

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA/UFU  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO E DESIGN/FAUED  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO/PPGAU

**JÚLIA SOUZA ABRÃO**

**Fabricação Digital e o Projetar Sustentável: o uso de softwares de modelagem como estratégia para antever e minimizar os impactos ambientais da produção subtrativa.**

UBERLÂNDIA  
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA/UFU  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO E DESIGN/FAUED  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO/PPGAU

**JÚLIA SOUZA ABRÃO**

**Fabricação Digital e o Projetar Sustentável: o uso de softwares de modelagem como estratégia para antever e minimizar os impactos ambientais da produção subtrativa.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, (PPGAU) da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

**Linha de Pesquisa:** Linha de pesquisa 2 intitulada: Produção do espaço: processos urbanos projeto e tecnologia.

**Matricula:** 11822ARQ017

**Orientadora:** Profa. Dra. Viviane G. A. Nunes

UBERLÂNDIA-MG

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 11, Sala 234 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4433 - www.ppgau.faued.ufu.br - coord.ppgau@faued.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Arquitetura e Urbanismo				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico PPGAU				
Data:	dezoito de novembro de 2020	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:10h
Matrícula do Discente:	11822ARQ017				
Nome do Discente:	Júlia Souza Abrão				
Título do Trabalho:	<b>Fabricação Digital e o Projetar Sustentável: o uso de softwares de modelagem como estratégia para antever e minimizar os impactos ambientais da produção subtrativa.</b>				
Área de concentração:	Projeto, Espaço e Cultura				
Linha de pesquisa:	Produção do espaço: processos urbanos, projeto e tecnologia.				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Design Sustentável e Fabricação Digital: alternativas estratégicas para o reaproveitamento de resíduos moveleiros em contextos de produção distribuída.				

Reuniu-se em web conferência pela plataforma Mconf-RNP, em conformidade com a PORTARIA nº 36, de 19 de março de 2020 da COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR - CAPES, pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, assim composta: Professores Doutores: Cláudio Pereira de Sampaio - UEL; André Luis de Araujo - PPGAU/UFU e Viviane dos Guimarães Alvim Nunes - PPGAU/UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Viviane dos Guimarães Alvim Nunes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Processo: 23117.066418/2020-20 Documento: 2369126

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Viviane dos Guimarães Alvim Nunes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/11/2020, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis de Araujo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/11/2020, às 16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Pereira de Sampaio, Usuário Externo**, em 18/11/2020, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Souza Abrão, Usuário Externo**, em 18/11/2020, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2369126** e o código CRC **0B93D0DE**.

15/01/2021

SEI - Documento para Assinatura

Processo:

23117.066418/2020-20

Documento:

2369126

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A161  
2020

Abrão, Júlia Souza, 1996-  
Fabricação Digital e o Projetar Sustentável: o uso de softwares de modelagem como estratégia para antever e minimizar os impactos ambientais da produção subtrativa. [recurso eletrônico] / Júlia Souza Abrão. - 2020.

Orientadora: Viviane dos Guimarães Alvim Nunes.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.818>  
Inclui bibliografia.

1. Arquitetura. I. Nunes, Viviane dos Guimarães Alvim, 1971-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU: 72

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais José Antônio e Valéria, e a meus irmãos Amanda e Bruno.

E a todos que enfrentaram transtorno de ansiedade durante uma pós graduação.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ter abençoado meus passos, sempre me dando força, saúde e motivação para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e à Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design pela oportunidade de desenvolvimento deste projeto.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro na realização desta pesquisa.

À minha orientadora Profa. Dra. Viviane G. A. Nunes por todo apoio, dedicação, paciência, conhecimento e incentivo, essenciais para a realização deste trabalho, e por acreditar e apostar em todos os meus sonhos.

A todos meus amigos e professores que me auxiliaram em toda essa caminhada, em especial ao aluno de graduação João Pedro Caixeta e a secretária do PPGAU Poliana Franco que sempre estiveram dispostos a me ajudar em tudo que foi preciso.

Aos meus pais José Antônio Abrão e Valéria Piva de Souza Abrão, e aos meus irmãos Bruno Souza Abrão e Amanda Souza Abrão, por sempre me incentivarem com muito amor, carinho e dedicação, e sempre estarem presentes me apoiando tanto nos momentos de alegria quanto nos de dificuldade.

## Resumo

A revolução nos processos de fabricação que se tornaram digitais, com máquinas controladas por parâmetros computacionais, contribuiu para o surgimento dos softwares de modelagem, em que a criação se tornou muito mais complexa. Com isso, a relação entre projeto e produção, onde o designer controla todo o processo, desde a criação até a fabricação, é reconfigurada. Entretanto, a Fabricação Digital (FD) também apresenta muitos desafios a serem superados, principalmente aqueles relacionados ao meio ambiente. No caso da produção da CNC Fresadora, preocupa o alto volume de resíduos resultantes de projetos com alta complexidade formal, sem a possibilidade de reutilização. Esta pesquisa de mestrado, de base teórica exploratória e caráter qualitativo, combina etapas teóricas com práticas. Visa investigar as relações entre projeto e produção, especificamente aquelas relacionadas aos processos da CNC fresadora, e a interatividade com os novos softwares de modelagem digital, buscando detectar como os softwares digitais podem auxiliar o processo de projeto em busca da sustentabilidade. O objetivo principal é estudar o processo de projeto de produto já consolidado (MANZINI; VEZZOLI, 2008) sob a perspectiva da fabricação digital orientada a projetos complexos de pequena escala, a fim de subsidiar o desenvolvimento de projetos sustentáveis visando à fabricação subtrativa. Além disso, permitirá vislumbrar novos métodos de projeto sustentáveis aliados às tecnologias digitais, orientando jovens designers e estudantes nos processos de design, e permitindo se atingir soluções mais integradas, sistêmicas e ecoeficientes. A base teórica parte dos principais temas: Fabricação digital (KOLAREVIC, 2005; GERSHENFELD, 2012); Processo de projeto e fabricação (SHINGO, 1996; LJUNGBERG, 2005); Softwares de modelagem (OOSTERHUIS, 2005; BLIKSTEIN, 2013) e Sustentabilidade (WALKER, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008). Considerando que no Brasil as metodologias voltadas para a fabricação digital ainda são incipientes, a pesquisa buscou investigar a atuação dos softwares digitais durante o processo de projeto, apresentando estratégias dessa aproximação no âmbito sustentável e também contribuindo com um código programável para trabalhar no *plug-in* paramétrico Grasshopper contribuindo e facilitando o processo de produto otimizado.

**Palavras Chave:** Fabricação Digital Subtrativa; Softwares de Modelagem; Processo de projeto sustentável; Sustentabilidade; CNC Fresadora; Diretrizes Projetuais.

## Abstract

The revolution in manufacturing processes that have become digital, with machines controlled by computational parameters, contributed to the emergence of modeling software, in which creation has become much more complex. Thus, the relationship between design and production, where the designer controls the entire process, from creation to manufacture, is reconfigured. However, Digital Fabrication (FD) also presents many challenges to be overcome, especially those related to the environment. In the case of CNC milling machine production, it concerns the high volume of waste resulting from projects with high formal complexity, without the possibility of reuse. This master's research, with an exploratory theoretical basis and qualitative character, combines theoretical steps with practices. It aims to investigate the relationships between design and production, specifically those related to CNC milling processes, and interactivity with new digital modeling software, seeking to detect how digital applications can assist the design process in search of sustainability. The main objective is to study the already consolidated product design process (MANZINI; VEZZOLI, 2008) from the perspective of digital manufacturing oriented to complex small-scale projects, in order to subsidize the development of sustainable projects aiming at subtractive manufacturing. In addition, it will make it possible to envision new sustainable design methods combined with digital technologies, guiding young designers and students in the design processes, and allowing them to achieve more integrated, systemic and eco-efficient solutions. The theoretical basis is based on the main themes: Digital manufacturing (KOLAREVIC, 2005; GERSHENFELD, 2012); Design and manufacturing process (SHINGO, 1996; LJUNGBERG, 2005); Modeling software (OOSTERHUIS, 2005; BLIKSTEIN, 2013) and Sustainability (WALKER, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008). Considering that in Brazil the methodologies for digital manufacturing are still incipient, the research sought to investigate the performance of digital applications during the design process, presenting strategies of this approach in the sustainable scope and also contributing with a programmable code to work on the Grasshopper parametric *plug-in* contributing and facilitating the optimized product process.

**Keywords:** Digital Subtractive Manufacturing; Modeling software; Sustainable Design Process; Sustainability; CNC Milling Machine; Design Guidelines

## Sumário

Capítulo 1 .....	16
1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Problema da Pesquisa e Justificativa.....	18
1.2. Objetivos .....	20
1.3. Estrutura da Dissertação.....	21
1.4. Procedimentos metodológicos.....	22
Capítulo 2 .....	25
2 DESIGN, FABRICAÇÃO DIGITAL E SUSTENTABILIDADE.....	26
2.1. Fabricação Digital: origens e evolução .....	26
2.2. Sustentabilidade em produtos e ética projetual .....	51
Capítulo 3 .....	72
3 EXPERIMENTO.....	73
Capítulo 4 .....	105
4 O PROJETAR SUSTENTÁVEL PARA A FABRICAÇÃO DIGITAL.....	106
Capítulo 5 .....	112
5 CONCLUSÃO .....	113
REFERÊNCIAS.....	116
Apêndice 01.....	123
Apêndice 02.....	124
Apêndice 03.....	126

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Visão sistêmica do problema.....	19
<b>Figura 2:</b> Separação do trabalhador e máquina .....	27
<b>Figura 3:</b> Modelos de Fabricação.....	28
<b>Figura 4:</b> Práticas de design aberto e processo de design .....	31
<b>Figura 5:</b> CNC até 3 eixos (esq.) e CNC com mais de três eixos(dir.) .....	34
<b>Figura 6:</b> Principais operações executadas na fresadora .....	35
<b>Figura 7:</b> CNC Laser (esq.) e Impressora 3D (dir.) .....	37
<b>Figura 8:</b> Projeto de jóias paramétricas e sistema de fabricação.....	40
<b>Figura 9:</b> A sequência lógica do processo de modelagem .....	41
<b>Figura 10:</b> Planejamento de corte Arauco.....	43
<b>Figura 11:</b> Plano de corte Max Cut .....	43
<b>Figura 12:</b> Interface digital Max Cut .....	43
<b>Figura 13:</b> Produtos complexos Rhino.....	44
<b>Figura 14:</b> Planejamento de corte RhinoNest .....	44
<b>Figura 15:</b> Planejamento de corte OpenNest.....	45
<b>Figura 16:</b> Projetos com geometrias complexas .....	46
<b>Figura 17:</b> Planejamento de corte do RinoNest .....	47
<b>Figura 18:</b> Planejamento de corte adequado .....	47
<b>Figura 19:</b> Produto e planejamento de corte – Pixel Show 2018 .....	48
<b>Figura 20:</b> Ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos .....	49
<b>Figura 21:</b> Resíduos descartados anualmente pelo setor moveleiro.....	50
<b>Figura 22:</b> El Diseño específico .....	52
<b>Figura 23:</b> Roda de Ecoconcepção.....	54
<b>Figura 24:</b> O Ciclo de Vida do sistema-produto .....	55
<b>Figura 25:</b> Estratégias de Life Cycle Design e fases do ciclo de vida .....	56
<b>Figura 26:</b> A pirâmide de produtos e serviços sustentáveis .....	59
<b>Figura 27:</b> Etapas do ciclo de vida dos produtos .....	60
<b>Figura 28:</b> Critérios para otimizar a sustentabilidade nos produtos e serviços .....	61
<b>Figura 29:</b> Cadeia de produção sustentável.....	63
<b>Figura 30:</b> Visão geral do modelo de referência.....	64
<b>Figura 31:</b> Principais resultados das fases .....	66
<b>Figura 32:</b> Mapa sistêmico com foco no processo produtivo do Designer .....	75
<b>Figura 33:</b> Etapas projetuais.....	77
<b>Figura 34:</b> Etapas de processo do controle.....	77
<b>Figura 35:</b> ciclo de projeto iterativo .....	78
<b>Figura 36:</b> Painel Semântico 1 .....	80
<b>Figura 37:</b> Painel Semântico 2 .....	81
<b>Figura 38:</b> Painel semântico 3.....	81
<b>Figura 39:</b> Estudo do fluxo .....	82
<b>Figura 40:</b> Croquis do projeto.....	82
<b>Figura 41:</b> Estudo/modelagem de massa tridimensional.....	83
<b>Figura 42:</b> Vista Posterior .....	84
<b>Figura 43:</b> Vista Superior.....	84

<b>Figura 44:</b> Vista Frontal .....	84
<b>Figura 45:</b> Vistas Lateral Esquerda e Direita .....	84
<b>Figura 46:</b> Processo Slicing .....	85
<b>Figura 47:</b> Peças do modelo de massa organizadas na superfície .....	85
<b>Figura 48:</b> Peças escaneadas .....	85
<b>Figura 49:</b> Curva Bezier .....	86
<b>Figura 50:</b> Uso do plano XY e alimentação do comando Orient .....	88
<b>Figura 51:</b> Associação das sliders com os planos posicionados na reta .....	88
<b>Figura 52:</b> Curvas rebatidas nos planos .....	89
<b>Figura 53:</b> Formação do sólido .....	89
<b>Figura 54:</b> Processo Slicing .....	90
<b>Figura 55:</b> Espessura a partir do centro da forma .....	91
<b>Figura 56:</b> Processo de extrusão .....	92
<b>Figura 57:</b> Código da programação no Grasshopper .....	93
<b>Figura 58:</b> Resultado do controle .....	94
<b>Figura 59:</b> Vistas técnicas do controle .....	94
<b>Figura 60:</b> Planejamento de corte do controle 1 .....	95
<b>Figura 61:</b> Planejamento de corte do controle 2 .....	95
<b>Figura 62:</b> Estudos do planejamento de corte do controle .....	97
<b>Figura 63:</b> Estimativa do descarte dos resíduos provenientes do planejamento de corte .....	97
<b>Figura 64:</b> Alteração na malha de pontos das formas projetuais .....	99
<b>Figura 65:</b> Versões do projeto .....	99
<b>Figura 66:</b> Alterações na programação do Grasshopper .....	100
<b>Figura 67:</b> Solução Projetual final .....	100
<b>Figura 68:</b> Vistas técnicas da Solução Projetual final .....	101
<b>Figura 69:</b> Representação do projeto final após o processo de Slicing .....	101
<b>Figura 70:</b> Versões do planejamento de corte da proposta final .....	102
<b>Figura 71:</b> Estudo dos resíduos do planejamento de corte .....	103
<b>Figura 72:</b> Estimativa do descarte dos resíduos provenientes do planejamento de corte da proposta final .....	103
<b>Figura 73:</b> Ciclo iterativo projetual com apresentação de novas estratégias projetuais .....	110

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Comparação entre metodologias/métodos .....	68
--------------------------------------------------------------	----

## Lista de Símbolos

2D - Bidimensional  
3D - Tridimensional  
ABS - (Acrilonitrilabutadieno estireno)  
ACV - Avaliação do Ciclo de Vida  
AM - Additive Manufacturing (manufatura aditiva)  
CAD - Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador)  
CAE – Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador)  
CAM - Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador)  
CAPP – Computer Aided Process Planning (Planejamento do Processo Assistido por Computador)  
CBS – Computer Business Systems (Sistemas de Negócios Computadorizados)  
CIM – Computer Integrated Manufacturing (Fabricação Integrada por Computador)  
CNC - Controle Numérico Computadorizado  
CVP – Ciclo de Vida do Produto  
CT - Tecnologia limpa  
DCN - Direct Numerical Control  
DDM - Direct Digital Manufacturing (Fabricação Digital Direta)  
DfDA - Design for disassembly  
DfE - Design for the Environment  
DfMA - Design for Manufacture and Assembly (Design para Fabricação e Montagem)  
DfR - Design for recycling  
DP – Design Participativo  
FD - Fabricação Digital  
FMS - Flexible Manufacturing System (Sistemas Flexíveis de Manufatura)  
LCA - Life Cycle Assessment  
LCD - Life Cycle Design  
MDF - (Medium Density Fiberboard)  
MPEs – Micro e Pequenas Empresas  
NC - Numeric Control (Controle Numérico)  
NURBS - Non-Uniform Rational B-splines  
P & D - Pesquisa e Desenvolvimento  
PDP - Processo de Desenvolvimento de Produto  
PNRS - Política Nacional Dos Resíduos Sólidos  
PLA – (Ácido polilático)  
RP - Rapid prototyping ou Prototipagem rápida  
RT - Rapid Tooling ou Ferramental Rápido  
S1- Simulação 1  
S2 – Simulação 2  
SPSD - Desenvolvimento Sustentável de Produtos e Serviços  
STL - (Standard Triangulation Language)  
V2 – Versão 2  
TBL - Triple Bottom Line

***“O produto de hoje é o resíduo de amanhã”***

**(autor desconhecido)**



# Capítulo 1



# 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias têm progredido cada vez mais e mais rápido, difundindo-se em diversas áreas, possibilitando o surgimento de novas disciplinas e segmentos de mercado e reconfigurando a relação entre criação de projeto e produção (PUPO, 2009; MENICHINELLI, 2017). Induzem, assim, a um novo modo de projetar, principalmente no campo do design. Nesse cenário, um processo inovador de criação se constituiu pela união de tecnologias aliadas aos novos campos computacionais, os chamados softwares de modelagem, trazendo a possibilidade de criação e produção de projetos altamente complexos. A fabricação, agora, conhecida como Fabricação Digital, ocorre digitalmente, controlada por parâmetros computacionais, ampliando as possibilidades de fabricação de peças bi e tridimensionais.

Esse método de fabricação, denominado *file-to-factory* (do arquivo para a fábrica), subtrai etapas de representações entre o projetista e o produto final (KOLAREVIC, 2009; BARBOSA NETO et al., 2014). Neste processo, não apenas o projeto é desenvolvido digitalmente (softwares de modelagem), mas também a sua produção ocorre pelo processo de fabricação digital, possibilitando ao designer controlar todo o processo, desde a criação até a produção.

Essa tipologia de manufatura e os softwares de modelagem apresentam grandes vantagens em sua utilização, trazendo benefícios em várias áreas, tais como: saúde, economia, educação, construção, dentre outros. Contudo, a fabricação digital e os softwares de modelagem complexa apresentam também muitos desafios a serem superados tendo em vista, principalmente, as questões relacionadas ao meio ambiente. No recorte específico desta pesquisa, a grande preocupação está relacionada ao alto volume de resíduos gerados pela fabricação subtrativa. Em virtude da alta complexidade das formas, mesmo havendo planejamento dos cortes das peças, há também a geração de peças pequenas (resíduos do processo produtivo), com pouca possibilidade de reaproveitamento e que resultam em sérios impactos ambientais.

O referencial teórico desta pesquisa baseia-se nos conceitos de Fabricação Digital (de forma ampliada), de Processos de Projeto em Design (metodologias e métodos), Softwares de Modelagem e Sustentabilidade, tendo como aspectos específicos a Manufatura Subtrativa e de estratégias de processo de projeto com auxílio computacional.

A partir deste panorama, a pesquisa tem como principal objetivo estudar o processo de projeto de produto já consolidado (MANZINI; VEZZOLI, 2008) e outros pesquisadores da área (MAXWELL; VORST, 2003; ROZENFELD et al., 2006 e LJUNGBERG, 2005), e os softwares de modelagem digital. Contempla ainda sua adequação e a inclusão de novas etapas metodológicas vislumbrando a era da fabricação digital, a fim de orientar projetos complexos de pequena escala, em busca do desenvolvimento de projetos sustentáveis por meio da fabricação subtrativa.

## **1.1 Problema da Pesquisa e Justificativa**

A problemática da pesquisa está relacionada ao impacto ambiental ocasionado pelo grande volume de resíduos gerados nos processos produtivos, que já ocorrem nos processos convencionais de produção e que tende a se tornar maior na era da fabricação digital. Isso ocorre também pela falta de estratégias metodológicas que orientem designers ao desenvolvimento de projetos na era digital.

