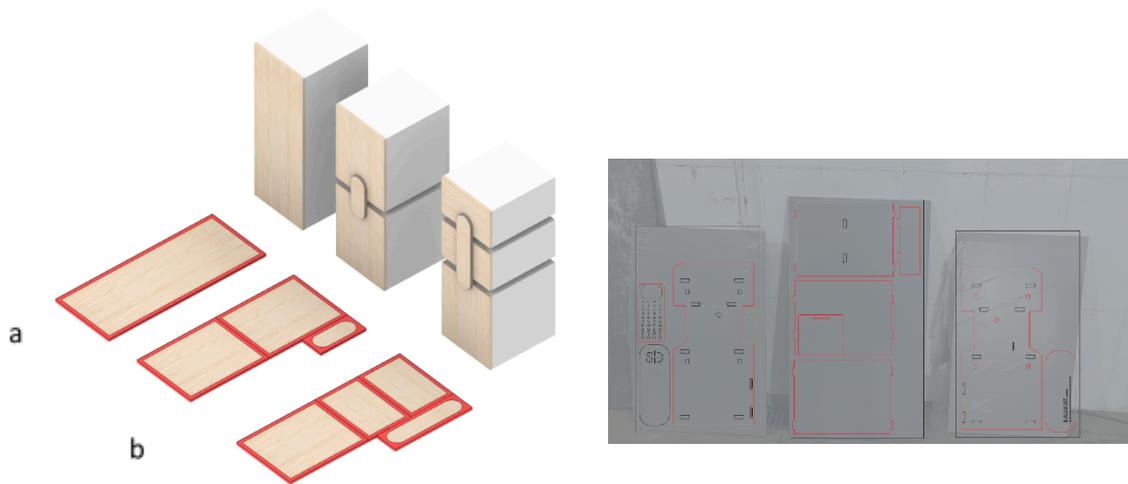
Fonte: Domingos, Alves, 2025

Ao integrar esses recursos ao *design*, é possível criar mobiliários e objetos que se adaptam às necessidades do ambiente, promovendo a reutilização de materiais que seriam descartados. Esse enfoque não apenas reduz o desperdício, mas também incentiva a experimentação e a inovação, ao desafiar o *designer* a pensar além das chapas de corte convencionais.

3.3.8. Adeque-se ao seu retalho

Dividir móveis em seções menores permite o uso de retalhos variados sem comprometer a estabilidade ou estética. Exemplos incluem móveis com laterais seccionadas e suportes laterais para resistência (Figura 46).

Figura 46. Diferentes Configurações de um Móvel e Projeção do Corte nos Retalhos



Fonte: autor, 2025

a. Formato Completo com Retalhos Grandes: abordagem ideal quando as peças de retalho possuem dimensões próximas ao tamanho final do móvel. Assim, o retalho pode ser adaptado ou recortado para formar partes inteiras do móvel sem necessidade de seccionar.

b. Seccionamento para retalhos menores: quando os retalhos são menores que a dimensão final das peças, pode-se seccionar o *design* em partes menores que vão ser montadas com uma peça central para chegar às dimensões necessárias.

A próxima etapa envolve a programação do plano de corte para cada peça, individualmente ou em conjunto, em que os planos de corte precisam ser projetados e alinhados de acordo com a disposição das peças na mesa da CNC (Figura 48). Esse alinhamento garante precisão na execução e otimiza o uso de material, respeitando as coordenadas e orientações definidas para cada corte.

Figura 47. Plano de Corte Adequado aos Retalhos e Peça Produzida



Fonte: autor, 2025

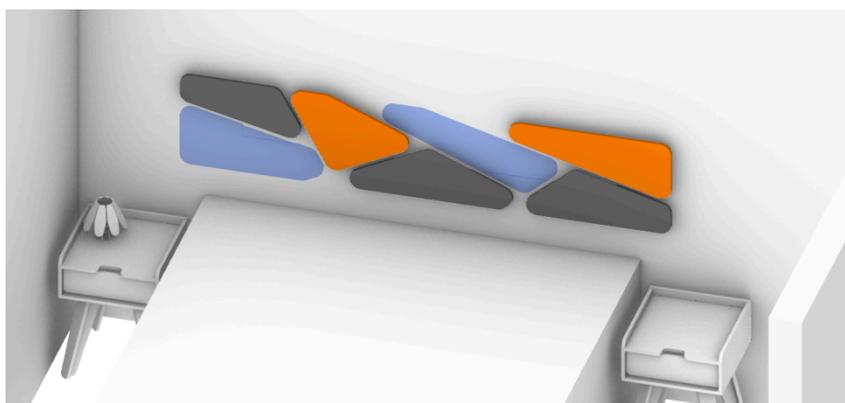
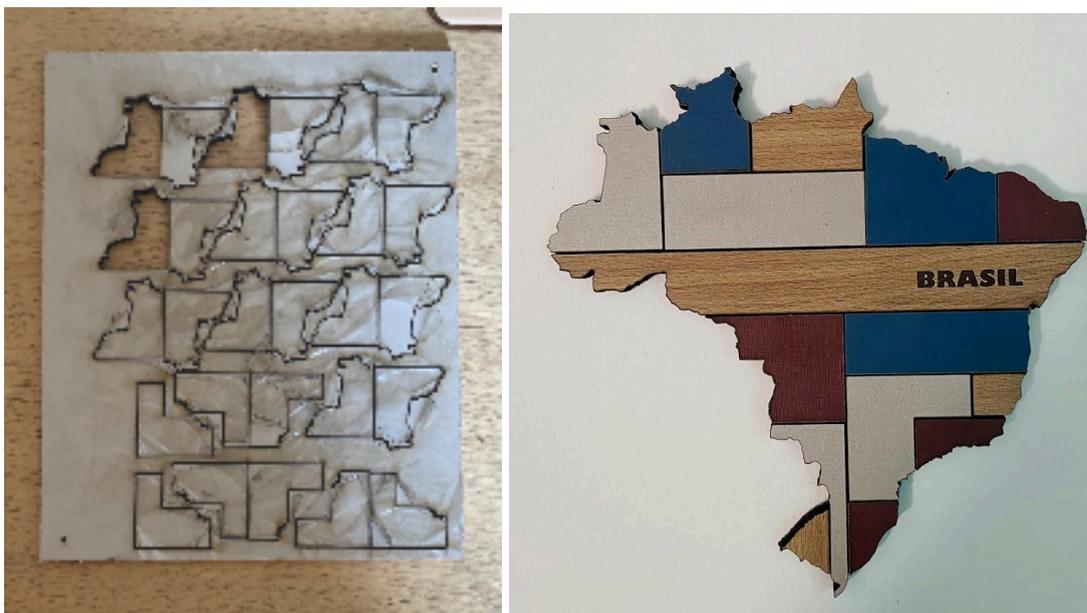
Ao adaptar o *design* às dimensões dos retalhos disponíveis, é possível reduzir o desperdício de materiais e promover uma produção mais sustentável. A programação para o uso dos retalhos pode parecer mais complexa, pois o posicionamento dos retalhos na mesa de corte CNC, precisam ser os mesmos definidos na programação para o corte automatizado. Com isso é possível garantir a eficiência no uso dos recursos para a criação de peças como o armário para apoio de ferramentas, conforme ilustrado à direita da Figura 47.