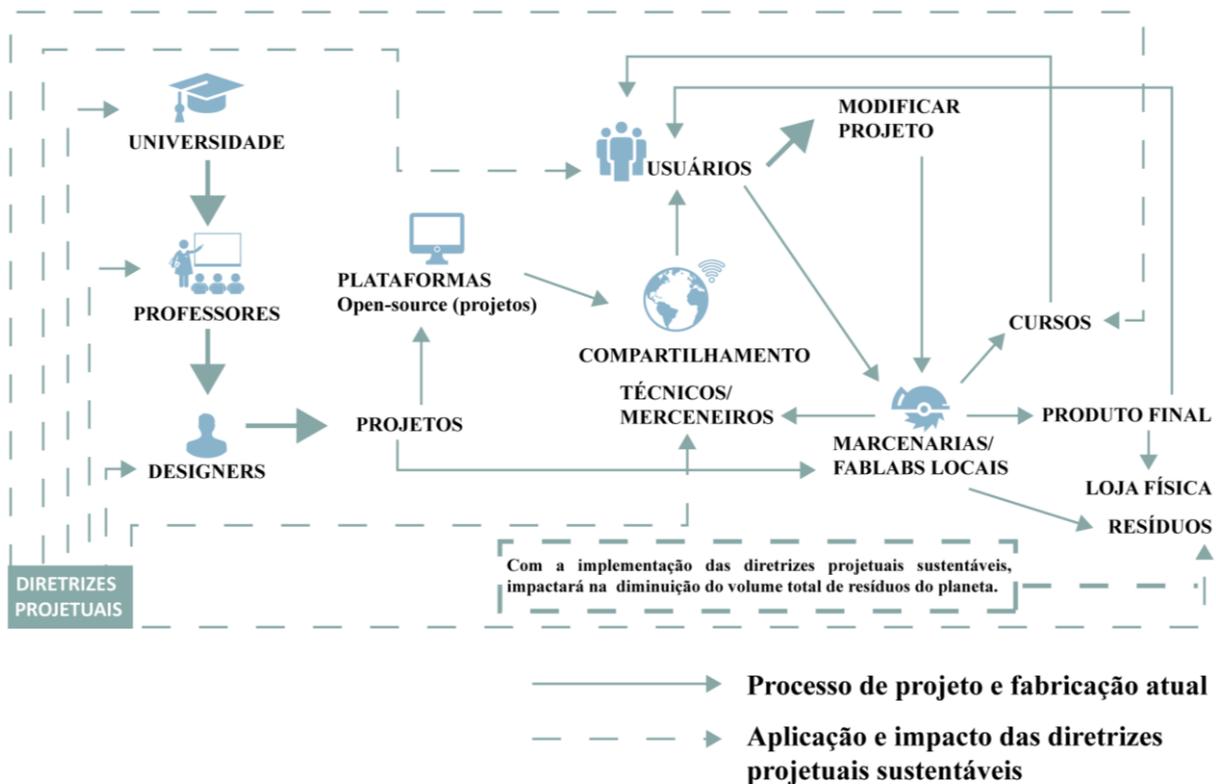
Desde a década de 90, as preocupações relativas aos resíduos sólidos gerados por empresas vêm sendo destacadas (CAVALCANTI, 1998) e, em paralelo, algumas soluções para a minimização e destinação desses materiais têm sido investigadas. No entanto, nem todas as empresas reconhecem o impacto ambiental causado pela geração de resíduos de suas operações.

A era da fabricação digital (fabricação mecânica com controle digital) e dos novos softwares de modelagem possibilitou a democratização do acesso aos projetos digitais abertos e facilitou a aproximação aos softwares de modelagem digital, especialmente com o surgimento dos FabLabs. De acordo com o autor Gershenfeld (2012), os projetos são desenvolvidos e compartilhados digitalmente, podendo ser produzidos em qualquer lugar do mundo. Por conseguinte, ocorre a descentralização dos meios de fabricação, tornando de livre acesso para todos os indivíduos, o que Bassi (2017) chama de design “generalizado”. Tal acesso, porém, 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.

Partindo da democratização dos projetos, das manufaturas digitais e do fácil acesso aos softwares digitais, é relevante analisar criticamente os projetos disponibilizados nas

plataformas digitais *open source* (Fig. 1). Dentre os aspectos importantes destacamos, por exemplo, se o projetista considera a sustentabilidade no processo de projeto dos produtos disponibilizados; se os profissionais têm buscado aperfeiçoamento técnico para projetar na era da tecnologia digital, entre outros, especialmente considerando que as metodologias para projetos sustentáveis já consolidadas são anteriores ao cenário digital atual.

**Figura 1:** Visão sistêmica do problema



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Vale ressaltar que os softwares de modelagem e novas máquinas digitais possibilitam a criação e fabricação de diversas formas altamente complexas, contribuindo ainda mais com a geração de resíduos pequenos impossibilitados de serem reaproveitados.

A partir destas questões, a pesquisa visa estudar e compreender as metodologias/métodos e processos de projetos sustentáveis já consolidadas, e aproximá-las dos softwares e *plugins* de modelagem digitais disponíveis para os processos de fabricação digital. O intuito é de que a adequação dos métodos aos avanços tecnológicos seja futuramente adotada como material de ensino nos cursos de design, como também referencial para FabLabs e para profissionais independentes.

Acredita-se que a complementação de novas etapas projetuais (focadas no cenário da Fabricação Digital) dos métodos convencionais sejam de extrema importância para diminuir o impacto ambiental que os processos de fabricação em geral e os produtos finais vêm causando, em busca de soluções mais sustentáveis.

### ***1.1.1. Hipótese e Perguntas de Pesquisa***

- **Hipótese**

A interferência qualificada do designer durante o processo de modelagem de um objeto complexo pode minimizar a produção de resíduos do mesmo, sem comprometer a usabilidade do objeto, desde que os métodos utilizados antevejam a capacidade de minimização e/ou reutilização destes resíduos.

- **Perguntas**

Partindo do problema apresentado e da hipótese estabelecida, a principal questão de pesquisa busca compreender:

- Como integrar os softwares de modelagem nos processos para o desenvolvimento de projetos sustentáveis?

### ***1.1.2. Definição e delimitação do objeto de estudo***

A pesquisa abordará questões relacionadas aos processos de projeto sustentável, softwares de modelagem e fabricação digital, tendo seu recorte na manufatura subtrativa (CNC fresadora), em virtude do grande desperdício do material removido durante o processo de produção o que ocasiona sérias implicações ambientais.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral:***

Estudar o processo de projeto de produto sustentável já consolidado (MANZINI; VEZZOLI, 2008) sob a perspectiva da fabricação digital orientada a projetos complexos de pequena escala, a fim de subsidiar o desenvolvimento de projetos sustentáveis visando à fabricação subtrativa.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos:***

- *Estudar os softwares e outras ferramentas digitais utilizados para o desenvolvimento de projetos de pequena escala;*

- *Simular projetos complexos em pequena escala nas plataformas digitais para testar a variação de parâmetros, e comparar resultados;*
- *Analisar como a variação de parâmetros pode contribuir e/ou comprometer o desenvolvimento de produtos sustentáveis e sua fabricação digital.*

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, referências e apêndices. O capítulo um **Introdução** apresenta o tema escolhido, abordando o problema principal da pesquisa e seus “subproblemas”, incluindo justificativa, definição e delimitação do objeto de estudo, objetivos e, por último, aborda a metodologia adotada na pesquisa e os procedimentos.

O capítulo dois: **Design, Fabricação Digital e Sustentabilidade** está relacionado à fundamentação teórica essencial para o desenvolvimento da pesquisa, abordando questões relativas à história e significado de fabricação digital, discorrendo sobre os equipamentos e os processos produtivos da FD (Fabricação Digital) com ênfase a CNC Fresadora (manufatura subtrativa), demonstrando vantagens e problemáticas da evolução tecnológica, e trazendo a questão da sustentabilidade com enfoque ao processo ético projetual. Ademais, o capítulo traz alguns métodos de ensino de projeto em design, e possibilidades de novos softwares digitais trabalhados junto às etapas de criação. São discutidos aspectos da dimensão ambiental, sua relação com o cenário produtivo industrial e impacto ambiental. Discorre ainda sobre métodos e metodologias já consolidados pelos autores **Maxwell, Vorst, 2003; Rozenfeld et al., 2006; Ljungberg, 2005; Manzini e Vezzoli, 2008**. Por fim, buscar analisar, de forma comparativa, estratégias de projeto sustentáveis não consideradas no passado e que necessitam, portanto, serem incluídas nos processos de projeto orientado a um futuro projetual ético-sustentável.

O capítulo três **Experimento Projetual** descreve um experimento digital de associação das diretrizes sustentáveis de projeto e as novas possibilidades de otimização promovidas pelos novos e diversos softwares de modelagem digital, seus *plug-ins* e ferramentas avançadas, recorte no software RhinoCeros e *plug-in* Grasshopper. Este estudo ocorreu por meio de simulações digitais de um projeto elaborado pelo autor (com definições de parâmetros fixos e variáveis), buscando estudar e estruturar novas fases metodológicas sustentáveis para o cenário tecnológico da FD. Ademais, apresenta a comparação e

resultados dos experimentos, demonstrando o impacto da contribuição das diretrizes projetuais junto à contribuição dos softwares digitais durante o processo de projeto.

O capítulo quatro **Processo de Projeto Sustentável para a Fabricação Digital** apresenta a discussão dos autores estudados junto aos resultados da experiência. Novamente propõe o ciclo de processo de projeto iterativo com novas propostas de estratégias sustentáveis estruturadas através do experimento, as quais podem ser integradas para a evolução dessas diretrizes projetuais sustentáveis que vêm sendo aperfeiçoadas há tantos anos, e que necessitam continuar evoluindo junto aos novos avanços tecnológicos projetuais e de fabricação. Ademais, a proposta do ciclo iterativo traz consigo o passo-a-passo da programação diagramática com parâmetro variável no *plug-in* Grasshopper para auxiliar e facilitar o uso dessa tecnologia aos projetistas que não possuem formação nestes softwares digitais.

O capítulo cinco: **Conclusões** aponta reflexões sobre o processo da pesquisa, discorrendo sobre as conclusões desta pesquisa de mestrado, considerando todos os percursos e resultados obtidos a partir dos estudos, apresentando novas propostas futuras, rumo à uma produção mais limpa por meio de processos projetuais mais controlados e gerenciados por informação, com vistas à redução do máximo de impactos ambientais e a busca pelo consumo consciente e verde.

## **1.4.Procedimentos metodológicos**

Essa sessão discorre sobre os procedimentos metodológicos adotados ao longo da pesquisa, e inclui sua caracterização, os métodos, bem como os autores utilizados para a construção do referencial teórico.

### ***1.4.1. Fases do Processo de Pesquisa***

A pesquisa é teórica exploratória, de caráter qualitativo, contemplando a revisão bibliográfica, estudos de casos e etapa prática de simulação virtual. O delineamento da pesquisa se deu por pesquisa bibliográfica e experimental, esta última relacionada à exploração dos novos softwares de modelagem e simulações visando estudar diretrizes projetuais sustentáveis com colaboração dessas novas ferramentas digitais. A investigação aqui apresentada também aborda a metodologia *Design Science Research*, considerando o desenvolvimento de um artefato e sua respectiva análise/avaliação.

A pesquisa qualitativa visa estudar/observar/compreender o entendimento de um grupo social (realidade humana na sociedade) para esclarecer o porquê dos acontecimentos, sem necessariamente utilizar métodos quantitativos, pois os elementos ponderados não-métricos determinam um resultado final imprevisível (YIN, 2001; MYNAIO, 2002; GERHARDT, 2009). “A abordagem qualitativa aprofunda-se no mundo dos significados das ações e relações humanas” (MYNAIO, 1994 p.22). É composta de análises textuais, necessitando de textos, esquemas, entre outros, que serão interpretados e relatados ao final (GIL, 2002).

As pesquisas exploratórias buscam detalhar o problema a ser estudado, tornando-o mais claro, ou direcionar para a construção de suposições, através de levantamento de informações (GERHARDT, 2009). Pesquisas relacionadas a essa categoria têm como objetivo a exploração de intuições ou o aperfeiçoamento de ideias (GIL, 2002).

Em relação ao método Design Science Research (DSR), este se classifica pela necessidade de ocorrer uma avaliação minuciosa sobre o artefato desenvolvido no processo de pesquisa, ocorrendo em casos como, por exemplo, a avaliação artificial por meio de: simulações computacionais, experimento de campo ou também experimentos em laboratório, sendo avaliações realizadas por etapas parciais, as quais demonstram que o pesquisador está no caminho certo conforme os objetivos da investigação (IIVARI e VENABLE, 2009; LACERDA et al., 2013).

Design Science seria responsável por conceber e validar sistemas que ainda não existem, seja criando, recombinação, alterando produtos / processos / softwares / métodos para melhorar as situações existentes (LACERDA et al., 2013 p.744).

O processo de pesquisa seguiu três etapas fundamentais: Revisão de literatura, estudos de casos e etapa exploratória.

a) A revisão de literatura foi orientada aos temas: fabricação digital (KOLAREVIC, 2005; OXMAN, 2006; GERSHENFELD, 2012), softwares de modelagem (OOSTERHUIS, 2005; BLIKSTEIN, 2013), sustentabilidade (WALKER, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008), metodologias/métodos e processo de projeto de produto (MAXWELL; VORST, 2003; ROZENFELD et al., 2006; LJUNGBERG, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008).

Os estudos sobre Fabricação Digital abordaram questões históricas, evolução da tecnologia digital, maquinários e seus processos de fabricação, além dos softwares digitais e suas possibilidades de projeto, e refletindo também sobre as oportunidades e

ameaças da era tecnológica. Os estudos sobre a Sustentabilidade (com enfoque na dimensão ambiental) buscaram compreender as implicações ambientais promovidas pelos projetos complexos possíveis a partir do uso da tecnologia digital, contemplando ainda tópicos como a ética ambiental, métodos de ensino e processo de projeto, *Life Cycle Design* e *Life Cycle Assessment*;

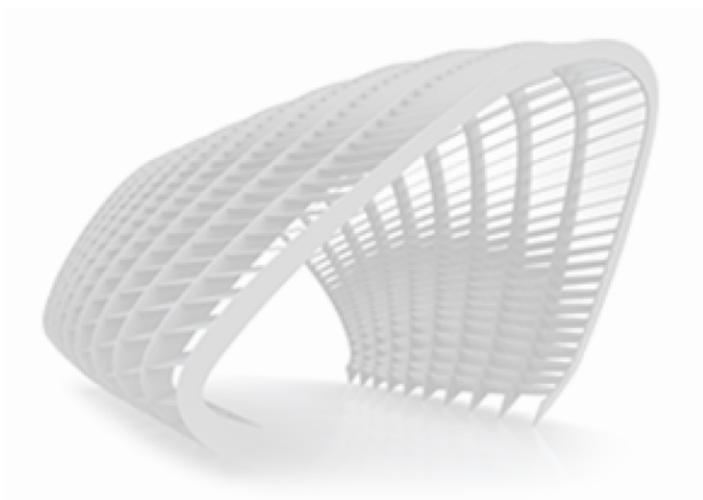
- b) Os estudos de casos foram selecionados a partir do tema fundamental da pesquisa abordando as estratégias projetuais sustentáveis dos autores **Maxwell e Vorst (2003)**, **Rozenfeld et al., (2006)**, **Ljungberg (2005)**, **Manzini e Vezzoli (2008)** para permitir um entendimento ampliado que auxiliou na etapa de desenvolvimento das diretrizes projetuais sustentáveis para o cenário de fabricação digital;
- c) O experimento digital ocorreu por meio de simulações de um projeto, com o uso de softwares de modelagem digital, buscando estudar e analisar estratégias sustentáveis promovidas pelo auxílio dessas ferramentas digitais.

Esse experimento contou com quatro etapas principais, conforme se segue:

- Definição do objeto de estudo e dos parâmetros fixos e variáveis;
- Planejamento para a simulação de prototipagem de um objeto complexo - análise do processo;
- Simulação de possibilidades alterando os parâmetros variáveis - análise do processo e análise comparativa;
- Análise final definindo novas etapas de diretrizes de projeto sustentáveis visando à fabricação e as ferramentas digitais.



# Capítulo 2



## 2 DESIGN, FABRICAÇÃO DIGITAL E SUSTENTABILIDADE

A fundamentação teórica essencial para o desenvolvimento da pesquisa parte dos temas abordados no trabalho e os autores de base, a saber: Fabricação digital (KOLAREVIC, 2005; GERSHENFELD, 2012); Processo de projeto e fabricação (SHINGO, 1996; LJUNGBERG, 2005); Softwares de modelagem (OOSTERHUIS, 2005; BLIKSTEIN, 2013) e Sustentabilidade (WALKER, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008).

O capítulo faz menção à evolução das tecnologias associadas ao processo de projeto e fabricação e enfatiza os métodos e metodologias sustentáveis já consolidados ao longo desses anos. Ademais, por meio de comparações metodológicas a pesquisa busca identificar estratégias projetuais que possam auxiliar os processos de projetos realizados na era da fabricação digital.

### 2.1. Fabricação Digital: origens e evolução

No decorrer dos anos, observou-se um processo de transição do trabalho manual realizado exclusivamente pela mão de obra humana, passando a produção a ser operada por maquinários específicos, de acordo com os setores produtivos. Segundo Shingo (1996), o processo de evolução das ferramentas industriais pode ser observado a partir de seis estágios de transição significativos no processo de manufatura (Fig. 2):

- Estágio 1 – *Trabalho Manual*. Neste estágio tudo é feito manualmente, sem o auxílio de máquinas e a supervisão da produção é feita também pelos trabalhadores.
- Estágio 2 – *Alimentação manual com usinagem automatizada*. A usinagem é realizada pela máquina, e a função dos trabalhadores é fixar e remover os produtos das máquinas, alimentar as ferramentas e supervisionar o processo de fabricação para detectar erros.
- Estágio 3 – *Alimentação e usinagem automáticos*. Praticamente igual ao anterior, diferindo da alimentação das ferramentas, que passa a ser realizada pela máquina.
- Estágio 4 – *Semiautomático*. Neste estágio os trabalhadores apenas monitoram o processo de fabricação em busca de falhas e as corrigem. Atividades como fixação e remoção de produtos, alimentação das ferramentas e usinagens são automáticas.

- Estágio 5 – *Pré-automação*. Neste estágio quase todos os processos são realizados pela máquina, os trabalhadores atuam somente na correção das falhas.
- Estágio 6 – *Automação*. Nesta etapa, todos os processos, incluindo a detecção e correção das falhas, são realizados automaticamente (SHINGO, 1996)<sup>1</sup>.

**Figura 2:** Separação do trabalhador e máquina

Estágio	Tipo	Operações manuais				Operações mentais			
		Operações principais				Folgas marginais			
		Operações essenciais		Operações auxiliares		(Método comum)		(Método Toyota)	
		Corte	Alimentação	Instalação/ Remoção	Operação de interruptor	Detectação de anomali- dades	Disposição de anormalidade	Detectção de anormalidade	Disposição de anormalidade
1	<b>Operação manual</b>	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador
2	<b>Alimentação manu- al, corte automático</b>	Máquina	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador
3	<b>Alimentação automática, corte automático</b>	Máquina		Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Trabalhador	Máquina que para automati- camente (trab. supervisiona mais de uma máquina)	Trabalhador
4	<b>Semiautomação</b>	Máquina		Máquina	Máquina	Máquina	Trabalhador	Máquina (trabalhador supervisiona mais de uma máquina)	Trabalhador
5	<b>Pré-automação (au- tomação com toque humano)</b>	Máquina		Máquina	Máquina	Máquina	Trabalhador	Máquina (au- tomação com toque humano)	Trabalhador
6	<b>Automação real</b>	Máquina		Máquina		Máquina	Máquina	Máquina	Máquina

**Fonte:** Adaptado de Shingo (1996)

A fragmentação entre o operário e a máquina promoveu o aumento da produtividade humana, e tal fato só se tornou possível a partir da inserção de inteligência humana nos maquinários de produção (SHINGO, 1996).

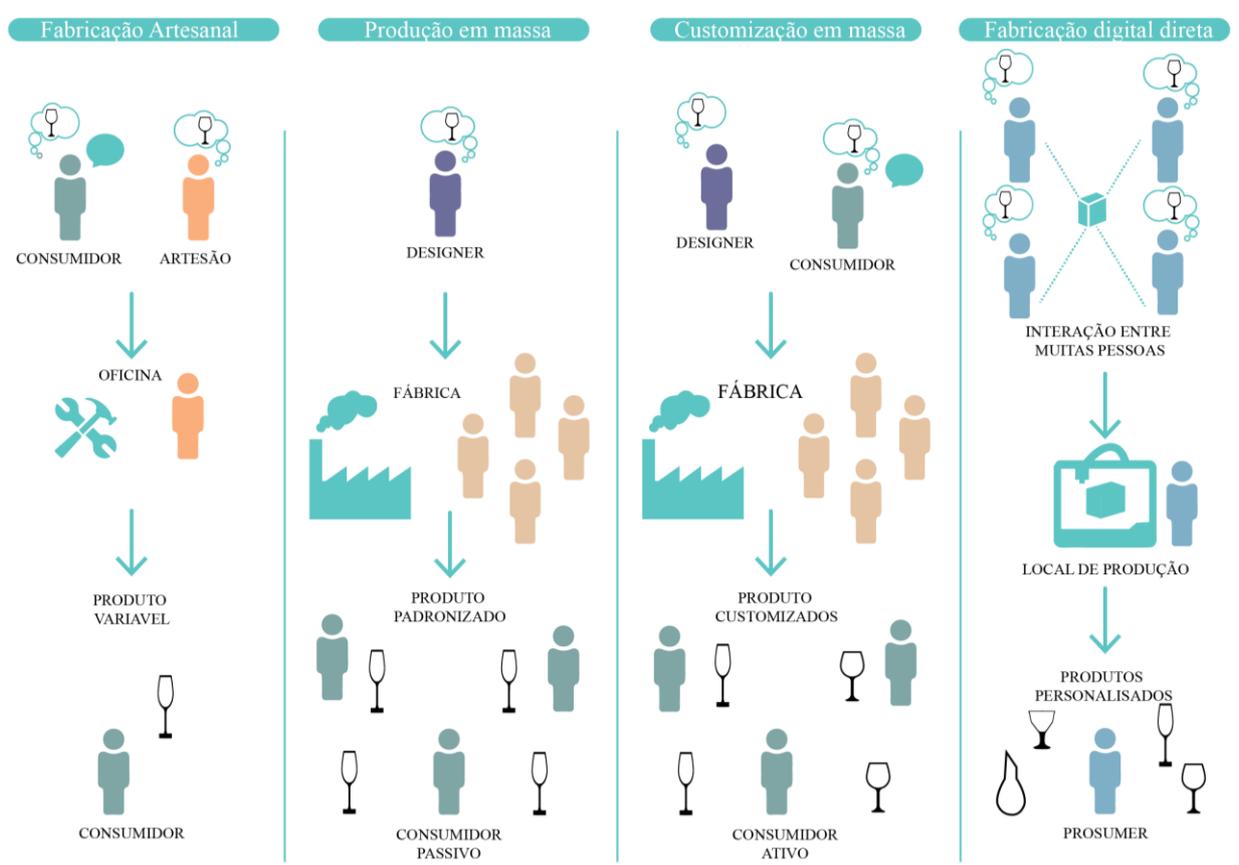
A partir dos anos 1980, observa-se a disseminação da fabricação digital tendo como *start* a democratização das novas máquinas e o surgimento plataformas de código aberto. Isso contribuiu para uma mudança significativa nos processos convencionais de produção, passando para a produção digital, e que atingiu também o design e a materialidade (BALLERINI, 2017).

Inicialmente, a produção de produto era realizada em uma oficina, por um artesão que possuía conhecimento específico. Na produção em massa, o produto passa a ser projetado por um designer, sendo produzido em uma fábrica constituída de operários especializados (CHEN et al., 2015). Já nos processos de customização em massa, possibilitada pelos

<sup>1</sup> Apesar de o autor ter afirmado isso em 1996, os estágios de evolução da manufatura permanecem os mesmos.

softwares de modelagem, o designer projeta pensando em um consumidor “alvo” e, também existe a possibilidade de trabalhar com criação compartilhada, na qual a elaboração do produto ocorre de forma cooperativa (Fig. 3).

**Figura 3: Modelos de Fabricação**



**Fonte:** Adaptado de Neves, Mazzilli, 2013.

Segundo Hopkinson et al. (2006), os projetistas das décadas passadas eram instruídos a projetar formas simples, para facilitar a etapa de fabricação das mesmas. Os autores mencionam uma transição na etapa projetual, inicialmente relacionada à ideologia convencional *Design for Manufacture* (design para manufatura), na qual os projetistas “projetavam para a máquina”. A transição para a *Manufacture for Design* (manufatura para design) ocorre a partir das novas possibilidades promovidas pelos softwares digitais, garantindo maior liberdade para projetar qualquer geometria com auxílio computacional (CAMPBELL et al., 2003 apud HOPKINSON et al., 2006).

É nesse contexto que surge a Fabricação Digital (FD), possibilitando a criação de desenhos em 2D/3D por meio dos novos softwares de modelagem, e uma série de ferramentas e tecnologias para a execução de projetos. A inserção do computador no âmbito de produção industrial foi considerada como uma revolução industrial no período

moderno. Esta promoveu uma evolução da linguagem computacional em paralelo à tecnologia da informática, permitindo a interatividade entre projetista, a codificação digital e a fabricação. No cenário da Fabricação digital, ocorre a ruptura do intervalo entre o digital e o material (BALLERINI, 2017).

No contexto das máquinas controladas por computador, a tecnologia de fabricação pode ser entendida pela sigla CNC (Controle Numérico Computadorizado), derivada do binômio CAD/CAM (BALLERINI, 2017). Nesse campo, os acontecimentos vêm, gradualmente, surpreendendo em todas as escalas, desde as nano-escalas (átomos), passando pelo design de produtos até chegar à escala da arquitetura e construção civil. Há um significativo grau de inovação, levando em consideração o domínio dos sistemas de suporte computacional empregado para explorar ideias de design (KOLAREVIC, 2005).

### ***2.1.1. Relação entre projetista, software de modelagem e maquinários***

A Fabricação Digital e os softwares de modelagem proporcionam uma aproximação do projetista com o processo de fabricação (GERSHENFELD, 2012). Nesse cenário, pode-se dizer que ressurge o paradigma do mestre construtor, no qual o projetista está totalmente envolvido desde a criação até a fabricação de uma forma (KOLAREVIC, 2005).

Segundo Meredith (2008), o designer contemporâneo está aí inserido, ou seja, projeta tendo em mente a fabricação, contribuindo para o surgimento do termo *Design to production*. Considerando o atual processo de construção, a inserção do design digital e dos utensílios de fabricação, ocorre um trânsito de informações desde a ideia até a fabricação do projeto. Para o autor Oxman (2006), devido à evolução tecnológica, surgem novas funções que propiciam maior autonomia para o designer, interagindo e moderando processos e mecanismos gerativos e performativos. Neste contexto a informação passa a ser um “novo material” para o projetista.

O processo que ocorre na era de processo e fabricação digital é denominado *file-to-factory* (do arquivo para a máquina), o qual subtrai etapas de representações entre o projetista e produto final por meio das plataformas digitais, envolvendo nesse processo a troca de informações entre softwares de modelagem tridimensional para uma máquina de fabricação digital, fases estas baseadas em princípios computacionais (OOSTERHUIS, 2005; BARBOSA NETO et al., 2014).

De acordo com Abdullah, Marasini e Ahmad (2006), a metodologia para as manufaturas de Fabricação Digital pode ser descrita, de forma geral, nas seguintes etapas:

1. Geração de um modelo 3D auxiliado por um computador/ software;
2. Conversão do arquivo em 3D para o formato STL (Standart Triangulation Language)<sup>2</sup>;
3. Pré-processamento: Revisão do projeto feito por um programa de computador que analisa o arquivo STL, no qual o modelo pode ser orientado e redimensionado para alcançar um melhor resultado. Este programa realiza o *paneling* (fatiamento paralelo) em seções transversais 2D para serem fabricadas pela máquina;
4. Fabricação do modelo: processamento e verificação do arquivo STL e posterior envio para a máquina de fabricação. Os componentes são subdivididos e construídos em seções;
5. Finalização: etapa para acabamento final do projeto, o material de suporte pode ser removido de várias formas, como até ferramentas manuais.

Com a associação da tecnologia aos softwares de modelagem, a era digital proporcionou também o surgimento do Open Design e dos FabLabs, apresentados brevemente a seguir.

- **Open Design e FabLabs**

O avanço tecnológico viabilizou o surgimento dos movimentos *Makers* e das plataformas de código aberto (MENICHINELLI, 2017). O termo *open-source* (código aberto), definido como ‘manufatura distribuída’, permite acesso livre aos arquivos de projetos digitais, cujos principais atores são os consumidores. Tais projetos podem ser desenvolvidos por variadas pessoas, sendo possível sua configuração e adaptação para atender as principais necessidades do público consumidor. Esse modelo do open-design altera o paradigma da relação desenvolvedor-fabricante-distribuidor-consumidor, criando uma relação direta entre desenvolvedores e consumidores (AVITAL, 2011; MOTA, 2014; CHEN et al., 2015; BASSI, 2017).

Além de facilitar os processos produtivos, a fabricação digital também contribuiu para a criação dos FabLabs: espaços físicos que contêm máquinas de fabricação digital, computadores e softwares, com objetivo de viabilizar a construção de um objeto, desde da modelagem digital até a materialização. Esses locais demonstram competência para

---

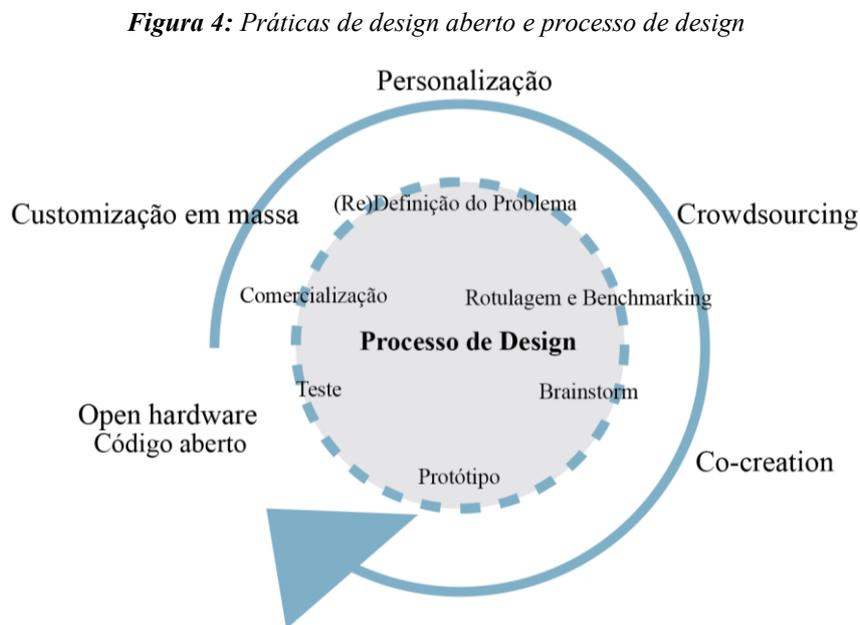
<sup>2</sup> O arquivo STL foi introduzido em 1988, e foi escolhido como um formato neutro entre o sistema CAD e software que suportam todos os sistemas de RP, RT E RM.

capacitar indivíduos, até criar dispositivos para si mesmos (ORCIUOLI, 2012; BASSI, 2017).

Nesse cenário, surge a cultura Maker, com características da cultura do Do-It-Yourself (faça-você-mesmo) e que, aliada aos FabLabs, promove uma conexão mundial por meio do compartilhamento de informações, facilitando o aprendizado, a capacitação e a prática do desenvolvimento de produtos (COSTA, 2018).

De acordo com Neves e Mazzilli (2013) e Aitamurto et al. (2015), o Movimento Maker possui em sua essência o Design Participativo (DP), pois promove a participação dos não designers no processo de projeto e no projeto de fabricação final para entender melhor as necessidades reais dos consumidores. Para os autores, o design participativo associado às plataformas abertas é visto como estratégia empresarial para expandir o fluxo de conhecimento e de crescimento da produção em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento).

No processo de design aberto, designers e não-designers participam em todas as fases do processo de design, dentre elas: estudos das principais necessidades, etapa de criação, processo de fabricação, até chegar à implementação do produto no mercado (Fig. 4) (AITAMURTO et al., 2015).



Fonte: Aitamurto et al. (2015).

O compartilhamento de informações (projeto) e a produção local contribuem para que um produto possa ser desenvolvido em vários lugares diferentes, aperfeiçoando-se cada vez mais, até atingir um modelo ideal (GERSHENFELD, 2012; MOTA, 2014). E a transição para o código aberto possibilita uma nova configuração de fabricação, design e inovação,

no qual o compartilhamento auxilia na melhora dos produtos, do maquinário e do sistema (AITAMURTO et al., 2015).

Ademais, a era de arquivos abertos necessita de um entendimento único sobre as habilidades/possibilidades do design aberto, pois a falta desse conhecimento acarretará falhas no significado do design. Considerando que o avanço tecnológico está voltado principalmente para a inovação/desenvolvimento de produtos com enfoque nos usuários, esquece-se das etapas iniciais do processo de projeto (AITAMURTO et al., 2015). Importante ressaltar o crescente de acesso às manufaturas de Fabricação Digital, pela rápida disseminação e custos relativamente baixos para a aquisição tanto dos equipamentos, serviços e softwares (CACCERE, 2017).

Além da preocupação com a falta de conhecimento para projetar nessa nova era, Kohtala (2014; BALLERINI, 2017) ainda menciona outra preocupação relevante: o estímulo ao aumento do consumo. Dessa forma, o aumento de fabricação de novas categorias de produtos implicaria, necessariamente, em um sistema de reciclagem por parte do consumidor como, por exemplo, do material plástico, o que pode ocorrer pelas propriedades dos materiais.

Perante esta preocupação em relação à produção livre e desenfreada, associada apenas aos quesitos estéticos e aos desejos, é necessária rapidamente uma conscientização ambiental, em busca de novos modos de projetar e de agir.

### **2.1.2. Equipamentos e Processos de manufatura em geral**

Essa revolução tecnológica permitiu o surgimento de diversos sistemas e/ou softwares: *Flexible Manufacturing System (FMS)*, *Computer Aided Design (CAD)*, *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, *Computer Aided Engineering (CAE)*, *Computer Aided Process Planning (CAPP)*, *Computer Business Systems (CBS)*, *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*<sup>3</sup>, dentre outros. A semelhança entre eles é a utilização do computador com intuito de minimizar erros já ocorridos e aprimorar, de forma automatizada, os estágios dos processos produtivos. Em consequência, surgiram manufaturas com comando numérico distintos, que podem estar inseridos em um sistema CAM, dentre eles: *Numerical Control (NC)*, *Computer Numerical Control (CNC)* e

---

<sup>3</sup> Flexible Manufacturing System (Sistemas Flexíveis de Manufaturas), Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador), Computer Aided Manufacturing (Fabricação Assistida por Computador), Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador), Computer Aided Process Planning (Planejamento do Processo Assistido por Computador), Computer Business Systems (Sistemas de Negócios Computadorizados), Computer Integrated Manufacturing (Fabricação Integrada por Computador).

*Direct Numerical Control* (DCN)<sup>4</sup>. Essa nova configuração de sistema produtivo impactou significativamente os projetos e processos dos maquinários, como a utilização de novos materiais, novos processos produtivos, melhoria na qualidade do produto e mudança nos custos de fabricação (MACHADO et al., 2009).

As máquinas de FD podem ser distinguidas pelo processo de fabricação, trazendo possibilidades para exploração de novas geometrias. De acordo com Kolarevic (2005), esses meios de fabricação são definidos como:

- **Fabricação Subtrativa:** definida pelo desbaste de volume especificado de material sólido, pelo processo de fresamento ou de eletroquímica (por ex., cortadora a laser). O fresamento é determinado pela quantidade de eixos, podendo realizar cortes 2D, atingindo até rebaixos do material, em modelos 3D;
- **Fabricação Aditiva:** ocorre pela adição de material de camada em camada, podendo ser chamada também de prototipagem rápida. Essa tecnologia segue o princípio de um modelo digital sólido, dividido em camadas bidimensionais para a fabricação;
- **Fabricação Formativa:** nessa tipologia, forças mecânicas, calor ou vapor são aplicadas a um material para se conseguir a forma desejada, por meio de modelagem ou de deformação.

Esses meios de manufatura podem confeccionar tanto o projeto inteiro, quanto a fabricação por partes, para serem montadas em posteriormente.

Os processos de fabricação digital contam com diversas máquinas, dentre elas: *CNC Precast Concrete Elements*, *3D Printing*, *CNC Laser Cutting*, *CNC Jetcutting*, *CNC Hot Wirecutting*, *CNC Milling*<sup>5</sup>, dentre outras (HAUSCHILD; KARZEL, 2011). No campo do design, as máquinas mais utilizadas em escala de produto são: *CNC Fresadora*, *CNC cortadora a laser* e a *Impressão 3D*, apresentadas a seguir.

Segundo Seely (2004) a *CNC Fresadora* pode ser definida em duas maneiras (Fig. 5).:

---

<sup>4</sup> Numerical Control (Controle Numérico), Computer Numerical Control (Controle Numérico Computadorizado) e Direct Numerical Control (Controle Numérico Direto).

<sup>5</sup> CNC precast concrete elements (concreto pré-moldado), 3D printing (impressora 3D), CNC laser cutting (corte a laser), CNC jetcutting (corte a jato), CNC hot wirecutting (corte a quente), CNC milling (moagem).

- **CNC de até 3 eixos:**
  - utilizada para o fresamento de formas bidimensionais em materiais como folhas de madeira, compensado e espumas.
- **CNC com mais de 3 eixos:**
  - voltada para a criação de formas tridimensionais a partir de um bloco de material, tais como madeira, metal, plástico e espumas.

*Figura 5: CNC até 3 eixos (esq.) e CNC com mais de três eixos(dir.)*



**Fonte:**<https://www.woodworkersjournal.com/cnc-router/><https://www.artec3d.com/cases/woodvetia-cnc-milled-wooden-statues.>

Ambas as máquinas funcionam com o método subtrativo e a distinção entre elas se dá pelos eixos em que a máquina se movimenta. Em relação a maquinários (CNC Fresadora) que possuem em sua estrutura fresas de três, quatro ou cinco eixos, estes têm a capacidade para conceber projetos tridimensionais (PUPO, 2009). As máquinas direcionadas à usinagem de projetos altamente complexos necessitam conter, em geral, cinco eixos em sua estrutura (POTTMANN et al, 2008; XU; LUO; TANG, 2016).

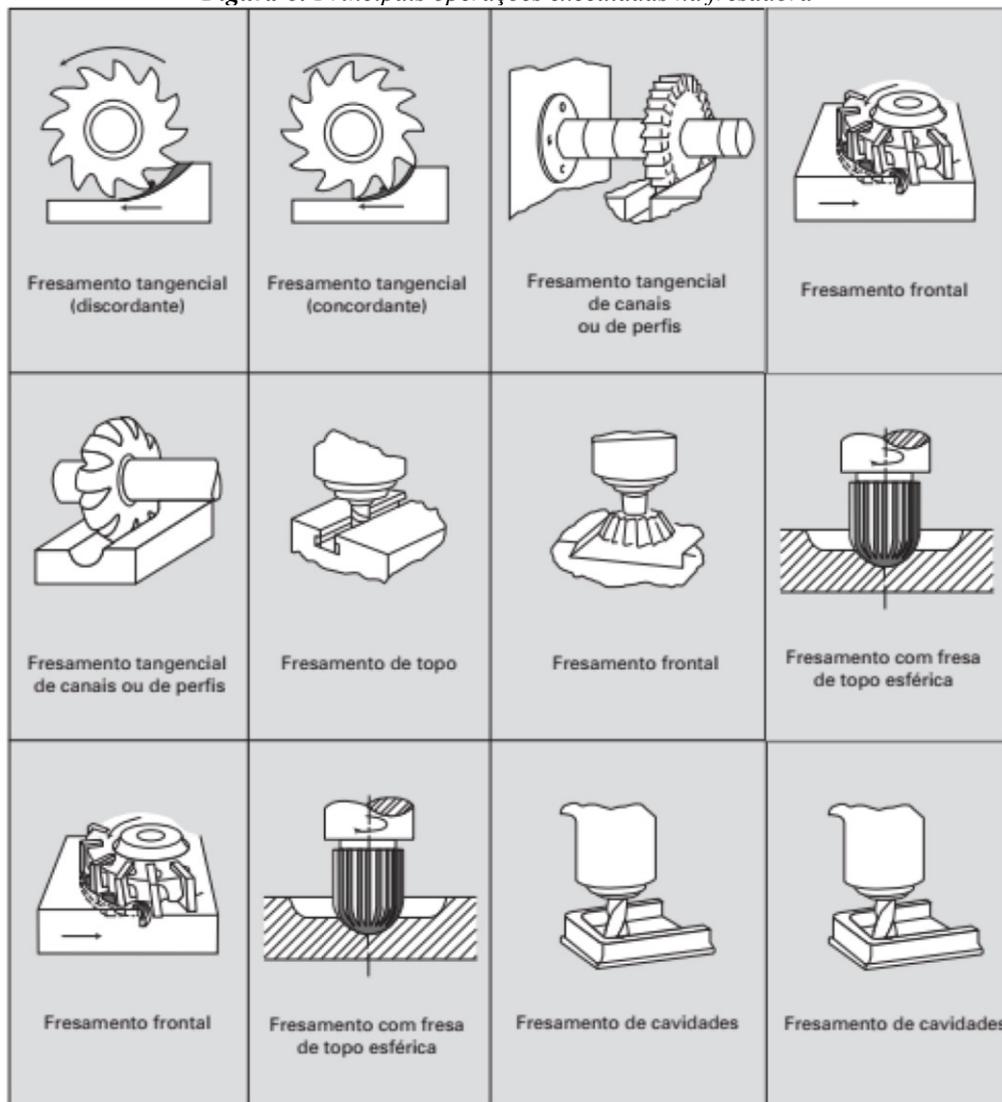
Durante o processo de fresamento, a ferramenta, composta por múltiplas arestas de corte, rotaciona atuando sobre a superfície da peça de trabalho removendo material sob a forma de cavaco. É importante destacar que a peça também se desloca influenciando a interação ferramenta/peça. Como resultado, a superfície usinada pode conter variadas formas, originadas a partir da forma da ferramenta utilizada no processo e pela trajetória percorrida pela mesma sobre a peça usinada (ALMEIDA, 2013).