3.3.9. Em último caso: mosaicos

A técnica de usar mosaicos visa otimizar o uso de retalhos menores e planos de corte, especialmente quando as sobras têm tamanhos e formas variados e não tem muito tempo para implementar um *design* mais complexo. O fator de poder reunir pequenas peças de diversas cores para formar uma grande figura, torna essa técnica a mais rápida e versátil a se usar no dia a dia.

Os mosaicos podem se tornar peças de decoração ou brinquedos/jogos, como o uso do mosaico para peças de decoração como um Quadro do Brasil em mosaico e o uso de uma peça de decoração para cabeceira de cama (Figura 48).

Figura 48 – Retalho de MDF 6mm - Mosaico Brasil e Cabeceira de Cama



Fonte: autor, 2025.

Portanto, as estratégias apresentadas demonstram uma transformação significativa nos processos de fabricação digital, promovendo a integração entre eficiência produtiva e sustentabilidade. A maximização da ocupação nos planos de corte, por meio da disposição eficiente das peças e do *design* adaptativo, reduz consideravelmente o desperdício de materiais. A criação de artefatos compactos evidencia o potencial de valorização dos menores e mais diversos retalhos, demonstrando como resíduos gerados em máquinas CNC *Router* podem ser integrados a outros processos, como o corte a laser, que possibilita o aproveitamento de fragmentos ainda menores com alta precisão.

A substituição de ferragens por encaixes, ou peças de mesmo material usinado, permitem a simplificação na desmaterialização do produto para reuso ou fim do ciclo de vida do produto. O *design* voltado à previsibilidade e modularidade contribui para a ampliação do tempo de vida dos produtos. Estratégias como uso de mosaicos demonstram que até os menores resíduos com formatos irregulares podem tornar-se matéria-prima viável. Quando orientada por essas diretrizes, a fabricação digital não apenas reduz o impacto ambiental, como também fortalece economias locais, a exemplo da comercialização dos produtos em feiras regionais.

Validadas por meio de um estudo de caso real, essas soluções oferecem um modelo replicável para pequenos produtores, combinando inovação técnica, sustentabilidade material e viabilidade econômica. O resultado é um sistema produtivo capaz de transformar limitações em oportunidades, evidenciando que eficiência e responsabilidade ambiental podem caminhar juntas.

4. CONCLUSÃO

A pesquisa apresentou estratégias de *design* para aproveitamento de resíduos em planos de corte CNC, buscando investigar e validar como a fabricação digital pode transformar práticas de produção, especialmente em setores como marcenaria e pequenos negócios. Ao explorar métodos de aproveitamento de retalhos, surgiram desafios como: desenvolver técnicas em plano de corte, *design* de encaixes, relação sustentável quanto ao uso de retalhos; criação de peças modulares; prever usos futuros para peças, de modo a reduzir o desperdício; aumentar a eficiência; e promover uma relação mais sustentável com os recursos, aproximando-se de técnicas de *ecodesign*, sugeridas por Silva (2021).

As estratégias adotadas nesse estudo podem ser organizadas em três princípios: a maximização do aproveitamento nos planos de corte; o uso de técnicas de otimização e reaproveitamento de retalhos; e o desenvolvimento de designs orientados à melhoria do desempenho dos produtos. Além disso, percebeu-se que, com o uso de retalhos, foi possível implementar estratégias criativas para transformar sobras de produção em novos componentes úteis, incluindo a criação de peças modulares e sistemas de encaixes inteligentes que façam uso de materiais residuais. Também foram desenvolvidas abordagens projetuais flexíveis que permitiram adaptar os produtos às características dos retalhos disponíveis, incorporando conceitos como peças multifuncionais e sistemas construtivos versáteis.

Acredita-se, assim, que essas técnicas não apenas otimizam o uso de matéria-prima, como também introduzem flexibilidade e inovação nos processos produtivos, incentivando o uso consciente de materiais e prolongando a vida útil dos produtos. Com uma abordagem voltada à sustentabilidade e à personalização, a fabricação digital posiciona-se como uma ferramenta poderosa na transformação da cadeia produtiva, possibilitando um mercado mais alinhado com os princípios de economia circular e *design* sustentável.

Nesse contexto, a pesquisa buscou aprimorar os processos de fabricação, permitindo aos *designers* influenciar a produção para criar produtos mais eficientes e sustentáveis. As soluções para reutilização de retalhos são desenvolvidas com base na Teoria de *Design* de Produto focando em soluções plausíveis e adequadas. Ademais, as práticas desenvolvidas nesse período estão alinhadas com o ODS 12 da ONU (2024), que

promove o consumo e a produção sustentáveis. Destaca-se, também, um ponto relevante da pesquisa como a integração das informações geradas pelos planos de corte ao ciclo de relatórios de estoque da empresa, facilitando a adoção de práticas mais sustentáveis na gestão de materiais e resíduos.

Do ponto de vista dos produtos gerados, foi possível criar peças que são comercialmente viáveis utilizando retalhos e otimizando a matéria-prima, atendendo o objetivo de promover a sustentabilidade e impulsionar a economia local, destacando-se a redução do impacto ambiental, estratégias e boas práticas para fabricação subtrativa. As diretrizes apresentadas ao longo dessa análise respondem a desafios práticos observados na produção local, bem como apontam caminhos promissores para o futuro da fabricação digital com foco em sustentabilidade.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

As abordagens aqui sistematizadas, como o reaproveitamento de geometrias remanescentes, a modularização de componentes, o uso de encaixes e a organização dos planos de corte com foco no aproveitamento máximo do material, oferecem caminhos práticos para uma produção mais eficiente, sustentável e adequada às realidades da pequena escala. Ao consolidar essas diretrizes em um contexto aplicado, o estudo propõe subsídios para o desenvolvimento de metodologias replicáveis, que podem fortalecer práticas futuras em *design*, fabricação e inovação voltadas à responsabilidade ambiental.

Nesse cenário, como desdobramento futuro, essa investigação abre espaço para o aprofundamento de processos automatizados que ampliem o impacto das diretrizes propostas. Aplicativos e *plugins* como o *Grasshopper* e outros *softwares* de modelagem paramétrica possibilitam automatizar etapas-chave da produção, como a análise e a otimização dos planos de corte, a geração de *layouts* eficientes e a aplicação sistemática de critérios de reaproveitamento de matéria-prima. As diretrizes de princípio de maximização de planos de corte podem ser potencializadas por meio da criação de algoritmos que cruzem informações entre peças primárias e secundárias, a partir de bancos de dados de produção. Esse processo permite a identificação automatizada de oportunidades de encaixe de peças em áreas vagas da chapa, elevando o nível de eficiência e sustentabilidade da fabricação digital.

Além disso, a incorporação de tecnologias emergentes, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, poderá contribuir para tomadas de decisão cada vez mais autônomas e precisas no contexto da fabricação digital.

Espera-se que essa pesquisa possa contribuir para que outros profissionais e pesquisadores da área adotem estratégias de design voltadas à otimização dos resíduos gerados por processos de fabricação digital subtrativa como soluções inovadoras, explorando o potencial de um processo mais eficiente, conectado e comprometido com a sustentabilidade.

5. REFERÊNCIAS

ABRÃO, Júlia Souza. **Fabricação Digital e o Projetar Sustentável: o uso de softwares de modelagem como estratégia para antever e minimizar os impactos ambientais da produção subtrativa**. 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.818>.

ALVES, Gilfranco; Dias, Silva Mayara; TRUJILLO, Juliana. **Algo+ritmo: reflexões sobre ensino, pesquisa e extensão em arquitetura e urbanismo**. São Paulo: Probooks, 2022. ISBN 976-65-999424-1-9.

BALLERINI, Flávia. **Fabricação digital: uma análise crítica – fortalecendo a cooperação por meio da fabricação digital**. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (NPGAU), Belo Horizonte, 2017.

BARROS, Alexandre Monteiro de. **Fabricação Digital: Sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental**. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2011.

BARROS, Alexandre Monteiro; SILVEIRA, Natália Schmitt. **A fábrica mínima: tecnologias digitais para a produção local e customizada de artefatos físicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 11., 2014, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2014. v. 1, n. 4, p. 1947-1958. ISSN 2318-6968. DOI: <https://doi.org/10.5151/designpro-ped-00201>.

BORGES, Marina. **Fabricação digital no Brasil e as possibilidades de mudança de paradigma no setor da construção civil**. Tecnologia da Informação e Comunicação no Ambiente Construído, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000400106>.

BORHANI, Alireza; KALANTAR, Negar. **Nesting fabrication**. In: ACADIA 2021: REALIGNMENTS: TOWARD CRITICAL COMPUTATION, 41., 2021, Online and Global. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2021. p. 318-327. ISBN 979-8-986-08056-7. Disponível em: https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/acadia21_318. Acesso em: 18 ago. 2024.

BERNARDO, Marcus; CABRAL, José. **Fabricação digital e variedade fora do contexto industrial**. In: CONFERÊNCIA DA SOCIEDADE IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 18., 2014, Montevideu. Anais. Montevideu: [s.n.], 2014. p. 320-323. ISBN 978-9974-99-655-7.

CACCERE, João Paulo Amaral; DOS SANTOS, Aguinaldo. **Fabricação digital como abordagem para a produção e design distribuídos**. Dissertação (Mestrado) UFPR Paraná, PR, 2017.

DOMINGOS, Paulo Ricardo Magalhães; ALVES, Gilfranco Medeiros. **FABRICAÇÃO DIGITAL: MODELOS DE PRODUÇÃO E DESIGN PARA OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE CORTE**. In: Anais Graphica 2024: XV International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design. Anais...Pelotas(RS) Universidade Federal de Pelotas (UFPe) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul) | Câmpus Pelotas, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/graphica-430628/837180-FABRICACAO-DIGITAL--MODELOS-DE-PRODUCAO-E-DESIGN-PARA-OTIMIZACAO-DE-PLANOS-DE-CORTE>. Acesso em: 31/05/2025

DOMINGOS, Paulo Ricardo Magalhães; ALVES, Gilfranco Medeiros. **Design para fabricação digital: Diretrizes para reduzir impactos na produção de objetos Flat pack**. *Revista De Design, Tecnologia E Sociedade*, 12(1). Recuperado de <https://periodicos.unb.br/index.php/design-tecnologia-sociedade/article/view/57185>.

FERRARY, Felipe Rodrigues. **Apoio à tomada de decisão e minimização da perda de matéria prima em processos de manufatura**. 2015. 143f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

GERSHENFELD, Neil. **How to make almost anything: the digital fabrication revolution**. *Foreign Affairs*, v. 91, 2012. Disponível em: <http://cba.mit.edu/docs/papers/12.09.FA.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2022.

LAJARIN, Sérgio Fernando. **Definição e histórico da fabricação digital**. Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR, Curitiba. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC131/Aula%201%20-%20MA%20-%20Defini%C3%A7%C3%A3o%20e%20historico%20-%20PB.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MITCHELL, Phil; WATT, Harry. **Strategies for the new American furniture industry**. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2009. Disponível em: <https://content.ces.ncsu.edu/strategies-for-the-new-american-furniture-industry>. Acesso em: 5 abr. 2024.

MILTON, Alex; RODGERS, Paul. **Research methods for product *design***. London: Laurence King, 2013. ISBN 978-1780673028.

OPENDESK. **Sobre a Opendesk**. Disponível em: <https://www.opendesk.cc/about>. Acesso em: 25 ago. 2024.

Opendesk. **Why ply? Covering the basics**. Disponível em: <https://www.opendesk.cc/blog/why-ply-covering-the-basics> acesso em: 25 abril. 2025.

Opendesk. **Design for open making and cnc machines**. Disponível em: <https://www.opendesk.cc/blog/design-for-open-making-and-cnc-milling-machines> acesso em: 25 abril. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). ODS 12: **consumo e produção responsáveis: garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 25 ago. 2024.

PUPO, Regiane Trevisan. **Inserção da prototipagem e fabricação digitais no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura**. Tese (Doutorado). Campinas, SP, 2009.

SEBRAE. **Entenda o conceito de design thinking e como aplicá-lo aos negócios**. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/design-thinking-inovacao-pela-criacao-de-valor-para-o-cliente,c06e9889ce11a410VgnVCM1000003b74010aRCRD>. Acesso em: 20 abr. 2024.

6. APÊNDICES

6.1 Guia visual para aproveitamento de planos de corte CNC Router e Laser: 09 diretrizes e boas práticas em fabricação subtrativa.

6.2 Artigo: Fabricação Digital: modelos de produção e *design* para otimização de planos de corte. Graphica, 2024.

<https://www.even3.com.br/anais/graphica-430628/837180-fabricacao-digital--modelos-de-producao-e-design-para-otimizacao-de-planos-de-corte>

6.3 Artigo: *Design* para fabricação digital: Diretrizes para reduzir impactos na produção de objetos *Flat pack*. - Revista *design*, tecnologia & sociedade, 2025.

<https://periodicos.unb.br/index.php/design-tecnologia-sociedade/article/view/57185/42446>

6.4 Artigo: *Design* para fabricação digital: Modelos de produção e Produtos para otimização de planos de corte - Revista Brasileira de Expressão Gráfica.

<https://rbeg.net/index.php/rbeg/issue/view/24>

DESIGN PARA FABRICAÇÃO DIGITAL

09 DIRETRIZES E BOAS PRÁTICAS
PARA FABRICAÇÃO SUBTRATIVA

**CO-
FAB**

**Guia Visual para Aproveitamento de
Planos de Corte CNC Router e Laser**

Paulo Domingos



Informações Técnicas

Este guia foi elaborado como parte integrante da dissertação de mestrado desenvolvida no programa de Mestrado Profissionalizante em Eficiência Energética e Sustentabilidade, no período de 2023 a 2025.

Título da Dissertação

Design para Fabricação Digital: Diretrizes e Boas Práticas para Fabricação Subtrativa

Autor

Paulo Domingos

Orientador

Prof. Dr. Gilfranco Alves

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
2025

Um guia para um Design Mais Eficiente

O avanço da **fabricação digital** trouxe ganhos evidentes em produtividade e liberdade formal. No entanto, esse progresso técnico caminha ao lado de uma lacuna preocupante: a ausência de estratégias de reaproveitamento, **otimização de cortes** e protocolos sustentáveis revela que, apesar de mais precisos, ainda estamos produzindo de forma negligente e descartável.

Voltado a **designers, makers, arquitetos, fabricantes e estudantes**, o material serve como referência técnica e prática, ajudando na tomada de decisões mais sustentáveis e produtivas.

Mais do que instruções, o guia propõe **caminhos práticos** para integrar processos mais **sustentáveis** e críticos de produção com o uso da fabricação digital. É proposto uma aproximação entre projeto e fabricação, incentivando a experimentação e a aplicação crítica das tecnologias digitais.