O processo de fresamento contribui para uma produção flexível e possibilita a manufatura de peças com inúmeras geometrias. Pelo fato de os maquinários utilizarem a ferramenta de corte com vários gumes, a remoção do material é extremamente alta. Esse processo pode ocorrer de duas formas: 1) quando a ferramenta de corte permanece fixa e em

rotação, e a peça que será usinada fixada na mesa movimenta-se, em sentido transversal e longitudinal; 2) de forma inversa, o movimento é feito ferramenta de corte e a peça permanece parada (MACHADO et al., 2009).

Machado et al. (2009) mencionam tipologias distintas de fresamento, classificadas como: fresamento de topo, tangencial de canais ou de perfis, tangencial (concordante ou discordante), frontal, de cavidades e, fresamento com fresa de topo esférica (Fig. 6) (MACHADO et al., 2009).

**Figura 6:** Principais operações executadas na fresadora



**Fonte:** Machado et al., (2009)

O fresamento tangencial é associado quando o eixo da fresa está paralelo ao eixo da superfície, e suas fresas são nomeadas como fresas tangenciais ou cilíndricas. O fresamento frontal ocorre por meio da perpendicularidade entre os eixos da fresa e da superfície, e neste caso as fresas são nomeadas como fresas frontais ou fresas de topo (BALDO, 2013).

Na versão de manufatura subtrativa há uma gama de materiais que podem ser utilizados; porém, a maior preocupação está relacionada ao alto desperdício de matéria prima, ocorrido pelo desbaste da peça durante a fabricação (BALLERINI, 2017). Dentre os materiais gerados durante o processo de usinagem, temos como resíduos: pó do material usinado, retalhos gerados pelos recortes, cavacos e fitas do material. Todos esses resíduos contribuem com a poluição no meio em que vivemos. Diante disso, é relevante um estudo destas tipologias de resíduos, para analisar a viabilidade de reutilização, ou até geração de novos compósitos químicos.

- **CNC *Laser Cutting*:**

- considerada a mais comum entre as manufaturas, movimenta-se nos eixos X e Y. Seu processo se realiza através de um conjunto de espelhos contidos em sua estrutura que direcionam o feixe de laser no material utilizado e, a partir da potência pré-configurada do laser e a espessura da matéria prima, ocorre à queima/gravação ou até o corte do material (POTTMANN et al, 2008). Essa máquina trabalha com materiais como: madeira, papel, papelão, aglomerado de madeira e plástico (SEELY, 2004) (Fig. 7).

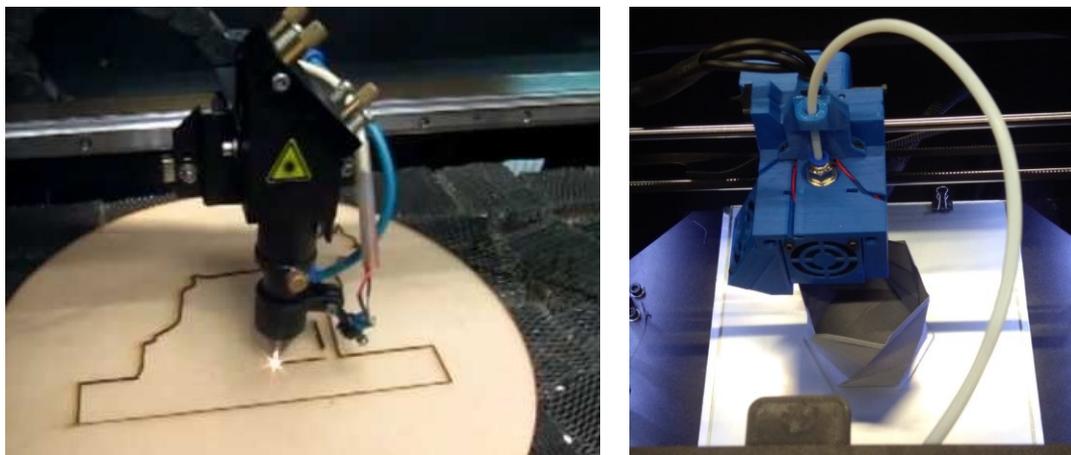
- **3D *Printing*:**

- relacionada ao campo da prototipagem rápida, tem como princípio a manufatura aditiva que, por meio de um cabeçote de impressão, deposita esse material por camadas sucessivas até que o objeto esteja completo (SEELY, 2004). Para que o processo de camadas ocorra, o software possui uma ferramenta usada para a geração de divisões horizontais do projeto digital, enviando as informações computacionais para a máquina (PUPO, 2009). Este processo ainda apresenta problemas que carecem de análise e solução, dentre eles: precisão, acabamento e repetibilidade (HOPKINSON et al., 2006) (Fig. 7).

Em relação à fabricação aditiva, a DDM (Direct Digital Manufacturing) possui como principais características sustentáveis a redução de resíduos, considerando que esta, pois é caracterizada pela maior eficiência de utilização do material adicionado; reduz a necessidade de estoque, impactando na redução de energia e produtos danificados; dispensa o uso de ferramentas complexas (exemplo: moldes); e também possui como particularidade positiva a gestão de resíduos, possibilitando a reciclagem dos produtos com falhas, transformando-os novamente em filamentos (CAMPBELL et al., 2011). Esse

modo de produção pode utilizar diferentes materiais, dentre eles: plástico, chocolate, cerâmica, moléculas, entre outros. A matéria prima mais habitual é referente aos plásticos de engenharia como o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e PLA (Ácido polilático) (VOLPATO, 2007 apud BALLERINI, 2017).

*Figura 7: CNC Laser (esq.) e Impressora 3D (dir.)*



Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/65020788353032815/?lp=true>; elaborado pelo autor

Ressalta-se que a pesquisa faz o recorte na manufatura subtrativa CNC Fresadora e CNC Laser, pelo fato de seus processos resultarem em maiores impactos ambientais ao alto volume de resíduos gerados durante a produção.

### **2.1.3. Software e plug-ins de modelagem digital: eficiência e implicações**

As tecnologias digitais, tanto nos softwares quanto nos processos de fabricação associados aos maquinários, proporcionaram ao projetista maior inserção nos processos de projeto, guiando-os para novos modelos/métodos de criação, representação e fabricação. Entretanto, esses novos meios digitais também desencadearam novas implicações não detectadas anteriormente (ASANOWICZ, 2000).

Kolarevic (2009) afirma que os softwares digitais utilizados nos processos de projeto vêm progredindo cada dia mais, possibilitando novas ferramentas de representação e desenvolvimento de modelagem de geometrias complexas (KOLAREVIC, 2009). Para o autor, muitas das formas geradas em um software digital não foram estruturadas como o processo convencional (no papel): os cálculos matemáticos são realizados pelo sistema computacional generativo no qual, associado pelos parâmetros, o projetista possui a liberdade de controle das formas.

Nesse cenário, os softwares digitais possibilitam ao projetista realizar uma análise mais minuciosa por meio de simulações digitais sobre o projeto desenvolvido, provendo

informações importantes que guiam as decisões dos designers e auxiliam no desempenho no futuro. Essas novas possibilidades não só atingiram o resultado do produto final, mas também alteraram a linha de raciocínio e a forma de projetar dos designers (SCHWITTER, 2005).

O desafio no uso efetivo dessas ferramentas será o quanto bem elas são adaptadas a problemas específicos e quanto bem elas são integradas ao processo de design, um processo que hoje pode ser livre para ser mais orientado para o desempenho do que uma abordagem prescritiva mais tradicional (SCHWITTER, 2005 p.122).

Schwitter (2005) ainda discute a questão do uso do computador no processo de projeto, no qual defende que a tecnologia surge para auxiliar o processo de criação, contribuindo com algumas soluções. Porém, a responsabilidade do projeto, considerando a qualidade, a eficiência, entre outras características é totalmente vinculada ao projetista. É importante ressaltar que quem soluciona os problemas são os designers e não os softwares digitais. Em concordância com o autor, é necessário: “pensar fora do ambiente caixa para soluções para os problemas de amanhã – soluções que garantem a mais alta qualidade de design para nossos clientes” (SCHWITTER, 2005 p.122).

Os recursos tecnológicos e sistemas computacionais auxiliaram no avanço da atividade de projeto, ampliando possibilidades de modelagem da forma, e disponibilizando ferramentas digitais que facilitam a resolução de problemas com recursos como: análise e simulações (quantitativa e qualitativa) da forma, da estrutura, do material, e da construção (SILVA, 2000; KOLAREVIC, 2005). Essa evolução contribui para a análise de inúmeros parâmetros de projeto, incluindo a viabilidade de produção, em etapa prévia à fabricação; isso reduz possíveis erros e minimiza o descarte de produtos defeituosos.

- **Recorte das ferramentas computacionais da pesquisa**

Antes de aprofundar nos softwares escolhidos para a investigação nesta pesquisa (software Rhinoceros, plugin Grasshopper e OpenNest), é necessário esclarecer alguns termos técnicos computacionais e suas contribuições.

Um termo bastante utilizado em quase toda a dissertação é designado como “discretização”, o qual possui a função da geração de instruções numéricas, ou seja, o caminho a ser percorrido pela máquina (o caminho vetorial de posição, da velocidade, da ação ou não ação) em determinadas camadas projetuais.

Como abordado anteriormente há distinções sobre o vetorial 2D (realizado em dois eixos) e o vetorial 3D (realizado em mais planos). O software RhinoCeros encontra-se na categoria da modelagem tridimensional, porém possui algumas restrições. Assim, foi

necessário definir também o uso do *plug-in* de modelagem paramétrica Grasshopper, que realiza uma programação diagramática com parâmetro variável. Este último é definido na categoria *plug-in* (diferente de software), chamado de *at on* ou extensão, pelo fato de o programa não funcionar de maneira independente, necessitando, portanto, do RhinoCeros para ser utilizado.

- **Software Rhinoceros**

Como objetos de estudo foram selecionados o Software Rhinoceros e seus *plug-ins*, com intuito de explorar oportunidades de ferramentas fornecidas pelos mesmos e estudar como esses softwares auxiliam no processo de projeto sustentável.

O software digital Rhino possibilita a modelagem desde as formas simples até as mais complexas, permitindo ao projetista editar, analisar, renderizar em alta qualidade, animar, e trabalhar com curvas, planos, superfícies e sólidos. O software também fornece ferramentas para trabalhar com nuvens de pontos e malhas poligonais. Ademais, o Rhino apresenta alta precisão desde o processo criativo até a fase de fabricação, podendo-se trabalhar em todas as escalas de projeto, desde jóias até um avião, por exemplo. O software é compatível com vários outros softwares de design e engenharia<sup>6</sup> (RHINO, 2020).

Para oferecer uma ampla gama de ferramentas aos projetistas, em geral, os softwares possuem *plug-ins* que auxiliam em atividades mais específicas, como a modelagem paramétrica. Há diversos *plug-ins* e ferramentas que podem ser utilizados junto ao RhinoCeros, e que auxiliam em variadas áreas de projetos. Alguns desses *plug-ins* são: Panther, XirusCAD, RhinoCFD, VisualARQ - BIM para Rhino3d, Orca3D, OpenNest, RhinoGold, DIVA for Rhino, entre outros. Como o Rhino não possui a capacidade de aplicações paramétricas, ele conta com o *plug-in* Grasshopper (editor de algoritmos com uma interface gráfica) para a realização de tal atividade. Em princípio a pesquisa faz recorte principal nos *plug-ins* Grasshopper e o OpenNest, podendo abordar outros posteriormente<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> O software Rhino permite também o trabalho com Scripts, surgindo como possibilidade o uso da programação dentro do software, como exemplo as linguagens: Python, C++ (RHINO, 2020).

<sup>7</sup> <https://simplyrhino.co.uk/support/nvidia-quadro-card-tests/for-rhino-6-wip/itemlist/category/20-rhino-plug-ins>

- **Design Paramétrico**

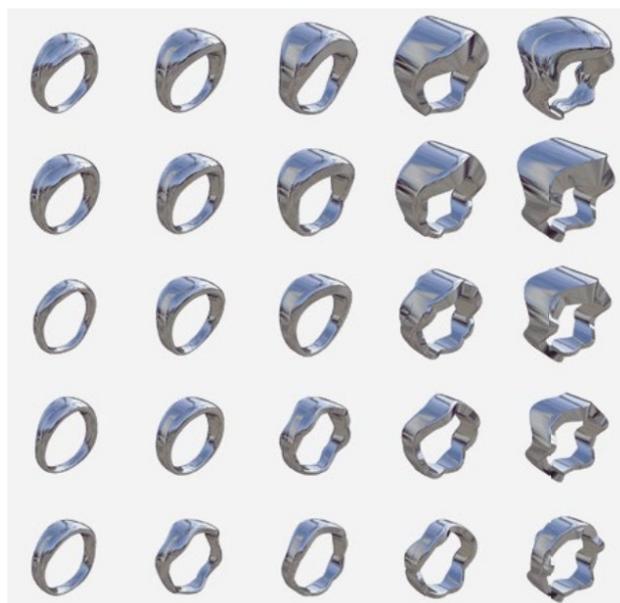
O design paramétrico pode ser considerado uma tipologia de customização/personalização em massa (onde o projeto é modificado), possível a partir do uso do software paramétrico, conhecidos também pelo termo “geometria associativa” (BARBOSA NETO et al., 2014). De acordo com Blikstein (2013), a Fabricação Digital acelera o ciclo de invenção do design, transformando uma ideia em um produto, tendo a possibilidade de redesenho em um mesmo intervalo de tempo. O autor ressalta também a importância do educador no processo de ensino ao utilizar a máquina como ferramenta de exploração de novas formas de interações humanas.

Sobre os softwares de parametrização, Oosterhuis (2005, p.2) afirma que:

[...] Cada vez que um parâmetro é alterado, o modelo se regenera para refletir o novo valor. [...] O modelo paramétrico representa a configuração de uma meta design que permite um design reconfigurável.

Eltaweel e Su (2017) afirmam que, nos processos de modelagem digital convencionais do design, para modificar/alterar alguma parte específica após a finalização da modelagem do projeto, é necessário começar todo o processo novamente. E esse fator impacta significativamente no processo de trabalho de uma empresa, devido ao tempo gasto. A evolução dos softwares de modelagem tornou o processo de design mais eficiente e integrado, possibilitando a reconfiguração do projeto modelado apenas por mudanças dos parâmetros projetuais, diretamente conectados (Fig. 8).

**Figura 8:** Projeto de jóias paramétricas e sistema de fabricação



**Fonte:** Frazer (2016 apud FISCHER E HERR, 2015).

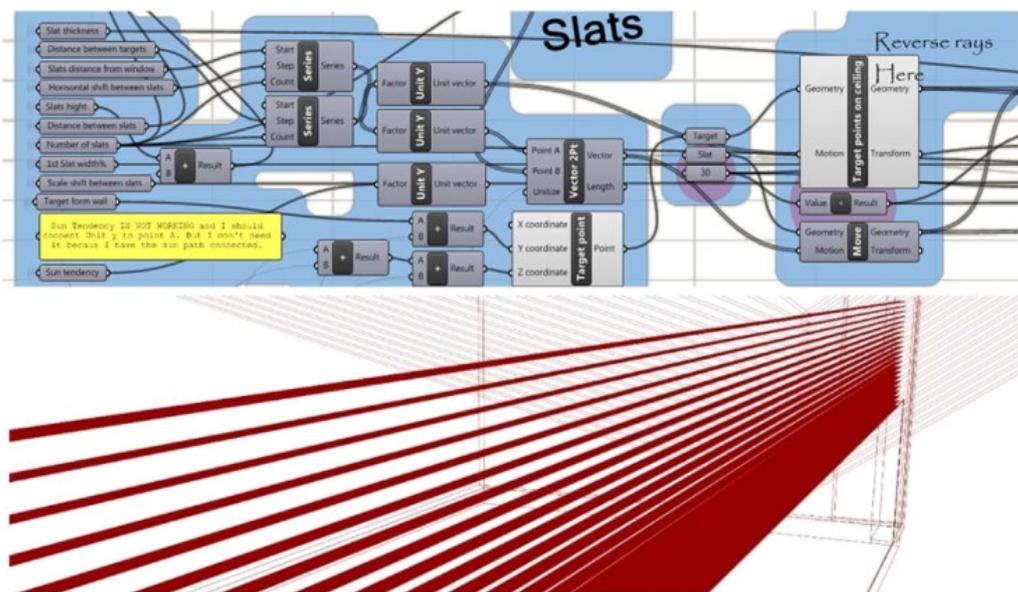
O design paramétrico adota princípios variáveis da matemática, onde cada elemento do projeto é associado a um parâmetro que, quando modificado, outras formas são geradas simultaneamente (ÇALĐŞKAN, 2017; ELTAWHEEL; SU, 2017). Alves e Pratschke (2013) afirmam que o design paramétrico pode ser considerado um método baseado em processos de criação e modelagem digital, iniciando-se na fase projetual, com a determinação de informações (inputs, ou parâmetros), que são os valores de uma variável e, quando alterados, refletem na forma tridimensional do projeto, mantendo uma correlação com a forma inicial.

Para Eltaweel e Su (2017 p.3), o desenho paramétrico é: “uma maneira de explorar soluções de design e algoritmos através de fórmulas, em vez de usar geometrias normais”. Segundo Alves e Pratschke (2013), o design paramétrico promove variedades nas práticas projetuais, impactando diversas áreas, desde o design até o desenho urbano. Possui como principal característica a possibilidade de articulação de inúmeras complexidades.

O design paramétrico depende da definição de relacionamentos e a disposição (e capacidade) do designer de considerar a fase de definição de relacionamento como parte integrante do processo mais amplo de design (WOODBURY, 2010 p.24).

O *plug-in* Grasshopper funciona através de um editor de algoritmos que espelha no software Rhinoceros uma modelagem paramétrica. O processo de modelagem (Fig. 9) ocorre baseado nos parâmetros definidos pelo designer, que se estrutura em cápsulas conectadas, construindo a fórmula do projeto que pode ser reconfigurada (ELTAWHEEL; SU, 2017).

**Figura 9:** A seqüência lógica do processo de modelagem



Fonte: Eltaweel e (Su 2017).

O uso de algoritmos da modelagem paramétrica possibilita infinitas simulações para se atingir o resultado mais adequado para o projetista (VANNINI et al. 2014). Este processo é realizado através de inúmeros processamentos digitais, transcrição do conceito projetual a partir de números, sendo essencial a capacitação cultural e técnica do projetista para lidar com a modelagem digital algorítmica (WOODBURY, 2010; BORGES, 2014).

O *plug-in* Grasshopper é uma ferramenta incluída no Rhino, que opera com a linguagem computacional, sendo um “editor de algoritmos gráficos”; porém, diferentemente dos programas de computação, o projetista não precisa ter a habilidade de programação, pois a modelagem é realizada por “baterias” e não por códigos (RHINO, 2020).

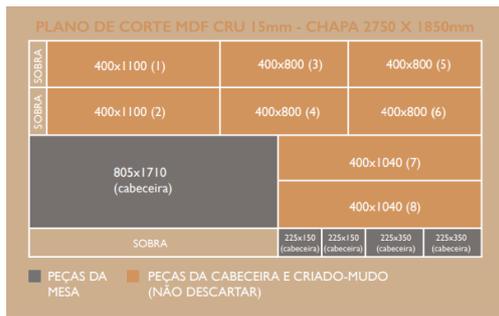
O autor Davis (2013, p.48), define um modelo paramétrico como um conjunto de equações que expressam um modelo como funções explícitas de vários parâmetros. Os modelos paramétricos podem ser classificados como “Design Associativo”, no qual, quando algum parâmetro do sistema generativo é alterado, instantaneamente ocorre uma mudança dentro dos outros elementos em modelos paramétricos gerando um aspecto formal a partir de um conjunto de parâmetros (NOJIMOTO; TRAMONTANO; ANELLI, 2011; ÇALĐŞKAN, 2017).

- **Planejamento de Corte e *plug-ins***

Nos processos de fabricação subtrativa, o planejamento de corte consiste na organização das peças do projeto na chapa que será cortada, em busca otimização do material e redução do desperdício e conseqüente redução do impacto ambiental. O autor Morais (2011) reforça a importância do planejamento de produção na gestão empresarial, especialmente no contexto de empresas moveleiras, possibilitando a melhor escolha do método de fabricação, o dimensionamento do estoque, diminuição dos resíduos descartados no meio ambiente, redução dos custos de produção e do tempo de fabricação.

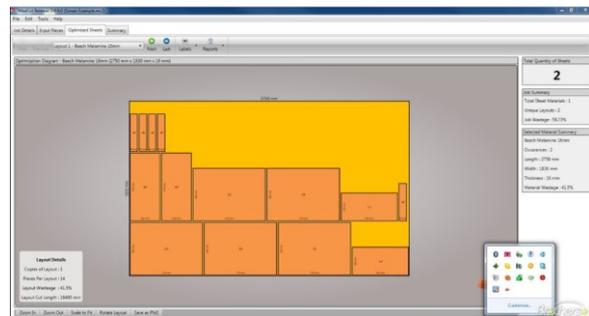
A pequena indústria moveleira brasileira de produção sob medida, predominantemente em MDF (Medium Density Fiberboard), em geral com peças retas, pouco complexas, tem enfrentado sérios problemas com os resíduos gerados na etapa de produção (ABRÃO, 2017). E, embora existam softwares digitais para auxiliar no plano de corte dos painéis (Fig. 10 e 11), tais como o Selco Optiplanning, Corte Certo, Max Cut e outros, a utilização pelas empresas ainda é muito baixa.

**Figura 10:** Planejamento de corte Arauco



**Fonte:** <https://www.arauco.cl/brasil/ayuda-para-tus-proyectos/guia-del-marcador/>

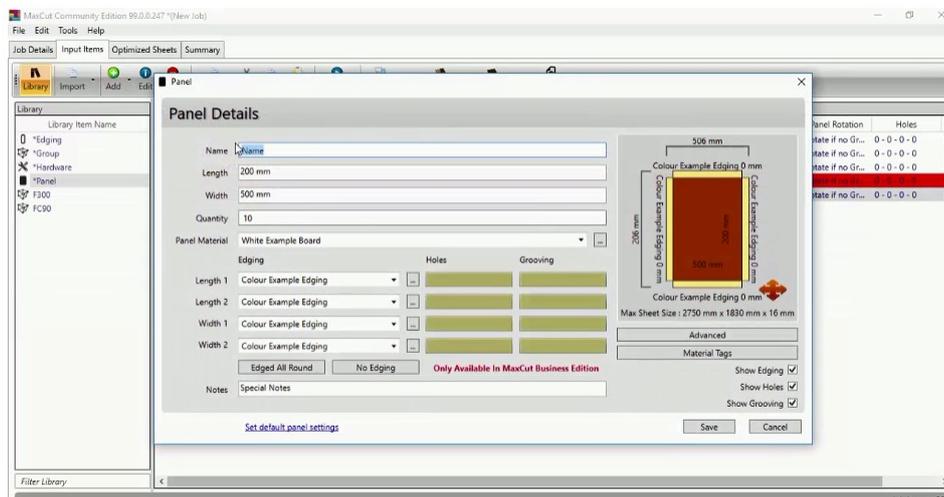
**Figura 11:** Plano de corte Max Cut



**Fonte:** <http://maxdesign.com.br/letras-em-mdf/wp-content/uploads/2017/12/programa-max-cut.jpg>

Em geral, esses softwares trabalham com dimensões, como: altura, comprimento, espessura e números de peças iguais como podemos observar na figura 12.

**Figura 12:** Interface digital Max Cut



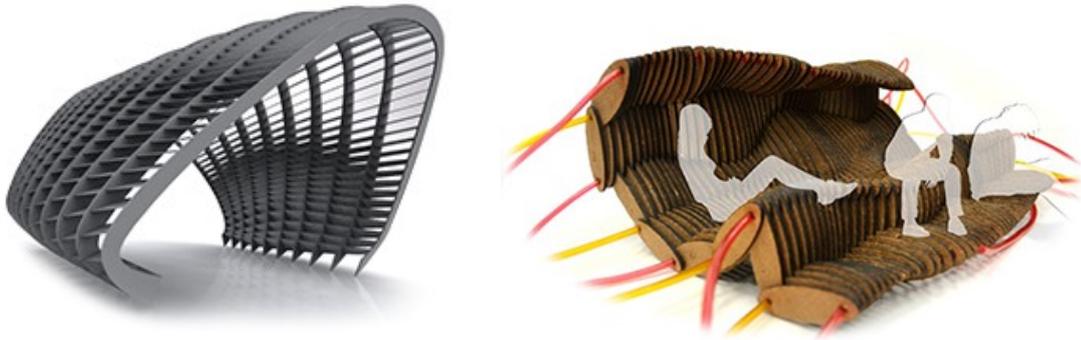
**Fonte:** <https://www.maxcutsoftware.com/>

Os exemplos anteriores tentam ilustrar de forma breve a importância dos planos de corte. Transportando os projetos para o campo das geometrias complexas, observa-se a relevância ainda maior do uso de ferramentas que antecipem os impactos da produção. Nesse cenário, os *plug-ins* que fazem o planejamento de corte, são ferramentas digitais fundamentais antes do envio do arquivo para a fabricação, dentre os quais destacamos o RhinoNest e o OpenNest.

- **RhinoNest**

O *plug-in* RhinoNest (utilizado no RhinoCeros) é responsável pela otimização das peças do projeto (independente da complexidade da forma) que serão cortadas na placa do material utilizado, com finalidade de minimizar o material descartado (Fig. 13) (RHINONEST, 2020).

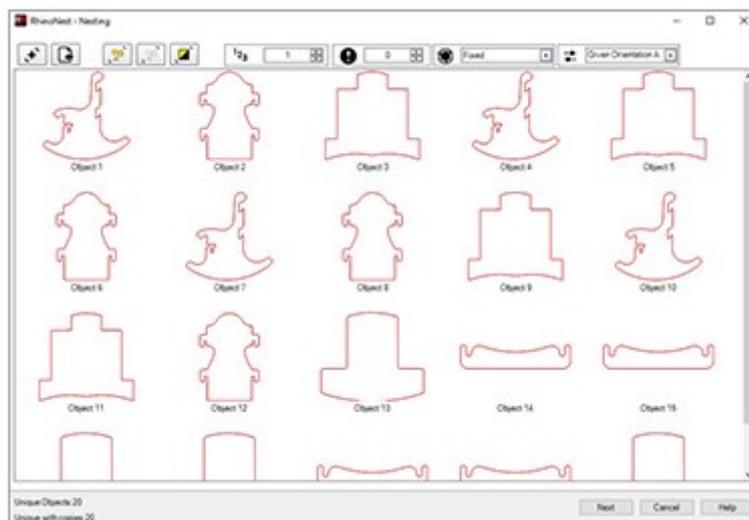
**Figura 13:** Produtos complexos Rhino



**Fonte:** <https://www.tdmsolutions.com/rhinsonest/>

O *plug-in* também possibilita a detecção das peças no plano a partir da modelagem tridimensional, por meio do recurso chamado “remapeamento” (Fig. 14). Ademais, permite definir parâmetros para determinar o espaçamento das peças e também a dimensão dos painéis de corte (RHINONEST, 2020).

**Figura 14:** Planejamento de corte RhinoNest



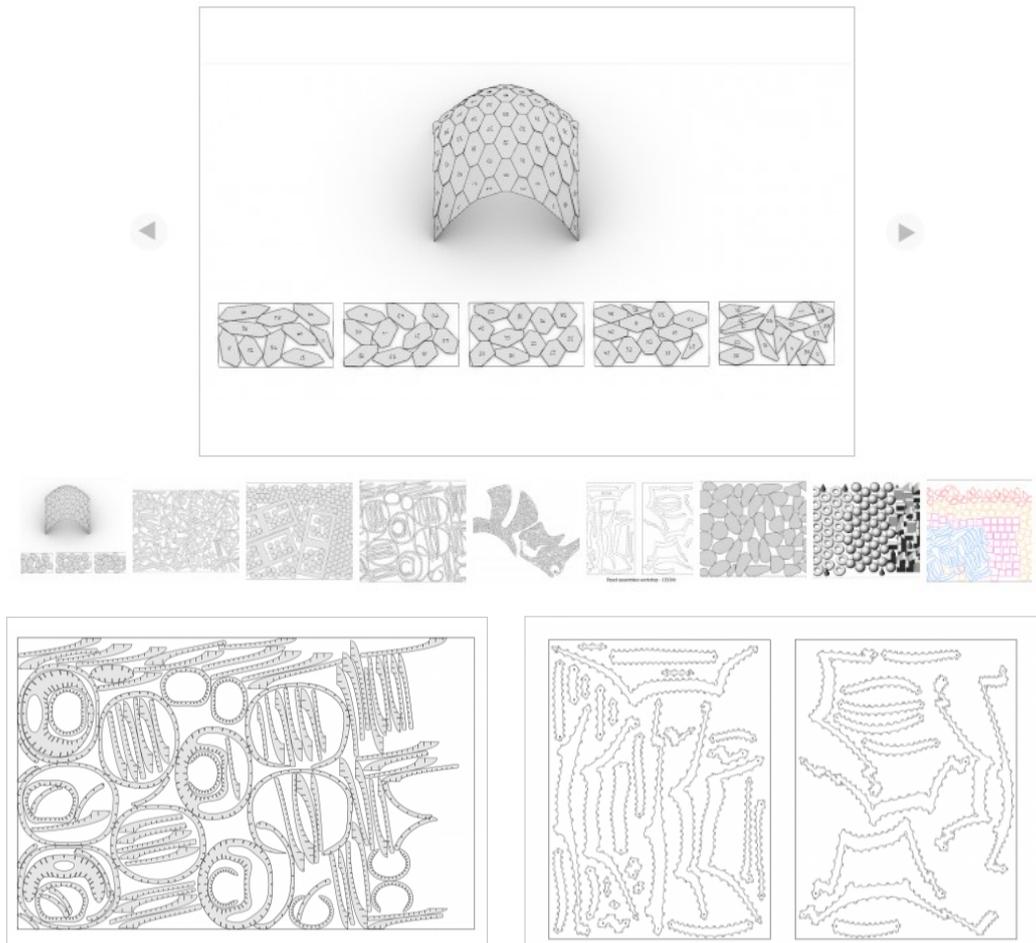
**Fonte:** <https://www.tdmsolutions.com/rhinsonest/>

Ao final, o *plug-in* gera um relatório que possibilita aos projetistas uma visão geral do projeto: exibe a quantidade de peças e painéis, a área a ser usada e a área restante, para análise de otimização da placa ou outros usos futuros (RHINONEST, 2020).

- **OpenNest**

O *plug-in* OpenNest atualmente encontra-se na plataforma Grasshopper e possui função de planejamento de corte das peças do produto gerado na visualização 3D (Fig. 15) (OPENNEST, 2020).

**Figura 15:** Planejamento de corte OpenNest



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

A diferença do OpenNest com relação ao RhinoNest está apenas no local de onde se encontram os *plug-ins*. Embora os softwares forneçam a melhor versão de planejamento de corte, é possível observar (pelos espaços ‘vazios’ resultantes do planejamento), que estes ainda poderiam ser mais eficientes.

#### **2.1.4. Implicações ambientais da Fabricação Digital**

Junto das mudanças e inovações no modo de projetar e produzir trazidas pela Fabricação Digital vieram também algumas questões relacionadas especialmente ao meio ambiente. Vários autores (MANZINI, 1993; WALKER, 2005; MANZINI e VEZZOLI, 2008; NUNES, 2013; FLORES; TERRIBILE, 2015; BALLERINI, 2017; BASSI, 2017; FREEMAN, 2018) têm discutido o papel imprescindível do projeto e seu ciclo de vida, respeitando os limites do planeta a partir do uso eficiente o uso dos recursos naturais.

Nesse contexto, estar ciente da capacidade e limitações de fabricação e de maquinário, direciona os designers a projetar potencializando as capacidades dos maquinários, o que

resulta em uma relação intensa entre os projetistas e os processos de produção (KOLAREVIC, 2010 apud BARBOSA NETO et al., 2014).

- **Complexidade das formas**

No modo convencional de produção, a fabricação de peças com formas complexas impacta no custo final do produto. Na fabricação digital, a complexidade das formas não influencia muito o custo de fabricação: moldes e ferramentas diversas são reduzidos, pois, apenas uma máquina consegue realizar variadas tipologias de corte (HOPKINSON et al., 2006). Dessa forma, a manufatura digital promove liberdade de criação permitindo um alto nível de complexidade de projeto.

De acordo com Kolarevic (2005), o fascínio pelas formas ocorre por meio dos softwares de modelagem tridimensionais, como o Rhino, baseados em NURBS (*Non-Uniform Rational B- Splines*), que permitem a formação de curvas variadas e superfícies paramétricas e o desenvolvimento de inúmeras formas complexas (PUPO, 2009). As novas formas geométricas denominadas “*free form geometries*” (geometrias livres) elevam a importância da prototipagem rápida e a fabricação digital nas quais, por meio dos *inputs* e *outputs* digitais, são capazes de gerar formas tangíveis, precisas, compostas de geometrias complexas (Fig. 16). Ademais, proporcionam maior flexibilidade e novas possibilidades de projeto (PUPO, 2009).

**Figura 16:** Projetos com geometrias complexas

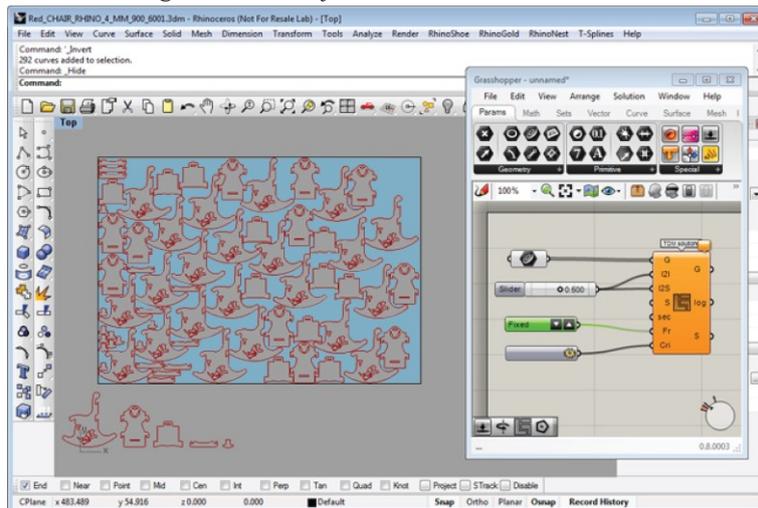


**Fonte:** Pinterest 2019

Apesar das vantagens da fabricação digital, existem também muitos desafios a serem superados tendo em vista, principalmente, questões relacionadas ao meio ambiente. No cenário dos impactos ambientais, destaca-se a fabricação de objetos com geometrias complexas em **máquinas de manufatura subtrativa**. Por mais planejado seja o corte de peças (uso de *plug-in* RhinoNest, fig. 17), o fato de os projetos conterem variadas curvas

pode resultar em um grande volume de resíduos pequenos, inviabilizando seu reaproveitamento e, conseqüentemente, provocando danos ambientais, tanto pelo material inutilizado quanto pelo descarte incorreto, em muitos casos. Dessa forma, é fundamental que designers/projetistas utilizem as melhores potencialidades dos softwares de modelagem, porém visando minimizar o máximo de resíduos gerados no processo de manufatura dos projetos.

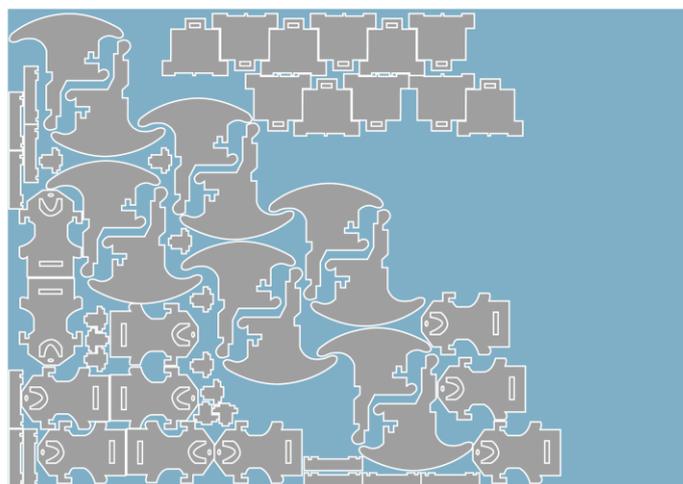
**Figura 17:** Planejamento de corte do RhinoNest



Fonte: <http://help.tdmsolutions.com/rhionest/3.0/en/index.html?Grasshopper.html> (2018)

Porém, embora se configure como recurso importante, mesmo o corte planejado via *plugin* RhinoNest ainda apresenta falhas (conforme pode ser observado na fig. 17), também ilustrado no planejamento manual das mesmas peças presentes na figura 18.

**Figura 18:** Planejamento de corte adequado

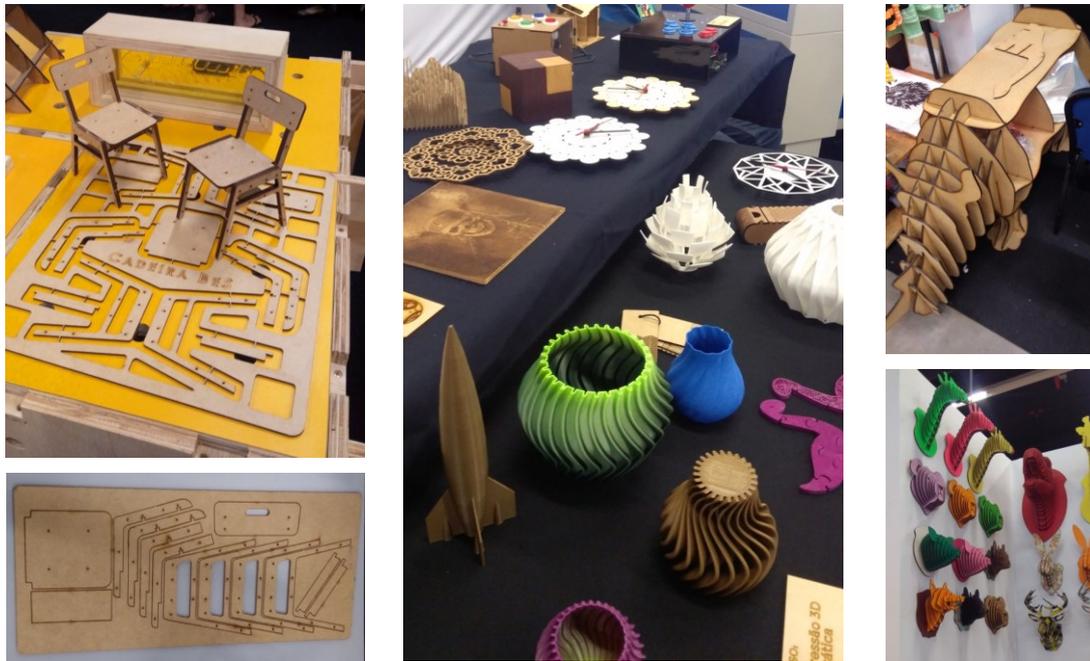


Fonte: Elaborado pelo autor

A título de ilustração, a figura 19 traz uma série de pequenos objetos produzidos por empresas criativas para o evento Pixel Show 2018, em São Paulo, utilizando a manufatura

subtrativa como ferramenta principal. Esses maquinários foram utilizados principalmente para produzir adornos em MDF, com significativa geração de resíduos.

*Figura 19: Produto e planejamento de corte – Pixel Show 2018*



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Para Walker (2005), inicialmente é importante detectar o problema relacionado à função do designer e suas contribuições para a sociedade. Sendo a preocupação com a estética dos produtos uma das características dos processos criativos dos designers, o autor sugere uma mudança de postura do profissional, iniciando uma reflexão da correlação entre as práticas insustentáveis de fabricação e a estética dos produtos. Em sintonia com Walker, os autores Flores e Terribile (2015 p. 12) destacam que “novos processos produtivos requerem a visualização do homem como um elemento/parte integrante da sustentabilidade profunda”.

- **Resíduos Sólidos**

Em 2010, visando regular o tema dos resíduos sólidos no país, foi criada a Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional Dos Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecendo metas e ações importantes para o controle ambiental. Dentre as ações, destacam-se: o ciclo de vida do produto e a responsabilidade compartilhada do poder público, empresas privadas e sociedade. A PNRS inseriu o termo “logística reversa”, no qual a etapa de descarte do produto retorna para a empresa que o fabricou, passando a ser responsável pelos resíduos e o que será feito do mesmo, e cuja ação é conhecida como poluidor-pagador (GRISA; CAPANEMA, 2018).