Fabricação Digital

A fabricação digital inaugura uma nova revolução industrial, marcada pela união entre o mundo digital e o físico. **Máquinas CNC** (Controle Numérico Computadorizado), permitem transformar arquivos digitais em objetos físicos por meio de processos automatizados, como cortes, usinagens, adições de material e a criação de formas complexas

Esse modo de produzir aproxima o designer do processo produtivo, além disso, o avanço tecnológico impulsiona o movimento **open source**, que estimula o compartilhamento de projetos e a produção colaborativa. Em vez de grandes fábricas, surgem redes locais mais acessíveis, sustentáveis e distribuídas.

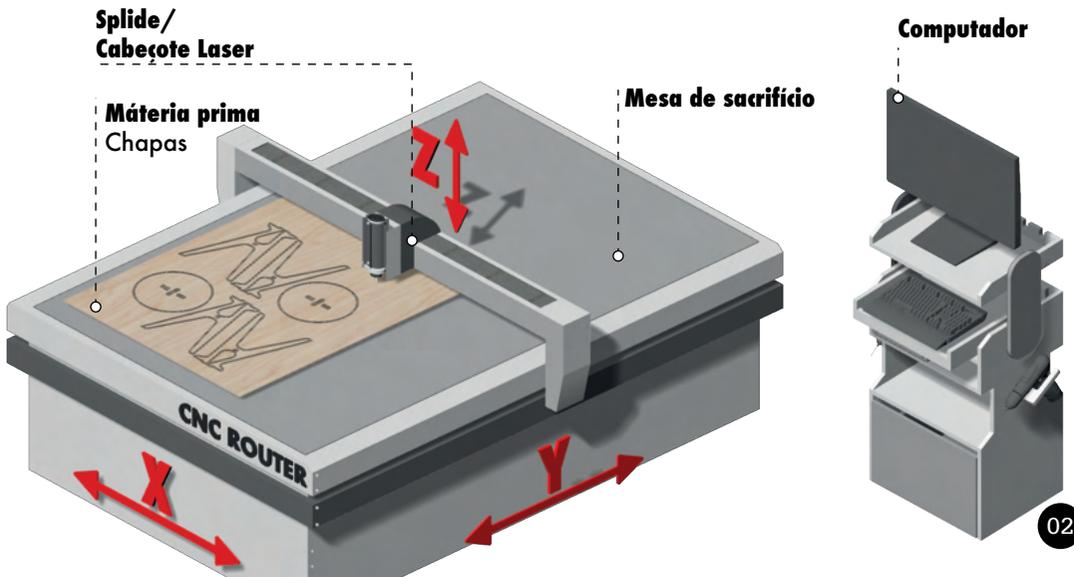
Alfabetização fab (**fab Literay**) como as competências necessárias para alavancar as tecnologias de fabricação digital para atingir objetivos pessoais e profissionais significativos, bem como um compromisso com o uso responsável das tecnologias.

Gershenfeld, 2017, p. 64

Tecnologias e operações

A aplicação de tecnologias CNC no design permite explorar estratégias como a **fabricação subtrativa**, utiliza máquinas CNC para remover material de blocos sólidos e formar peças com precisão.

O processo é controlado por computador e ocorre por meio de cortes e usinagens em eixos **X, Y e Z**. Essa técnica permite explorar encaixes, geometrias complexas e aproveitamento de chapas planas.



CNCs para fabricação subtrativa



CNC Router: usa motor que gira a fresa — também chamado de splinde— gira e se desloca nos três eixos para cortar, perfurar ou entalhar materiais mais espessos.

CNC Laser: Usa um feixelaser que percorre principalmente os eixos X e Y, ajustando o Z para o foco, cortando e gravando com alta precisão diversos materiais.

Sustentabilidade

Segundo Silva (2022), o impacto ambiental de um produto se define, em grande parte, na fase de projeto. É nesse estágio em que são tomadas decisões cruciais sobre materiais, processos produtivos, formas de uso, durabilidade e destino final. A partir dessas escolhas, delinea-se não apenas o desempenho funcional do objeto, mas também sua pegada ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, tornando as diretrizes de sustentabilidade cada vez mais indispensáveis.

○ Ecodesign

Integração de critérios de sustentabilidade ao longo do **ciclo de vida** do produto;

Redução do uso de **recursos naturais** desde a concepção até o descarte;

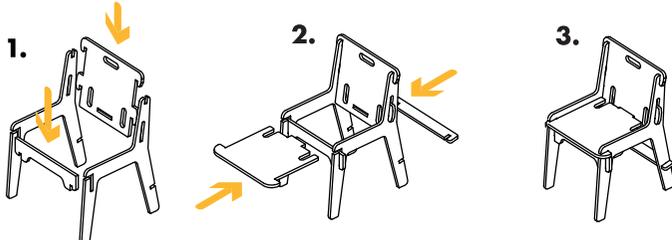
Minimização dos impactos ambientais, sociais e econômicos;

Valorização de estratégias como **reutilização, desmontagem, manutenção** e escolha consciente de materiais.



Designs Propostos

As peças propostas neste guia seguem o princípio do design **flatpack**: componentes planos que se encaixam, dispensando parafusos ou ferragens. A solução facilita montagem, transporte e produção em pequena escala, além de permitir desmontagem, reparo e reaproveitamento. O design permite ações sustentáveis ao longo do ciclo de vida do produto: desde a escolha de materiais renováveis como MDF e compensado, passando pela racionalização na fabricação e distribuição, até a possibilidade de reuso ou descarte.



1. 2. 3.

Cadeira Flatpack
montagem em 3 etapas

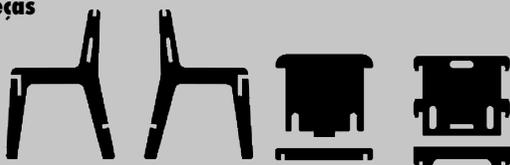
As diretrizes também se aplicam à criação de **utensílios, jogos, brinquedos e artigos de decoração**, que podem exigir processos extras como colagem, lixamento ou parafusamento, sempre visando o melhor aproveitamento dos retalhos e da matéria-prima.



Nesting: alinhamento das peças

Nesting é a estratégia de organizar essas peças no **plano de corte de forma eficiente**, usando softwares para distribuir as formas sem sobreposição, **maximiza o uso da matéria-prima**, reduz o desperdício e permite gravar informações diretamente nas peças, facilitando sua identificação e montagem.

Peças



Nesting



O design **flatpack** e a técnica de **nesting** se complementam para otimizar a produção em fabricação subtrativa

Materialidade

Para Silva (2022) não existe material bom ou material ruim. Sempre é necessário analisar todo o contexto de uso e as características do produto para compreender qual solução é a mais adequada.

Compensado

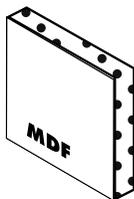
Esp.: 3 a 20mm



*Lâminas de madeira sobrepostas

MDF

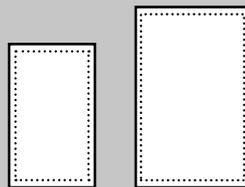
Esp.: 3 a 20mm



*Algutinado de fibras de madeira

Dimensão

Chapas de compensado tem como padrão **1,6x2,2m** enquanto chapas de **MDF 1,85x2,75m**



O MDF e o compensado são ideais por serem planos, resistentes, **padronizados**, ideais para cortes em CNC, além de a sua fonte ser madeira reflorestada. Permitem **encaixes precisos**, bom aproveitamento do material e podem receber acabamentos com fórmica ou lâmina PET, adicionando cor e durabilidade às peças.