O principal objetivo da lei é diminuir o máximo de resíduos sólidos<sup>8</sup>, reaproveitando o máximo dos resíduos gerados e depositando no aterro apenas o que não foi possível reduzir/recuperar/reaproveitar/reciclar, sendo a meta principal a não geração de resíduos ainda na etapa de produção (Fig. 20) (MMA, 2020; GRISA; CAPANEMA, 2018).

*Figura 20: Ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos*



**Fonte:** Brasil (2010 apud GRISA e CAPANEMA, 2018).

De acordo com Hoornweg e Bhada-Tata (2012 apud SAMPAIO et al. 2018), as etapas de fabricação/uso de produtos industriais são os coadjuvantes principais do cenário atual dos impactos ambientais e, em relação a etapa de descarte, contribuem em 5% dos danos ao meio ambiente. O descarte incorreto, além de promover ainda mais a poluição, provoca aglomeração de insetos, provocando doenças, e certas tipologias de materiais (como o MDF, por exemplo), quando queimados, liberam gases tóxicos, afetando tanto o meio ambiente, quando a saúde da população (ABRÃO, 2017).

A quantidade de lixo urbano está aumentando cada vez mais em todo o planeta, e dentre as soluções possíveis imediatas estão a minimização dessa quantidade de refugo e a busca uma cultura de consumo baseada na utilização de materiais recicláveis nos produtos (MOURA, 2018). Ademais, é necessário ainda uma conscientização em relação aos

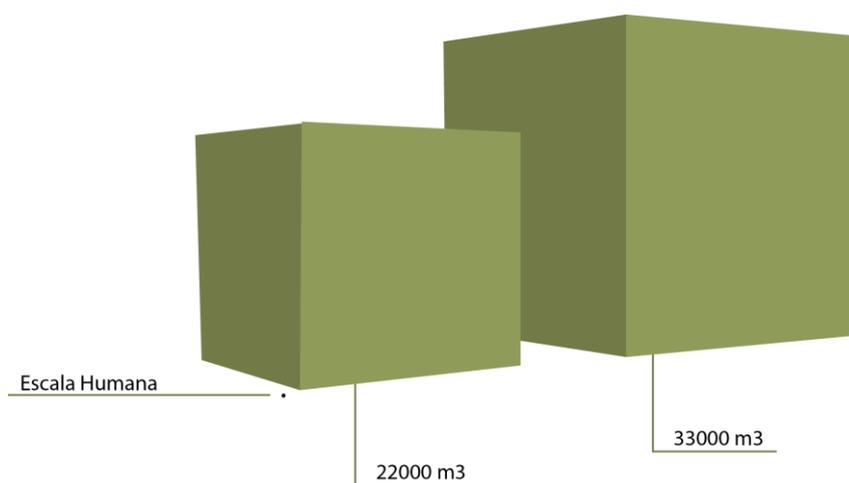
<sup>8</sup> O 17º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2018, elaborado pela Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), apontou a estimativa de 62,78 milhões de ton/ano ou 172 mil ton./dia de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros, considerando os resíduos domiciliares e os públicos. Em contrapartida, foram coletadas apenas 1,7 milhão de toneladas de resíduos recicláveis no ano de 2018 sendo que, em média, a cada 10Kg de resíduos para coleta, apenas 411 gramas de material são coletadas. Em relação à estimativa de descarte anual, apenas 46,68 milhões são depositadas em aterros sanitários, e 15,05 milhões de toneladas foram descartados em locais inapropriados, como os aterros controlados e os lixões (MMA, 2020).

aterros sanitários e sua limitação que, ao descartar o lixo em terrenos baldios, colabora ainda mais com a proliferação de doenças urbanas (MOURA, 2018).

No caso específico de Uberlândia, o setor moveleiro vem causando sérios danos ambientais relacionados aos resíduos da produção de móveis sob medida e ao seu descarte final. Em virtude do sistema de fabricação convencional (movimentação X e Y das fresadoras), os resíduos não possuem complexidade em suas formas; ainda assim, o reaproveitamento já é considerado um grande desafio para o setor. Além disso, o alto volume de resíduos de MDF descartados em terrenos baldios urbanos, ruas, junto aos lixões urbanos, somado ao tratamento recebido (queima do material) também é motivo de grande preocupação, em função da liberação de gases provenientes do formaldeído utilizado para sua fabricação (ABRÃO, 2017).

De acordo com pesquisa realizada entre 2010 e 2012 (NUNES, 2012) e em 2017 (ABRÃO, 2017), as estimativas realizadas identificaram que, em 2012, a média de descarte do setor moveleiro no município correspondeu a cerca de 420Kg/semana de resíduos de MDF por empresa (considerando 800 MPEs, OLIVEIRA et al., 2012). Em termos de volume, a partir dos dados coletados e da estimativa de descarte, observou-se um grande aumento, passando de cerca de 22.000m<sup>3</sup> em 2012 (NUNES, 2012) para cerca de 33.000m<sup>3</sup> (ABRÃO, 2017) (Fig.21).

*Figura 21: Resíduos descartados anualmente pelo setor moveleiro*



**Fonte:** Abrão (2017)

Ressalta-se aqui, portanto, a importância do planejamento de corte antes da produção, pois se o reaproveitamento de retalhos se mostra difícil em projetos planejados ortogonais (cujas sobras são essencialmente compostas por quadrados e retângulos), no caso das

formas complexas decorrentes dos processos de manufatura subtrativa digital, o problema pode aumentar exponencialmente.

## 2.2. Sustentabilidade em produtos e ética projetual

Em sintonia com o relatório Brundtland, uma sociedade sustentável é definida pelo uso dos recursos naturais para realizar apenas as necessidades humanas, sem impactar no futuro das próximas gerações (CAPRA, 2006; HENKES, 2016). Porém, observa-se que o preceito da competição baseado na “maximização dos benefícios” conduziu a resultados éticos negativos referentes à perda de trabalho, danos ambientais e escassez de recursos naturais (VASCO, 2004).

Em contraposição ao discutido desde o relatório Our Common Future, percebe-se um aumento significativo do uso dos recursos naturais, um crescimento da economia, da população e da infraestrutura e aumento da geração de resíduos (STEFFEN et al., 2015; FREEMAN, 2018).

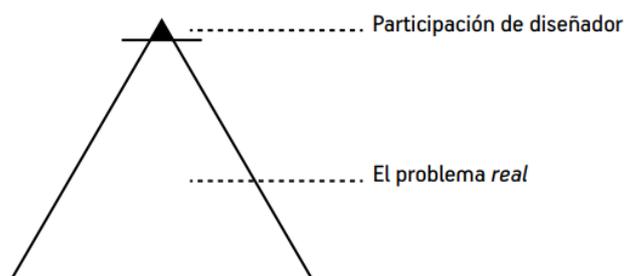
Segundo Capra (2006), o planeta vive uma crise definida como “Crise de percepção”, “onde esses problemas precisam ser vistos, exatamente, como diferentes facetas de uma única crise” (CAPRA, 2006 p. 14).

Quanto mais estudamos os principais problemas de nossa época, mais somos levados a perceber que eles não podem ser entendidos isoladamente. São problemas sistêmicos, o que significa que estão interligados e são interdependentes (CAPRA, 2006 p.14).

Desde o livro **Design for the Real World**, Papanek (2004) já discutia o papel do designer e sua responsabilidade perante as demandas reais da sociedade (Fig. 22). Nesse cenário, o autor apresenta vários questionamentos sobre o valor do designer; como identificar as necessidades reais, e outros. Para Papanek, a responsabilidade do projetista surge no momento que este aceita ou rejeita oportunidades de solucionar os problemas da sociedade como um todo, ou seja, é responsável desde as mortes provocadas pelos defeitos/irresponsabilidades em projetos aos danos ambientais que de forma indireta provocam outras diversas implicações ao planeta.

Na mesma linha, para Walker (2005, p.3) a maioria dos produtos de consumo possui uma característica semelhante, “[...] a estética de um desperdício desmedido e de práticas social e ambientalmente danosas”. O autor define essa condição como a “economia do simbólico, onde o produto possui uma estética extraordinária, mas não contém nenhum valor de reflexão” (MAGALHÃES, 2015; BASSI, 2017).

**Figura 22:** *El Diseño específico*



**Fonte:** Papanek (2004)

Ressalta-se assim a importância da ética nas pesquisas e ações, especialmente àquelas voltadas à preservação do meio ambiente, para além dos regulamentos, ou seja, projetando soluções e programas ambientais sustentáveis, aplicados a todas as atividades e iniciativas da sociedade, em busca da “máxima definição da sustentabilidade” (HENKES, 2016).

Em consonância com Papanek (2004) e Capra (2006), essa pesquisa busca analisar o processo projetual, seus impactos e como é possível utilizar recursos tecnológicos que contribuam para uma mudança de comportamento projetual alterando o modo de pensar e agir, reconfigurando nossos valores como projetistas. Para Flores e Terribile (2015), essa mudança somente será possível a partir da adoção da “ética ocupacional sustentável”, que prevê privilegiar o meio ambiente nos sistemas de produção e consumo.

Se, de um lado, a tecnologia contribuiu para o surgimento de diversas máquinas industriais nocivas para o ambiente de trabalho e para o meio ambiente (FLORES; TERRIBILE, 2015), de outro, o avanço tecnológico trouxe novas oportunidades de compartilhamento e produção democrática, impactando os sistemas de produção, distribuição e, principalmente, o processo de projeto. Todo o conjunto influenciou comportamentos e percepções da sociedade, configurando uma nova economia, cultura e sociedade (BASSI, 2017).

Então, para atingir um equilíbrio, do ponto de vista do design, é indispensável conhecer e questionar os processos de projeto, refletir crítica e conscientemente sobre os impactos das soluções propostas, visando responder às demandas de forma ética, inovadora e sustentável (CHEN et al., 2015; BASSI, 2017). Bassi complementa (2017, p.106): “todos são livres para ter ideias ou se sentir/ser criativos, mas isso não significa ser um designer”. O designer deve considerar uma série de restrições e combiná-las de forma criativa, técnica e ética. Em 1972, Charles Eames já discutia sobre isso em uma entrevista sobre

“O que é Design?” (DESIGN Q & A, 1972). Na oportunidade, questionado sobre quais seriam essas restrições, Eames responde:

“A soma de todas as restrições. Aqui está uma das poucas chaves eficazes para o problema de Design: a capacidade do Designer de reconhecer o maior número possível de restrições; sua vontade e entusiasmo por trabalhar dentro dessas restrições. Restrições de preço, de tamanho, de força, de equilíbrio, de superfície, de tempo e assim por diante. Cada problema tem sua própria lista peculiar” (Trecho da entrevista, tradução livre, DESIGN Q & A, 1972).

Para tanto, é necessário ter uma visão sistêmica do problema, entendendo as conexões e os atores envolvidos, atuando em pequenas escalas que possam ser difundidas e consolidadas (CAPRA, 2006). Estas questões baseiam-se, essencialmente, em estudos dos fatores humanos, tecnológicos, econômicos, buscando a melhoria na qualidade de vida e a preservação ambiental (CASAGRANDE JR., 2004 apud SILVA; HEEMANN, 2007).

### ***2.2.1. Dimensão Ambiental e o Life Cycle Design***

Apesar do domínio dos softwares de modelagem utilizados nos processos de projetos, os projetistas ainda não estão preparados para solucionar questões de produção por meio dos parâmetros da Fabricação Digital (BARBOSA NETO et al., 2014). Ballerini (2017) afirma que essa especialização em relação à FD é essencial ao designer contemporâneo.

Diegel et al. (2010) ressaltam ainda que os métodos sustentáveis auxiliares nos processos de projeto, tais como análise do ciclo de vida e outros, necessitam ser revistos e reconfigurados, considerando aspectos dessas novas manufaturas digitais. Acrescenta-se aqui a importância de se considerar, ainda no processo projetual, a manufatura a ser utilizada, bem como suas potencialidades de restrições.

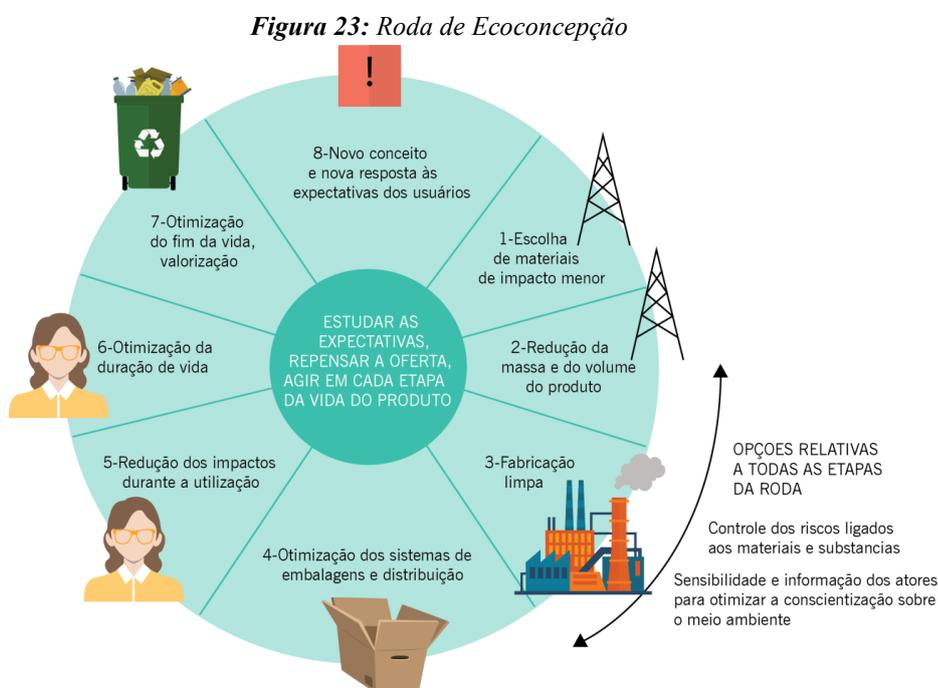
Partindo de estudos de materiais do autor Hopkinson et al. (2006), há seis principais requisitos associados à fabricação, e dentre eles destacamos os “**Requisitos Ambientais**”, que estão associados ao impacto final que os produtos terão sobre o meio ambiente, considerando o processo de fabricação, uso e descarte. Os usuários conscientes não consumirão produtos que degradam o meio ambiente, e sim produtos que possuem características sustentáveis em todo o ciclo de vida.

### ***2.2.2. Life Cycle Design (LCD): o projeto do ciclo de vida do produto***

Uma das principais atividades do desenvolvimento de produto é estruturar o ciclo de vida do produto, considerando todas as fases e processos (MANZINI, VEZZOLI, 2008). Os ciclos de vida dos produtos se dividem em: 1) Biociclos, relacionados ao ciclo de vida de

elementos naturais do planeta, possíveis de retornar ao meio ambiente por meio dos resíduos e sua degradação; e 2) Tecnociclos, referentes aos ciclos de produção, desde as primeiras etapas até o final do ciclo de vida, cujo descarte não permite a reabsorção em função dos materiais artificiais utilizados, desenvolvidos pelos seres humanos (SAMPAIO et al. 2018).

O ciclo de vida do produto engloba todas as etapas de fabricação de um produto, considerando desde a extração da matéria prima até o descarte final, considerando a sistematização do processo, o uso de elementos como energia, até os elementos químicos gerados na decomposição do produto. O ciclo pode ser observado na figura 23 sobre a Roda da Ecoconcepção (KAZAZIAN, 2005).



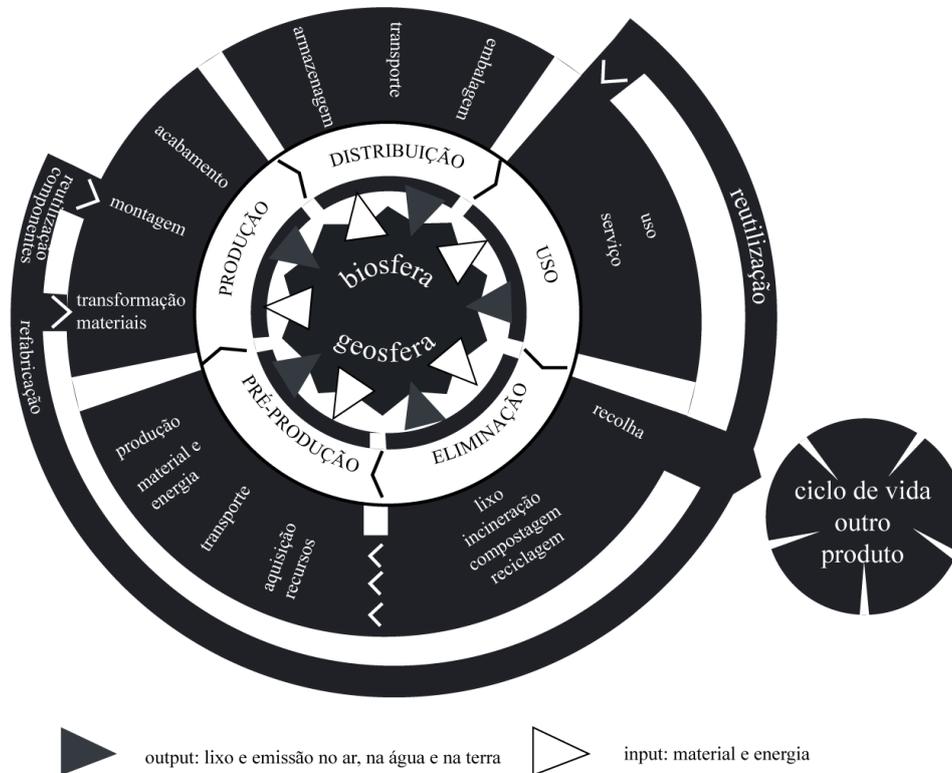
**Fonte:** Manual Promise do PNUMA (1996) e O2 France apud Kazazian, (2005)

Este ciclo pode incluir, ao final, uma nova etapa na qual o produto retorna a empresa fabricante, passando por um processo de transformação dos resíduos em componentes para outro ciclo de produção (SAMPAIO et al. 2018). A **Logística Reversa** abordada pela PNRS menciona parte da ação quando transfere à empresa a responsabilidade pela coleta e o destino final de alguns produtos fabricados. Isso permite que a cadeia produtiva minimize o impacto com resíduos, embora seja fundamental a intervenção no início do processo.

Manzini e Vezzoli (2008, p.91) definem o LCD (Fig. 24) como em “conjunto de atividades e processos, cada um deles absorvendo uma certa quantidade de matéria e de

energia, operando uma série de transformações e liberando emissões de natureza diversa”.

Figura 24: O Ciclo de Vida do sistema-produto



Fonte: Manzini e Vezzoli (2008)

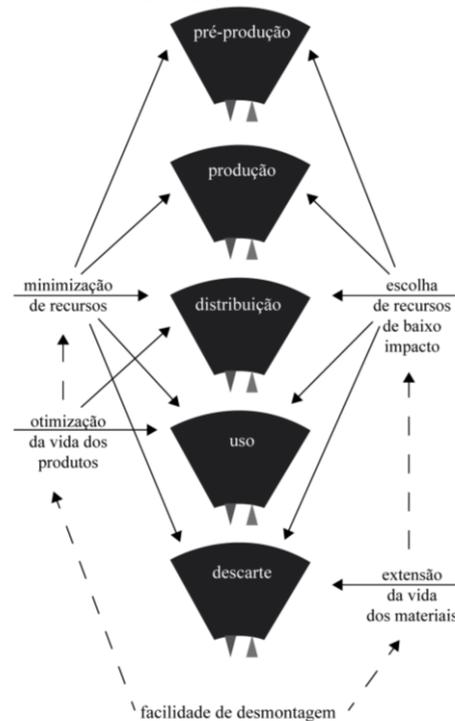
Esse ciclo contempla as seguintes etapas (p.92):

- **Pré-produção:** referente à produção das matérias-primas utilizadas para produzir o produto e inclui: extração dos recursos; transporte para a indústria; e processo de transformação do material extraído em energia e em materiais.
- **Produção:** contempla três principais atividades: transformação dos materiais em peças do produto, montagem e acabamento do produto. Nesta fase também ocorrem: pesquisas, o desenvolvimento do projeto e o planejamento da produção.
- **Distribuição:** estruturada em três atividades principais: embalagem, transporte e armazenamento dos produtos.
- **Uso:** inclui o uso/consumo e o serviço.
- **Descarte:** esta fase inclui: a recuperação de certas peças do produto; utilização do produto para a geração de energia; geração de um novo material proveniente do produto descartado (reciclagem); e descarte final.

Dentre as estratégias de Life Cycle Design (LCD) (Fig. 25) propostas por Manzini e Vezzoli (2008, p.105) destacamos:

- **Minimização dos recursos:** Reduzir o uso de materiais e de energia;
- **Escolha de recursos e processos de baixo impacto ambiental:** Selecionar os materiais, os processos e as fontes energéticas de maior ecocompatibilidade;
- **Otimização da vida dos produtos:** Projetar artefatos que perdurem;
- **Extensão da vida dos materiais:** Projetar em função da valorização (reaplicação) dos materiais descartados;
- **Facilidade de desmontagem:** Projetar em função da facilidade de separação das partes e dos materiais;

**Figura 25:** Estratégias de Life Cycle Design e fases do ciclo de vida



**Fonte:** Manzini e Vezzoli (2008)

É importante analisar as estratégias de projeto sustentáveis escolhidas para um determinado processo, considerando que muitas estratégias juntas podem trazer bons resultados, mas também podem ser conflitantes entre si. Nesse sentido, para determinar de forma eficaz as estratégias a serem adotadas, é necessário entender as especificações do projeto e o sistema (MANZINI, VEZZOLI, 2008).

### **2.2.3. *Life Cycle Assessment (LCA)*<sup>9</sup>: Análise e avaliação do Impacto ambiental dos produtos**

Na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), todas as etapas que compõem cada etapa do ciclo de vida do produto (da extração ao descarte) são avaliadas para se detectar os impactos ambientais do produto e dos processos, podendo-se definir um “*peso ambiental*” em demonstração quantitativa (COLTRO, 2007; LJUNGBERG, 2005; MANZINI, VEZZOLI, 2008).

A partir de cada etapa é possível definir inúmeras sub-etapas do ciclo de vida, como por exemplo: Planejamento do processo de produção, etapa de definição do material e sua compra, a etapa de montagem, dentre outras. Ljungberg (2005) enfatiza sobre as Diretrizes para seleção e design de materiais, e inclui os produtos imateriais como os softwares digitais, por exemplo.

De acordo com Manzini e Vezzoli (2008), a ACV do produto objetiva esquematizar as interações entre fases e o ambiente, buscando definir a complexidade das etapas e os danos ambientais, detectando os impactos no ambiente e buscando soluções para a minimização desses danos. Essa ferramenta de análise possui quatro principais etapas, dentre elas: **definição do objetivo, busca de dados, avaliação** e o **resultado da análise**.

A etapa de “avaliação dos danos ambientais” encontrada na etapa de Avaliação é classificada em quatro estágios, dentre eles: [1] a classificação; [2] a caracterização; [3] a normalização e [4] a avaliação (MANZINI, VEZZOLI, 2008 p.294). A análise é feita a partir da comparação dos resultados obtidos com os objetivos projetuais iniciais, definidos para o processo de projeto (MANZINI, VEZZOLI, 2008). Dentre as questões a serem consideradas, ressalta-se a determinação de materiais com baixo impacto ambiental em todas as etapas do ciclo de vida do produto e o papel final que será exercido pelo produto, considerando a durabilidade, resistência, e outros aspectos que influenciarão na sua função (LJUNGBERG, 2005; SAMPAIO et al. 2018).

Importante lembrar que todo elemento do projeto escolhido (ex. materiais, ferramentas de produção, acabamentos) causa impactos ao meio ambiente durante a fabricação, uso, descarte e pós-descarte (MANZINI, VEZZOLI, 2008). Partindo deste pressuposto, o designer precisa equilibrar suas escolhas, compatibilizando-as de forma a reduzir o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida e, ao mesmo tempo, garantir sua eficiência

---

<sup>9</sup> Life Cycle Assessment: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

e usabilidade. Isso inclui, por exemplo, a previsão de reciclagem ainda nas etapas iniciais, durante a definição dos materiais para o produto (LJUNGBERG, 2005).

Em relação à otimização da vida útil dos produtos, os autores Manzini e Vezzoli (2008) afirmam que estas questões sobre aperfeiçoamento são definidas ainda na etapa de desenvolvimento de projeto, e estão relacionados aos produtos não afetados pela obsolescência programada ou aqueles muito utilizados. Para Cooper (2004 apud SAMPAIO et al. 2018) a preocupação com a otimização está relacionada à diversidade de elementos contidas em várias etapas de projeto e pós fabricação.

#### ***2.2.4. Estratégias para o Projeto Sustentável: Maxwell e Vorts, Ljungberg, Manzini e Vezzoli, e Rozenfeld et al.***

De acordo com Mitchel (2001 apud KOLAREVIC, 2005), há uma grande distinção de comportamento dos profissionais do século XX e no século XXI. Para o autor, o que define um profissional é a capacidade de entrar em situações nas quais consegue lidar com os fatores de riscos envolvidos, buscando uma mudança de paradigma na atitude dos profissionais em geral (KOLAREVIC, 2005).

Para que isso ocorra, é necessário que as etapas de projeto sejam associadas a uma metodologia de desenvolvimento. Atualmente, existem diversas metodologias disponíveis para auxiliar o designer nesse processo. A metodologia tem como ponto-chave fornecer as ferramentas necessárias para o aperfeiçoamento do processo de projeto e está condicionada à complexidade do problema em questão (BURDEK, 1999 apud BARROS, 2011).

Nesse contexto, a ideia de experimentação associa o design à fabricação digital, desde os primeiros estágios, introduzindo não somente teorias, mas também metodologias, conhecimento e ferramentas para estimular o pensar e o fazer, promovendo, além do domínio das ferramentas, também a sua integração (FROGHERI, 2016). A seguir serão apresentados cinco autores e suas metodologias projetuais voltadas ao projetar sustentável, que permitirão a aproximação com as demandas tecnológicas da fabricação digital.

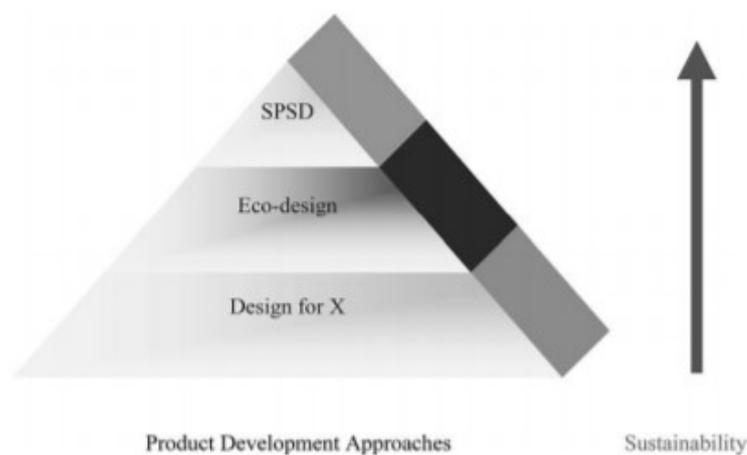
- **Dorothy Maxwell e Rita Van Der Vorst**

O SPSD (Desenvolvimento Sustentável de Produtos e Serviços) possui como essência a produção limpa, em busca da resolução das problemáticas já encontradas no TBL (*Triple*

*Bottom Line*) em todas as etapas do ciclo de vida, formando um novo elemento Tecnologia limpa (CT), associando as abordagens da CT. No geral, esta metodologia busca a transição do produto tangível ao produto intangível com base no desenvolvimento de produtos-serviços (MAXWELL; VORST, 2003).

Alguns exemplos de soluções já aplicadas e consideradas como estudo são: *design ecológico - (re) design ecológico* e o *Design for "x"*, e foram utilizadas como embasamento para estudos e análises para evoluir ainda mais na elaboração dessas diretrizes projetuais sustentáveis (MAXWELL; VORST, 2003) (Fig. 26).

**Figura 26:** A pirâmide de produtos e serviços sustentáveis



**Fonte:** (MAXWELL; VORST, 2003)

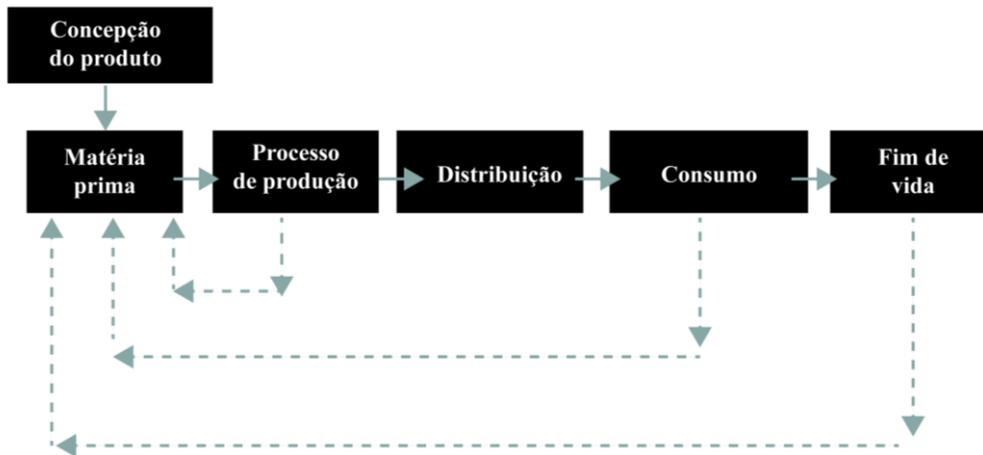
O método busca atender as indústrias de modo eficaz e fornece suporte às mesmas (MAXWELL; VORST, 2003 p.885), considerando alguns aspectos:

- *abordagem em nível estratégico integrada aos modelos existentes, sistemas de sustentabilidade / ambientais e sistemas de desenvolvimento de produtos;*
- *integração e otimização dos critérios TBL com especificações tradicionais de produtos e serviços ao longo de todo o ciclo de vida do produto.*
- *requisito para o produto baseado na funcionalidade e consideração das opções para o sistema produto-serviço.*
- *identificação da cadeia de suprimentos mais eficaz para implementar o SPSD e o gerenciamento mais adequado.*

O SPSD contempla a ACV de cada etapa do produto para otimizar os procedimentos, podendo ser um produto ou um serviço (Fig. 27). Após o primeiro estágio do processo (i.e., definição do produto ou serviço), a próxima etapa visa identificar cada etapa do ciclo de vida de cada ramificação de atividades relacionadas. Um dos passos importantes é

avaliar os impactos ambientais de cada estágio do ciclo de vida do produto (CVP); nesta fase, é possível detectar e eliminar ou minimizar as implicações. O autor utiliza uma lista de verificações das implicações ambientais e sociais (ver anexo 2) (MAXWELL; VORST, 2003).

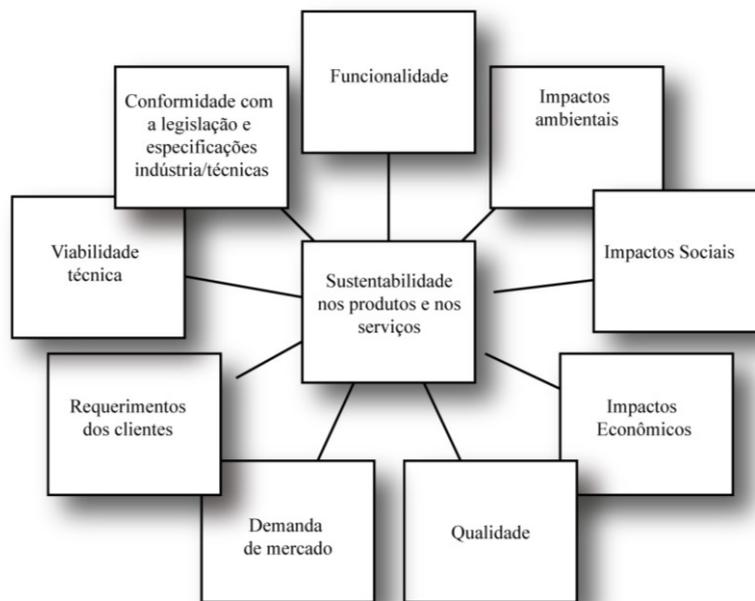
*Figura 27: Etapas do ciclo de vida dos produtos*



Fonte: (MAXWELL; VORST 2003)

Segundo Maxwell e Vorst (2003), para se atingir uma escala significativa de produtos sustentáveis, é necessário adicionar os critérios sustentáveis como elemento base do produto tradicional. Dentre as estratégias de projeto sugeridas pela autora, durante o processo criativo, estão: funcionalidade, impactos ambientais, sociais e econômicos, demanda de mercado, demandas dos consumidores, viabilidade técnica, atendimento às legislações e especificações técnicas (Fig. 28).

**Figura 28:** Critérios para otimizar a sustentabilidade nos produtos e serviços



**Fonte:** (MAXWELL; VORST, 2003)

Outro aspecto relevante a ser considerado é o monitoramento e análise das etapas de projeto, estágio no qual é possível resolver questões que podem minimizar dos impactos do produto ao meio ambiente (MAXWELL; VORST, 2003).

- **Lennart Y. Ljungberg**

Embora não apresente um método específico para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, a autora discorre sobre alguns métodos já consolidados de design para a sustentabilidade em escala de produto e sobre o processo de criação dos produtos, dando ênfase às escolhas dos materiais e seus impactos no meio ambiente. Destaca que não se pode desenvolver um produto 100% sustentável; porém, é possível minimizar os danos ambientais: a substituição do material em um determinado produto geralmente muda o design (resultado estético, forma, textura, por exemplo), mas com o objetivo principal de otimizar as características ou os métodos de fabricação de um produto (LJUNGBERG, 2005 p. 774).

Ljungberg (2005) também aborda o *Triple Bottom Line* (TBL), reforçando a importância do equilíbrio entre as questões sociais, ambientais e econômicas, no desenvolvimento de produto, bem como do ACV como importante estratégia sustentável no processo. Para a autora, uma das estratégias para minimizar a produção de lixo é desmaterializar do produto. E, como estratégia de projeto, a etapa de seleção dos materiais deve partir do princípio de otimização em relação aos aspectos: Métodos de produção, Função e

demandas estruturais, Demandas do mercado ou do usuário, Projeto, Preço, Impacto ambiental e Tempo de vida.

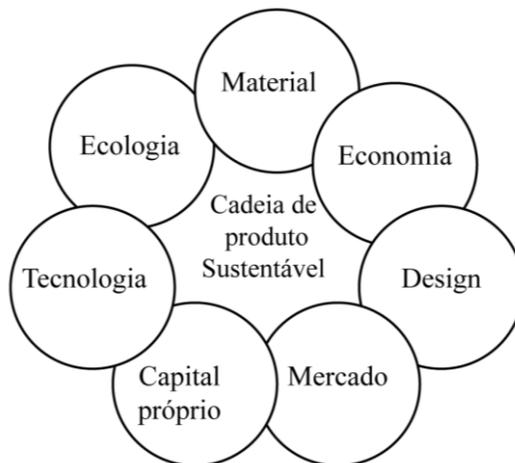
A autora também lista algumas estratégias já consolidadas para o desenvolvimento de produtos sustentáveis (LJUNGBERG, 2005 p.475):

- **Eco-design/Design for the Environment (DfE)**
- **Design modular:** Fácil reparo e a troca de componentes
- **Projeto para substituição de materiais:** Substituição de materiais com alto impacto ambiental por impactos menores
- **Projeto de redução de resíduos:** Redução tanto no produto quanto na embalagem
- **Projeto para desmontagem (Design for disassembly -DfDA):** Facilidade para desmontar
- **Projeto para reciclagem (Design for recycling -DfR):** capacidade de reciclagem máxima e em um alto conteúdo de material reciclado no produto.
- **Design para descartabilidade:** planejar que peças/materiais não recicláveis podem ser descartados de forma ecológica
- **Design para reutilização:** reutilização de diferentes componentes em um produto
- **Projeto para redução de substâncias indesejáveis**
- **Projeto para recuperação de energia:** queima de materiais com um mínimo de emissões tóxicas ou prejudiciais.
- **Projeto para extensão de vida:** A redução do desperdício por meio da vida útil prolongada.

Para a autora, o processo de concepção de produtos possui três principais fases, dentre elas: 1) a fase do conceito do que será desenvolvido; 2) a estruturação de todo o ciclo de vida do produto e sua análise quantitativa relacionada ao meio ambiente e; 3) a avaliação de cada etapa desse ciclo e sua etapa de realização em busca de minimizar o máximo dos danos ambientais durante o ciclo de vida do produto (LJUNGBERG, 2005).

Na fase conceitual, umas das estratégias para determinar o melhor material para um determinado produto é comparar com os diferentes materiais e seus processos de fabricação. Além dessa estratégia, Ljungberg (2005) lista âmbitos importantes a serem considerados durante o processo de projeto sustentável, sendo: material, economia, design, mercado, equidade, tecnologia, ecologia (Fig.29).

*Figura 29: Cadeia de produção sustentável*



Fonte: (LJUNGBERG, 2005)

- **Henrique Rozenfeld et al.**

Rozenfeld et al., (2006) discute o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) orientado à gestão empresarial que contempla o planejamento de produto desde o seu desenvolvimento até a implementação no mercado, e também sua avaliação pós lançamento e uso. Esse processo dá ênfase, principalmente, à competitividade da indústria.

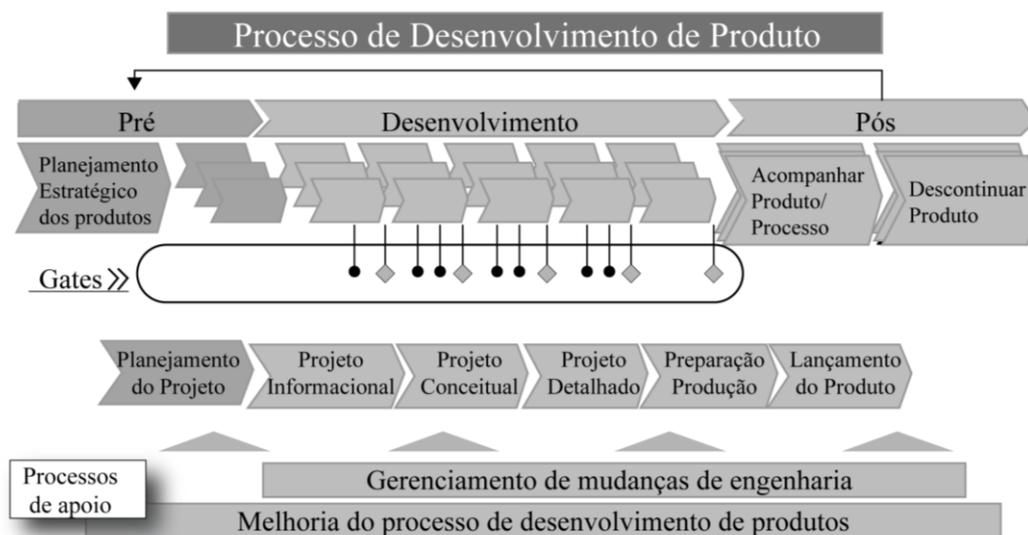
Segundo o autor, é necessário considerar as manufaturas locais, buscando avanços tecnológicos que permitam a aplicação do PDP. Destaca questões relacionadas ao processo de projeto, tais como: detalhamento do projeto, planejamento dos processos de projeto e de manufatura, entre outras etapas. Considerando a grande entrada e saída de informações diversas e complexas, a definição das características principais do produto e sua manufatura ocorrem nas primeiras fases do PDP, determinando os materiais e as tecnologias que serão usadas, a escolha dos processos de fabricação, entre outras definições (ROZENFELD et al., 2006).

De forma geral, o PDP contempla as seguintes etapas: Projetar; Construir; Testar e Otimizar, e que trabalham de forma iterativa. Nesse processo, estruturado pelas etapas de desenvolvimento do produto, o autor enfatiza as inter-relações das atividades que, visualizadas de forma sistêmica, auxilia na compreensão e na definição/gerenciamento de ações empresariais, a partir da comunicação entre áreas diversas (ROZENFELD et al., 2006).

O PDP contempla desde etapas teóricas e práticas, de forma interdisciplinar e complementar (engenharia de produção, marketing, design, manufatura, distribuição, etc.), até as decisões em conjunto. O mapeamento ainda na etapa de desenvolvimento do produto auxilia na visualização de problemas e na busca de soluções, tanto na gestão estratégica quanto na gestão operacional. Nas fases de fabricação e consumo, as experiências dos processos são analisadas e registradas, com intuito de otimizar o produto pós lançado. As etapas de avaliação contemplam o estudo o mercado, atendimento dos clientes, suporte técnico, pesquisas de tendências, estruturação do sistema de distribuição, entre outros (ROZENFELD et al., 2006).<sup>10</sup>

Para implementar o PDP, é necessário que todos os participantes do processo de produto estejam cientes sobre a metodologia. Segundo Rozenfeld et al., (2006), esse modelo de referência é específico para a indústria capitalista de produção de bens de consumo, no qual a estrutura se dá pelas fases: Pré-desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós desenvolvimento. A fase de desenvolvimento está associada às questões tecnológicas constituintes no processo de manufatura e no próprio produto. Portanto, as atividades a serem realizadas dependem dessas tecnologias classificadas para o processo (Fig. 30).