Hora de Criar!

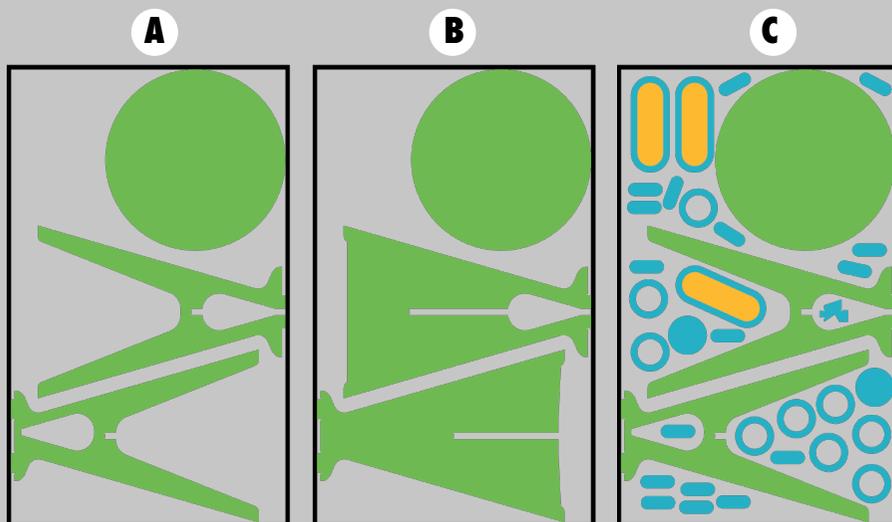
Peguem suas parafusadeiras, **liguem as CNCs**, abram os arquivos no computador, preparem as colas, máscaras e disposição!

Essas **diretrizes** são um convite para explorar formas criativas, sustentáveis e eficientes de transformar planos de corte e retalhos em soluções inteligentes. Bora colocar a mão na massa e descobrir como dar vida nova ao que antes era sobra!

As **estratégias** a seguir buscam, otimizar os planos de corte, reutilizar retalhos, substituir componentes e melhorar o desempenho dos produtos, reduzindo resíduos e ampliando o potencial produtivo.

1 Maximização de Ocupação no Plano de Corte

A primeira estratégia é essencial para aumentar o número de peças úteis retiradas de uma chapa. A chave está em projetar com foco no aproveitamento total da chapa, isso pode ser feito de três formas:



■ Peças primárias ■ Peças Secundárias ■ Peças Terciárias □ Sobras

(A) Disponibilizar as peças na chapa de forma otimizada, aproveitando ao máximo o espaço disponível;

(B) Adaptar o design das peças para que otimizem o uso da chapa, evitando formas complexas e desperdício de material;

(C) Incluir peças Secundárias e Terciárias e complementares nas áreas que sobrariam, como peças modulares que possam se tornar outros artefatos.

O exemplo mostra três planos de corte para uma mesa de apoio com três peças principais. Cada um apresenta um nível diferente de aproveitamento da chapa, destacando a importância do bom planejamento no uso do material.

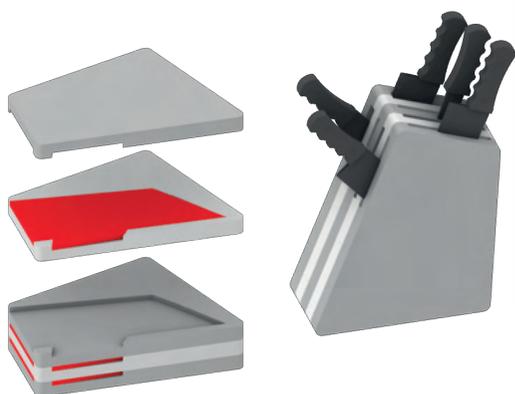
Crie peças Secundárias com Modularidade

O uso de peças modulares é uma solução para transformar sobras em produtos úteis. Projetadas com formatos simples, rebaixos e encaixes, essas peças adaptam-se aos espaços restantes no plano de corte.

Podem ser produzidas com antecedência e armazenadas para montagem futura, otimizando o aproveitamento do material e facilitando a fabricação em pequena escala.

Porta-facas

Desenvolvido a partir de retalhos de MDF, usinados, e montados colados em camadas como um “sanduíche”.



Porta-treco

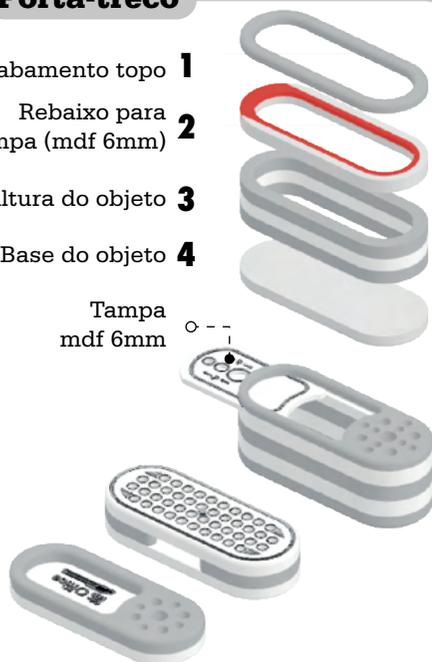
Acabamento topo **1**

Rebaixo para tampa (mdf 6mm) **2**

Altura do objeto **3**

Base do objeto **4**

Tampa mdf 6mm



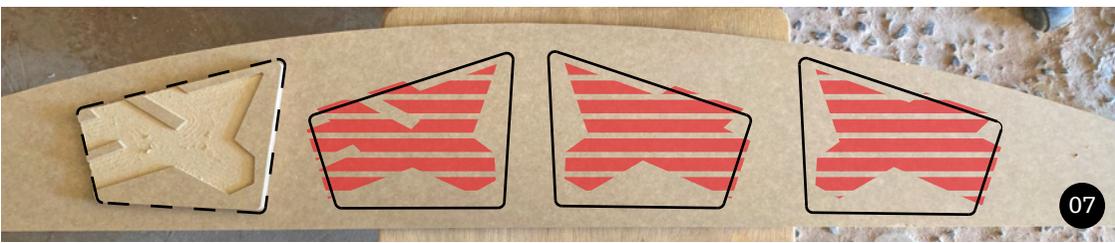
As peças modulares seguem uma ordem de montagem que define suas funções, como suportes, aberturas e encaixes, previstos no projeto e finalizados na montagem. Isso se aplica tanto ao porta-facas, que ganha forma a partir da combinação dessas peças.

... Projeção

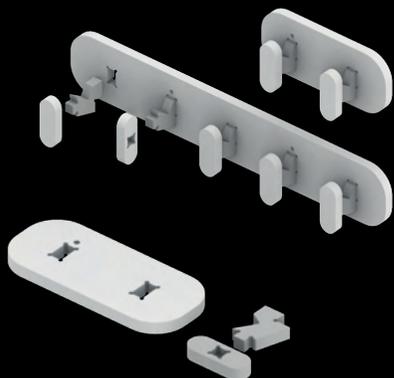
— Vetor de corte

■ MDF cru 15mm.

■ **Rebaixo:** -2mm em z



Cabideiro



O cabideiro é dividido em peças menores, como base e pegadores, que são projetadas para corte plano e encaixe preciso.

A ocupação do plano de corte demonstra como a fabricação digital, aliada à criatividade no design, viabiliza a reutilização de materiais que, à primeira vista, parecem improdutivos.



2 Substituição de Ferragens e Componentes por Peças de Retalhos

Alinhada à estratégia de desmaterialização proposta por Silva (2021), sugere-se substituir ferragens por usinagens, encaixes funcionais ou novas peças do próprio material.

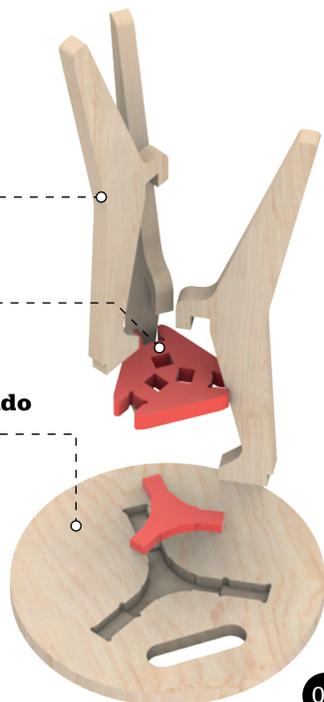
Banco Cofab

Montado sem o uso de parafusos ou cola, utilizando apenas encaixes e travas centrais. Sua estrutura é composta por três pernas e um assento com encaixes dedicados.

Pernas

Travas

Assento usinado



Trilhos em MDF

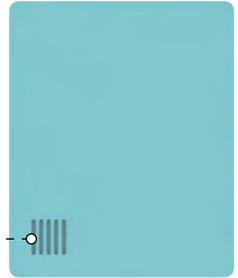
Outro exemplo esta na substituição de ferragens por peças de MDF ou Compensados de diferentes espessuras.

O trilho pode usar mdfs de 3 a 6mm, com encaixes usinados na peça de tamponamento. Integrar **puxadores** nas portas com gravação a laser, criando relevos que servem como área de pega.



Trilho em MDF

Puxador
Gravação laser



Encaixes p/
trilho



Trilho em MDF

A proposta promove a desmaterialização, reduzindo a necessidade de componentes externos, além de possibilitar o reaproveitamento retalhos de espessuras diversas. Com usinagens e encaixes é possível criar soluções rápidas e personalizáveis e com bom acabamento.

3 Artefatos Compactos: Criando em Pequena Escala

Para essa estratégia foi explorado o desenvolvimento em pequena escala, para aproveitar os menores retalhos possíveis. Para isso, o uso da tecnologia de **CNC Laser** torna-se primordial, pois nela consegue-se precisão e cortes em pequena escala. A partir desta tecnologia, pequenos retalhos e sobras podem ser transformados em jogos como **xadrez**, dominó e brinquedos infantis.



Projeto 3d jogo **Xadrez** em MDF 6mm

Laser para pequena escala

Dispor de uma CNC a laser torna-se essencial para essa estratégia, sobretudo na produção de peças pequenas. Com ela, é possível, é possível aproveitar retalhos para criar itens delicados e gravar textos ou detalhes diretamente nas peças.



Cortes a laser em MDF 6mm podem gerar resíduos que exigem limpeza delicada.

Pensar nos suportes e caixas é essenciais durante o desenvolvimento do produto, facilitando a experiência dos usuários e comercialização.

Caixas e Suportes

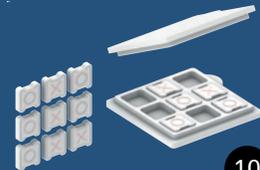
Molda-madeira



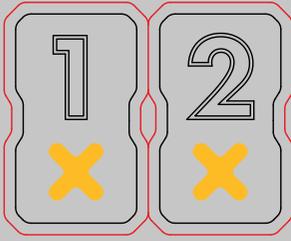
Robokub



Jogo da velha

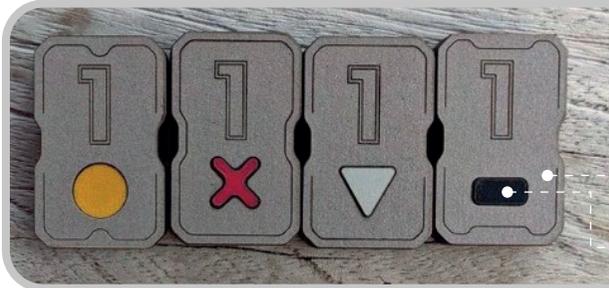


Vetores de Gravação e Corte



Ao lado é apresentado os vetores utilizados para os percursos de gravação e corte em uma máquina CNC a laser.

- Potência máxima para corte da peça
- Potência 15 a 25% gravação vetor
- Gravação para encaixe



Resultado após limpeza e aplicação dos detalhes na peça.

MDF 6mm

Criação de elementos uso de Pet/Formica.

Em jogos, o uso de cores e detalhes são importantes, para isso retalhos de Fórmica e laminado PET foram usados para criar os elementos das peças.

Por ocuparem pouco espaço, facilitam o transporte, a organização e a exposição. Essa praticidade favorece a circulação das peças e fortalece a economia regional com produtos criativos, acessíveis e fabricados localmente.

Jogos e brinquedos infantis são ótimos para comercialização em **feiras** e lojas locais.

Produção de peças a partir dos retalhos menores e mais improváveis. **Jogo Dominó**



4

Desing para Previsibilidade

Segundo Silva (2021), promover uma **conexão duradoura** entre o usuário e o produto contribui para reduzir a substituição precoce, incentivando um uso mais consciente e prolongado. Essa conexão pode ser desenvolvida por meio de um design que estimule o vínculo afetivo com o objeto, aliando a possibilidade de **personalização** e instruções claras de uso.



Sapateira



A sapateira além de possuir o *design flatpack*, o usuário pode adquirir caixas adicionais que se integram a peça, oferecendo novas opções de uso e ampliando a funcionalidade do móvel a novas necessidades.

Prateleira

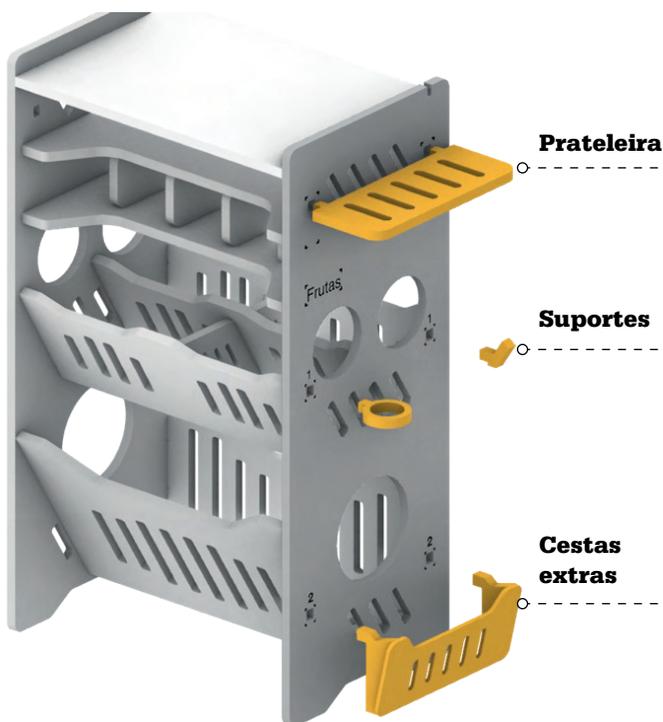
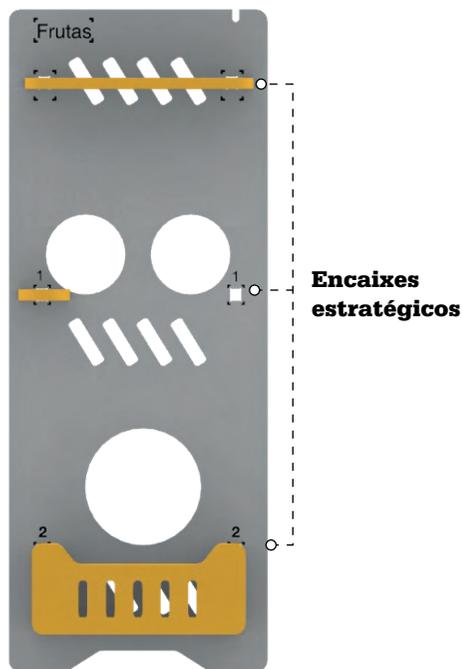


São desenvolvidos elementos personalizados como divisórias para livros, gavetas adicionais, suportes para fones de ouvido ou outros acessórios, que por encaixes complementem e ampliam as funções da peça principal, além de permitirem reaproveitar sobras.

Fruteira

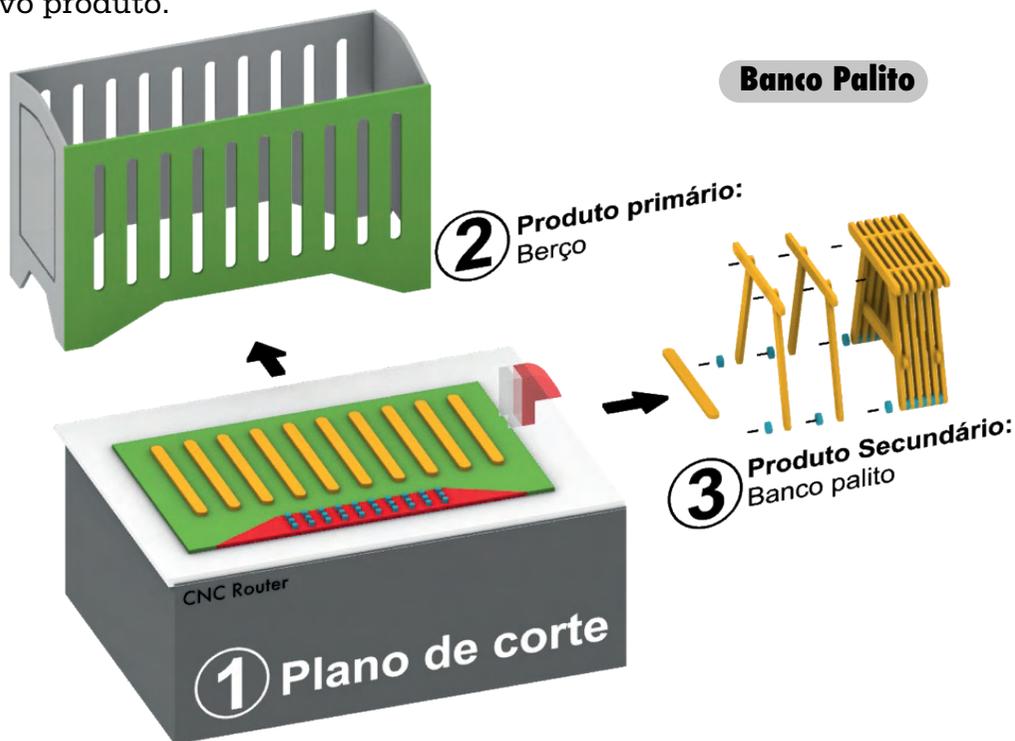
Outro exemplo de projetar para a previsibilidade está em estabelecer **encaixes** em pontos **estratégico** das peças a serem produzidas.

Uma fruteira pode precisar usualmente ou não de espaços extras, acessórios como ganchos, porta trecos, cestinhos podem ser uteis e versáteis no dia-dia-dia. Essa lógica pode ser aplicada em outros móveis para escritório e oficinas.



5 Visualizar função para os retalhos padronizados

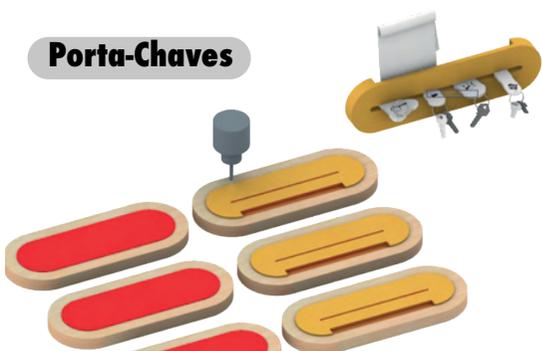
O aproveitamento dos retalhos padronizados é um aliado na otimização de recursos, e isso se deve porque nessa estratégia conseguimos um alto aproveitamento da matéria prima, que pode já ter o formato ideal para se criar um produto secundário, ou que precise de alguma alteração de usinagem para se transformar em um novo produto.



O Banco Palito é um exemplo de móvel que surge do aproveitamento direto de resíduos padronizados gerados no corte de outro produto. A lateral de um berço gera sobras que, ao serem organizadas e montadas, resultam em um novo objeto funcional, sem necessidade de alterar o plano de corte original.



Porta-Chaves



O porta-chaves utiliza retalhos gerados pelas peças modulares da **Diretriz 01**. Para torná-lo funcional, é necessário adicionar um novo plano de corte, incluindo encaixes específicos para as chaves.

6 O conceito de boneca russa e o nesting

A lógica da boneca russa pode inspirar o design de peças modulares em CNC, onde cada parte se encaixa dentro da outra. Essa estratégia otimiza o plano de corte, reduz desperdícios e permite criar objetos decorativos ou funcionais com bom aproveitamento de material.



Essa técnica pode ser usada em planos de cortes diversos, principalmente ao empregar a **Estratégia 01** onde devemos tentar ocupar o máximo de plano de corte com peças.

Tampa em mdf
6mm



7 Use conforme seu entorno

Este método propõe o uso de materiais além das chapas cortadas, como tijolos, sobras de madeira ou peças metálicas. No exemplo, um hack é criado com Compensado, tijolos e aberturas no sistema trilhos em mdf da **Diretriz 2**. A montagem exige pouca fixação, permitindo desmontagem e reaproveitamento das peças.

Hack



8 Adeque-se ao seu retalho

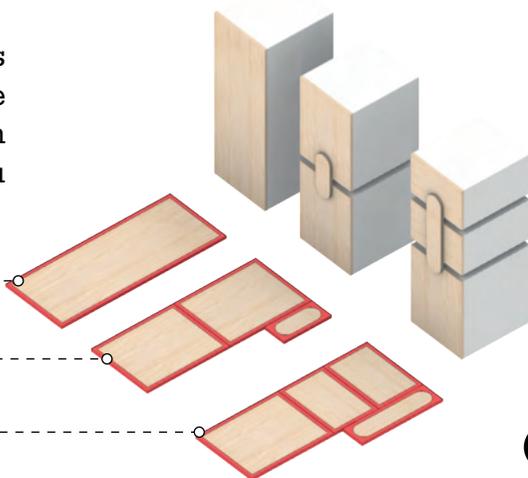
Na marcenaria, o acúmulo de retalhos pequenos costuma dificultar seu aproveitamento. Uma alternativa é adaptar o design para incorporar sobras, criando variações de um mesmo objeto com retalhos de tamanhos diversos.

Dividir móveis em seções menores permite o uso de retalhos variados sem comprometer a estabilidade ou estética.

Lateral inteira

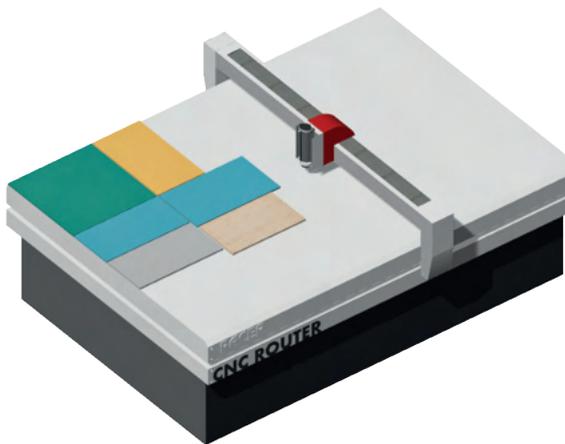
Lateral dividida em 2

Lateral dividida em 3



Na produção com retalhos, diferentes sobras são organizadas no mesmo plano de corte da CNC.

É preciso medir e posicionar cada peça conforme o arquivo digital, adaptando o design ao tamanho real dos retalhos. Isso garante precisão, reduz desperdício e torna o processo mais sustentável, apesar de exigir mais planejamento.



10 Em último caso: mosaicos

A técnica de usar mosaicos visa otimizar o uso do menores retalhos dos planos de corte, especialmente quando as sobras têm tamanhos e formas variados e não tem muito tempo para implementar um design mais complexo. O fator de poder reunir pequenas peças de diversas cores para formar uma grande figura, torna essa técnica a mais rápida e versátil a se usar no dia a dia.



Peças de decoração



Chaveiros e brindes

Considerações finais

Este guia apresentou estratégias de design voltadas à redução de resíduos e ao melhor aproveitamento de materiais em cortes CNC. A partir da prática com retalhos, foram exploradas soluções como peças modulares, sistemas de encaixe e abordagens projetuais adaptáveis, alinhadas aos princípios do ecodesign.

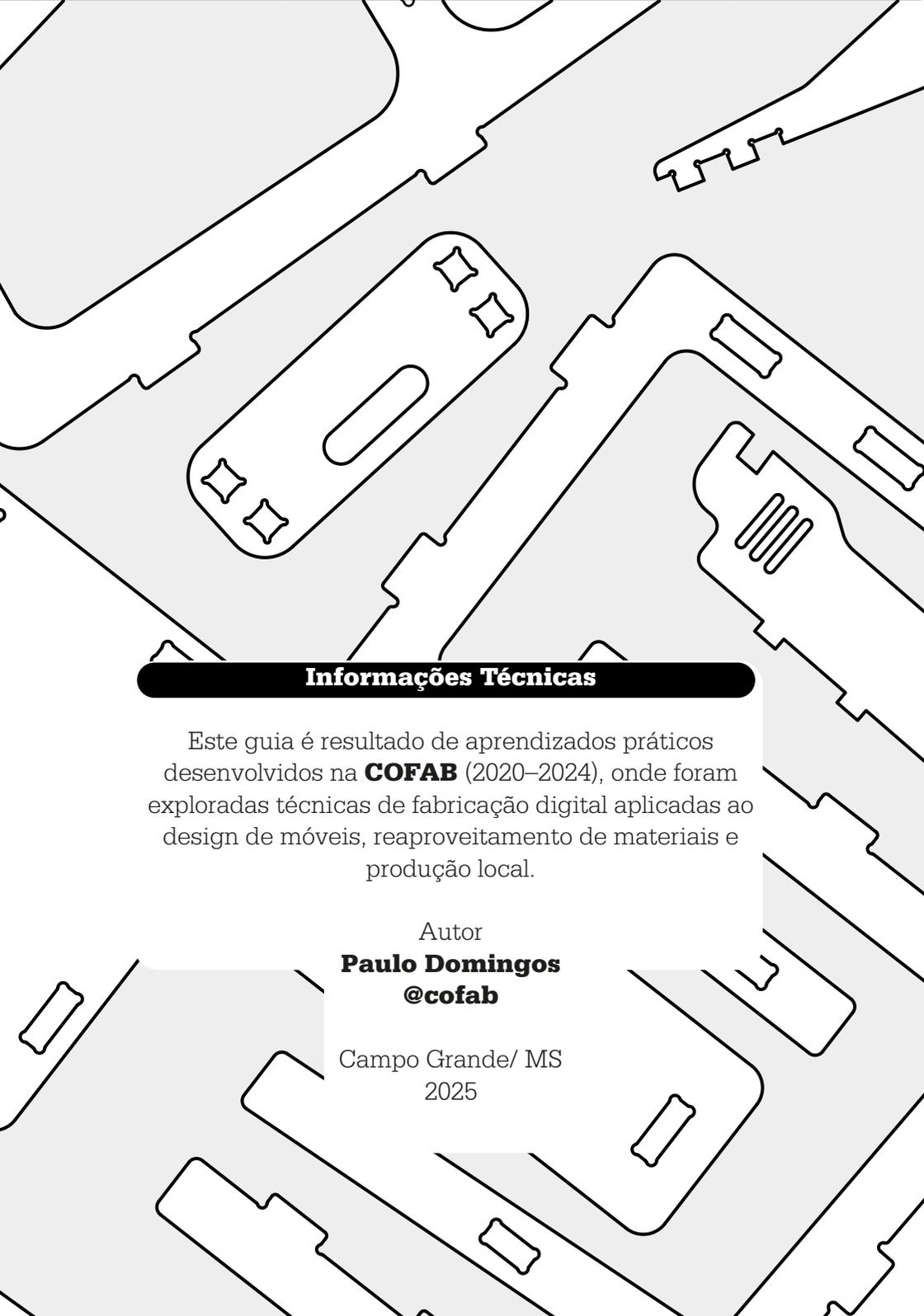
Mais do que reduzir desperdícios, essas técnicas mostram como a fabricação digital pode impulsionar práticas mais sustentáveis, criativas e eficientes. Como desdobramento, abrem-se caminhos para **automatizar** esses processos com algoritmos de otimização e **inteligência artificial**, ampliando o impacto das diretrizes propostas.

Ao incentivar o uso consciente de recursos, o design comprometido com a sustentabilidade também favorece transição para uma cadeia produtiva mais circular e sustentável



Obrigado pela leitura!

Espero que este guia inspire novas ideias, aproveitamentos criativos e produções mais sustentáveis. Que cada peça criada leve adiante esse compromisso com o design consciente.



Informações Técnicas

Este guia é resultado de aprendizados práticos desenvolvidos na **COFAB** (2020–2024), onde foram exploradas técnicas de fabricação digital aplicadas ao design de móveis, reaproveitamento de materiais e produção local.

Autor

Paulo Domingos
@cofab

Campo Grande/ MS
2025