*Figura 30: Visão geral do modelo de referência*



**Fonte:** Rozenfeld et al., (2006)

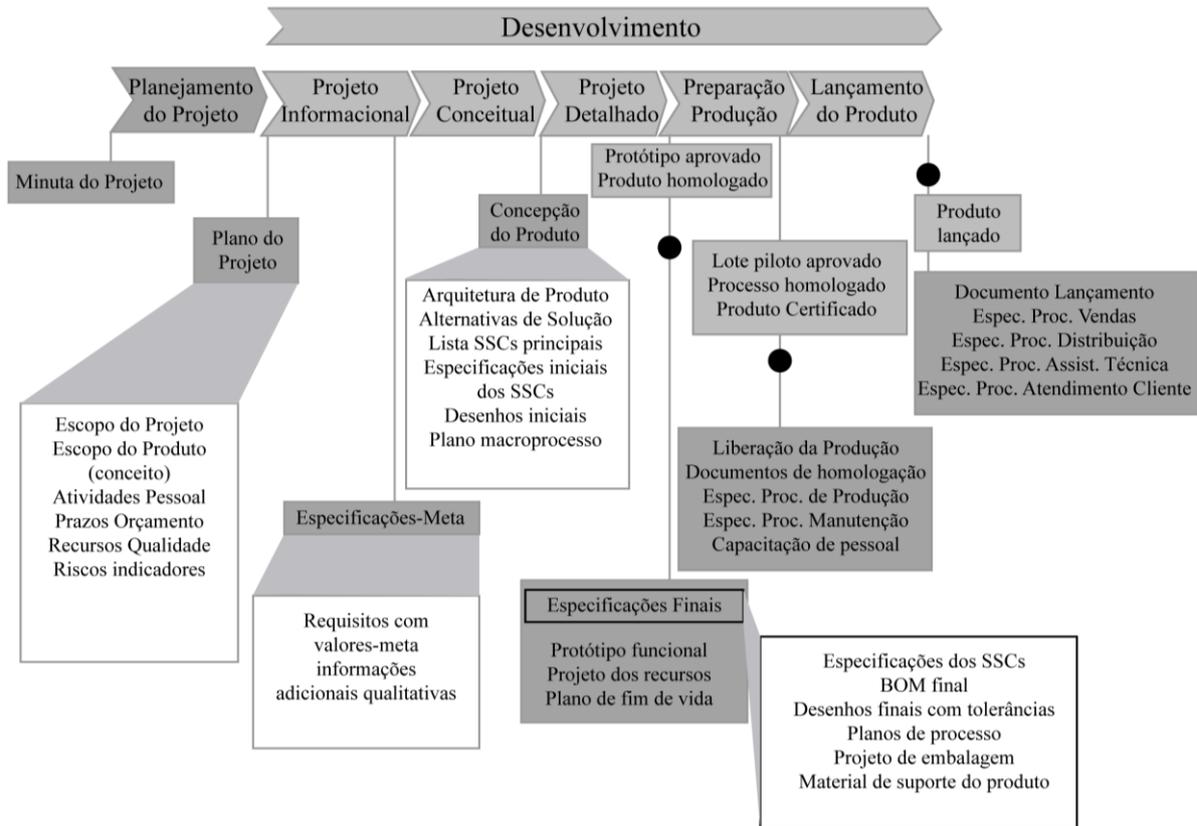
<sup>10</sup> O autor aborda várias metodologias já consolidadas que auxiliam as etapas de processo de projeto, tais como: Desenvolvimento Lean, as abordagens do Design For Six Sigma (DFSS), o Desenvolvimento Integrado de Produtos, a Capability Maturity Model Integration (CMMI), a abordagem sobre o Ciclo de vida dos produtos, dentre outras. Ressalta-se aqui que essas ferramentas também podem se unir às ferramentas digitais disponíveis, como CAD 3D.

Cada fase produz um compilado de resultados, que permanecem paralisados até a etapa seguinte onde são determinadas quais soluções serão escolhidas para a etapa de detalhamento. A análise do resultado é uma etapa importante para antever problemas e buscar soluções, agregando experiências de projeto para a empresa. Essa análise é fundamentada por: uma análise precisa, os resultados, o ponto em que o projeto está, os elementos inicialmente desejáveis e os novos que surgirem, e os impactos causados pelo resultado obtido (Fig. 31) (ROZENFELD et al., 2006).

Na fase de **Desenvolvimento**, são realizadas cinco (5) etapas:

- O **Projeto informacional** é responsável pela geração das *Especificações-meta* do produto que será desenvolvido (elementos desejáveis de produto ao final do processo), a partir de informações da primeira fase **Planejamento Projeto**;
- **Projeto conceitual**, que busca desenvolver soluções e seus detalhamentos, com base nas especificações-meta;
- O **Projeto Detalhado**, quando ocorre uma análise mais minuciosa das soluções potenciais, gerando as *Especificações Finais*, contendo o detalhamento de cada fase e determinando a manufatura de cada uma. Aqui são elaborados os requisitos de *Protótipo Funcional*, *Projeto dos recursos* (dispositivos e as ferramentas de projeto) e o *Plano de fim de vida*, relacionado a etapa final do ciclo de vida do produto (i.e., descarte, ao reuso, a reciclagem);
- **Produção do lote piloto** (primeiras peças fabricadas e já analisadas), o deferimento da produção;
- **Lançamento no mercado.**

**Figura 31: Principais resultados das fases**



Fonte: Rozenfeld et al., (2006)

A fase de Pós-desenvolvimento está relacionada ao afastamento/retirada do produto no mercado, para a realização da análise de todo o ciclo de vida do produto, registrando todas as informações adquiridas, e coletando *feedbacks* para a otimização futura do mesmo (ROZENFELD et al., 2006).

- **Ezio Manzini e Carlo Vezzoli**

Dentre as palavras-chaves abordadas pelos autores para garantir a sustentabilidade futura estão: *Desmaterialização dos produtos; Ecologia industrial; Convívio; Multipolaridade e Friendliness*. No contexto da produção sustentável, Manzini e Vezzoli (2008) destacam que os projetistas devem contribuir com o desenvolvimento de oportunidades de soluções em relação aos problemas existentes e buscar um cenário social, econômico e ambiental equilibrado com novas perspectivas. Dessa forma, contribuirão para projetar uma nova cultura de bens e consumo e de estilos de vida, promovendo a participação do usuário em seu processo de projeto e buscando a extensão da responsabilidade dos processos de produção e consumo.

“Dentro desse espírito, para o projetista, a possibilidade de reorientar os sistemas de produção e de consumo requer a existência de valores positivos e

de critérios de qualidade para colocar na base da nova geração de produtos e de serviços” (MANZINI, VEZZOLI, 2008 p.72).

Como estratégia de projeto sustentável principal, os autores utilizam o **ciclo de vida do sistema-produto** como base para a aplicação das diretrizes projetuais.

“E isso é oportuno porque é muito mais eficaz agir preventivamente, já no projeto, do que buscar soluções, de recuperação ou paliativas, para os danos já causados (soluções end-of-pipe)” (MANZINI, VEZZOLI, 2008 p.99).

Agindo de forma ética ambiental desde o início do processo de desenvolvimento do produto, os designers contribuem para minimizar os impactos ambientais e também para reduzir os custos da produção. Dentre as diretrizes sustentáveis abordadas estão:

- **Minimizar recursos:** considera a minimização dos materiais durante a produção, pré-produção, distribuição e uso, mas principalmente nas etapas de desenvolvimento de projeto e sua gestão. Essa redução contribui para minimizar os impactos ambientais, o impacto do transporte, a geração de energias, entre outros.  
**principal estratégia: *minimizar*:** 1) o conteúdo material de um produto; 2) perdas e refugos; 3) a energia necessária para a produção do produto; 4) o consumo de recursos no desenvolvimento dos produtos; 5) o uso de recursos na distribuição; e 6) o consumo de recursos durante o uso.
- **Escolher Recursos e Processos de Baixo Impacto Ambiental:** pressupõe a escolha adequada de materiais não tóxicos e processos menos poluentes, em todas as etapas de desenvolvimento do produto, tendo em visto o ciclo completo do sistema-produto;  
**principal estratégia: *selecionar*:** 1) materiais, processos e recursos energéticos de baixo impacto.
- **Otimizar a Vida dos Produtos:** considera o aumento da durabilidade do produto e/ou componentes e a intensificação de seu uso.  
**principais estratégias: *projetar*:** 1) a durabilidade adequada e a confiabilidade; ***facilitar*:** 2) a atualização e a adaptabilidade; 3) a manutenção, o reparo, e a reutilização; 4) a refabricação; e 5) intensificar o uso.
- **Estender vida dos materiais:** pressupõe o uso dos resíduos como novo material, derivado do primeiro. Demanda análise de viabilidade do impacto e custo dos processos.  
**principais estratégias: *adotar*:** 1) a reciclagem em efeito cascata; ***escolher*:** 2) materiais com tecnologias de reciclagem eficientes; 3) identificar os materiais; e 4) minimizar o número de materiais incompatíveis entre si; ***facilitar*:** 5) a coleta e o

transporte após o uso; 6) a separação dos materiais incompatíveis entre si; 7) a limpeza; 8) a combustão; e 9) a compostagem.

- **Facilitar a desmontagem:** significa conceber e projetar produtos tendo em vista os procedimentos necessários para facilitar a sua desmontagem.

**principais estratégias:** relacionadas ao produto, componente ou material: 1) minimizar e facilitar as operações de desmontagem e separação; 2) usar sistemas de junção removíveis; 3) facilitar a extração em sistemas de junção permanente; 4) prever tecnologias e equipamentos específicos para a desmontagem. Em casos de separação parcial ou total dos materiais através da trituração, **utilizar:** 1) materiais facilmente separáveis após a sua trituração; 2) insertos metálicos facilmente separáveis antes da trituração dos materiais.

### 2.2.5. *Análise comparativa das metodologias de projeto apresentadas*

Para a análise, foi desenvolvida uma tabela comparativa entre metodologias com o objetivo de definir quais estratégias de projeto sustentável foram mais abordadas pelos autores, e quais não tiveram muita ênfase, e demonstrar a frequência/aprofundamento de cada tópico em relação a cada pesquisador. Ademais, esse estudo teve como intenção detectar quais diretrizes se intercalam, mesmo sendo de autores distintos com abordagens semelhantes, e buscar apontar quais diretrizes que importantes que não foram mencionadas.

A partir da tabela síntese (01), é possível observar que os autores Maxwell e Vorst (2003), Ljungberg (2005), Rozenfeld et al., (2006) e Manzini e Vezzoli (2008) apresentam muitas semelhanças entre os aspectos projetuais, visando a uma solução mais sustentável. Porém cada autor deu ênfase a determinados critérios. De forma geral, os autores abordam o processo de produto já na era industrial, quase todos com ênfase na sustentabilidade e também visando à gestão empresarial competitiva, com foco nos lucros, no mercado e em seu público-alvo.

*Tabela 1: Comparação entre metodologias/métodos*

AUTORES / Aspectos Analisados	Maxwell e Vorst (2003)	Ljungberg (2005)	Rozenfeld et al., (2006)	Manzini e Vezzoli (2008)
Metodologia Específica	SPSD	Não indica metodologia	PDP contexto industrial	Desenvolvimento de produtos sustentáveis
Foco Da Sustentabilidade:	- produção - produto-serviço	- produto	- processo de produção	- produção limpa - produto-serviço

produção / produto / produto+serviço				
<b>Ênfase:</b> materiais / projeto / produção / tecnologias / gestão / usuário / outro	- produção - gestão	- materiais de menor impacto - necessidade do usuário	- gestão - público alvo - mercado - qualidade/custo - manufaturas locais	- projeto - produção - produto-serviço - materiais - ciclo de vida - projeto
<b>Ciclo de Vida:</b> LCD / LCA	LCD e LCA	LCD	LCD e LCA	LCD e LCA
<b>Estratégias Específicas:</b> - refinamento do projeto - processos de baixo impacto - otimização do uso de materiais - reuso e/ou reaproveitamento e/ou reciclagem - avaliação pós-uso - gestão - outras	- gestão - produção Limpa - monitoramento e análise das etapas de projeto	- uso dos programas computacionais - desmaterialização dos produtos - design multifuncional - inserção de marketing e tecnologias na gestão empresarial - previsão de etapa de destinação dos resíduos	- avaliação pós- uso - capacitação para a gestão - visualização sistêmica -interdisciplinaridade - feedbacks - estudo de mercado - iteração entre manufatura, economia e gestão. - análise de resultados por etapa - plano de fim de vida	- ecologia Industrial - participação do usuário no projeto - minimização de recursos - processos de baixo impacto ambiental - otimização da vida útil dos produtos - extensão da vida dos materiais - facilitar a desmontagem - plano de fim de vida
<b>Âmbitos Considerados:</b> social / econômico / ambiental / tecnológico / cultural / outro	Econômico, social e ambiental	Econômico, social e ambiental	Econômico, social e ambiental	Econômico, social e ambiental Importância das tecnologias
<b>Menção quanto à importância das ferramentas digitais</b>	não menciona	- estudos e pesquisas de ferramentas computacionais - novos métodos de fabricação, materiais e ferramentas digitais	- avanço tecnológico de manufatura - uso das ferramentas digitais CAD 3D - simulação digital e de ferramentas digitais	- ferramentas digitais auxiliaadoras

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Maxwell e Vorst (2003) e Rozenfeld et al., (2006) deram maior ênfase no aspecto empresarial aplicado às diretrizes projetuais; porém, também demonstram que, mesmo atendendo aos cenários de produção voltados ao modelo capitalista, tais diretrizes promovem ganhos ambientais. Ao discorrer sobre o processo de produto sustentável, Ljungberg (2005) destaca a importância da escolha dos materiais de forma ética e sustentável, no qual é necessário analisar os materiais e seus impactos ambientais simultaneamente.

Questões como o projeto do Ciclo de Vida dos Produtos e a Análise do Ciclo de Vida foram abordadas por todos os autores e, mesmo com interpretações diferentes, todos discutem essas diretrizes nos âmbitos econômicos, sociais e ambientais (TBL), associados

à importância de se avaliar o impacto de cada etapa do processo de projeto. Destaque também na busca pela necessidade da visão sistêmica, dos auxílios tecnológicos como aliados aos processos de otimização e todos decorrendo em relação ao cenário industrial. Importante ressaltar que nenhum autor faz menção da aplicação destas diretrizes dentro do cenário da fabricação digital.

A minimização dos danos ambientais abordada pelos autores contempla diversas estratégias, tais como: escolha dos materiais de baixo impacto ambiental, otimização do produto final, extensão da vida útil dos mesmos. Porém, observou-se que nenhuma das diretrizes está relacionada diretamente com a minimização dos resíduos utilizando um planejamento de corte adequado.

Um aspecto de extrema relevância observado no estudo e análise das metodologias é que todas relacionam a minimização do impacto ambiental ao início do processo de criação, ou seja, é necessário aplicar o máximo das estratégias ainda nas etapas iniciais para evitar a geração de problemas. Isso significa que, antes de pensar em reciclar, é necessário buscar a não geração de resíduos.

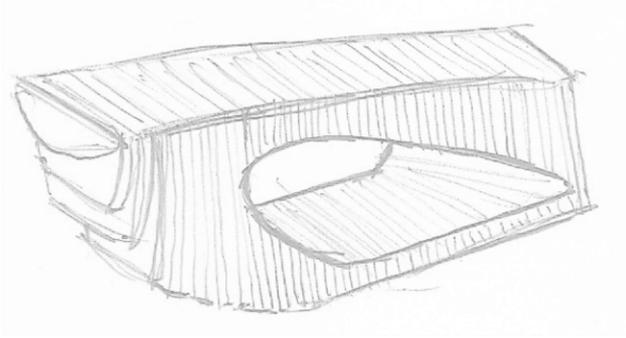
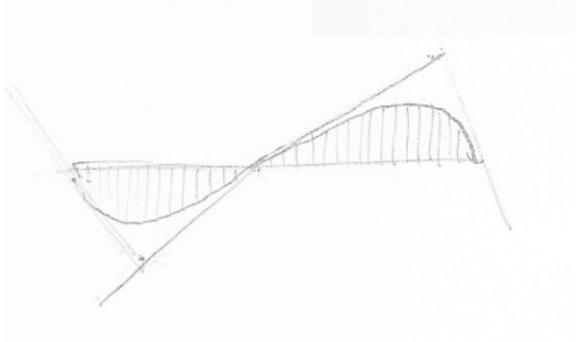
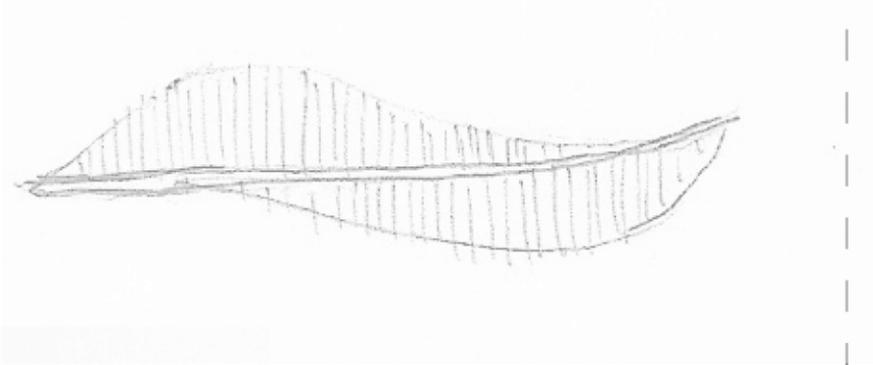
Interessante ressaltar que apenas o autor Rozenfeld et al., (2006) discute a etapa de pós-produção, destacando a importância de uma análise dos produtos após seu uso, em busca de feedbacks e análises para a otimização do produto. A visão sistêmica também foi mencionada pelo autor, que destaca a iteratividade dos processos produtivos e da gestão.

Ljungberg (2005), ao discorrer sobre o processo de produto sustentável, destaca a importância da escolha dos materiais de forma ética e sustentável, no qual é necessário analisar os materiais e seus impactos ambientais simultaneamente.

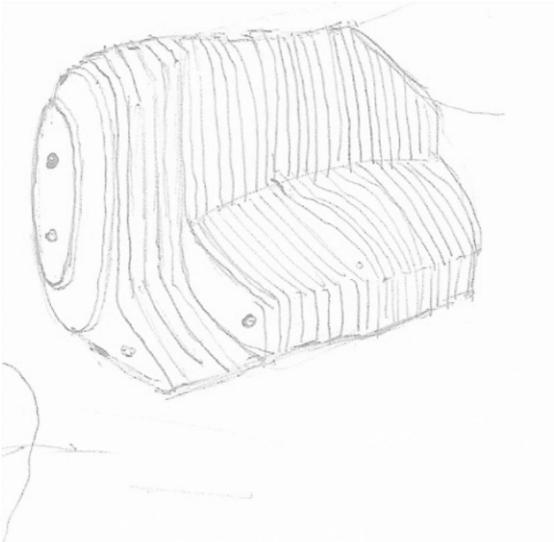
É fundamental que o projetista evolua suas habilidades e conhecimento para lidar com as tecnologias digitais, conforme citado por Ljungberg (2005), Rozenfeld et al., (2006), e Manzini e Vezzoli (2008), além de utilizar as ferramentas digitais como auxílio aos processos criativos.

Por fim, observou-se que várias estratégias são derivadas uma das outras, de forma evolutiva, com propósito de minimizar quase a totalidade dos impactos ambientais. Essas diretrizes sustentáveis já consolidadas devem continuar progredindo junto às novas tecnologias de projeto e produção, para assim serem utilizadas continuamente e buscando um maior significado e eficiência dos processos.

A partir da análise foi possível perceber a necessidade da evolução das ferramentas de projetos junto aos novos processos de desenvolvimento e fabricações digitais. Ademais, essa readequação metodológica não descarta os estudos anteriores, e sim busca avançar na discussão, contribuindo para a inclusão de diretrizes para o projeto sustentável com ênfase no cenário da fabricação digital e os novos softwares de projeto.



## Capítulo 3



### 3 EXPERIMENTO

Este capítulo discorre sobre a investigação da interferência dos softwares digitais projetuais no processo de desenvolvimento de projetos com geometrias complexas de pequena e média escala visando à sustentabilidade das soluções.

Esta etapa de pesquisa qualitativa experimental busca como resultante um encadeamento de causa e efeito, ocorrendo por manipulação direta de variáveis (WACKER, 1998). Nesse contexto, a autora Linda Groat e Wang (2013), definem cinco pontos principais que discriminam uma pesquisa experimental:

Resumidamente, as características definidoras de um projeto de pesquisa experimental incluem: o uso de um tratamento ou variável independente; a medição do resultado, ou variáveis dependentes; uma unidade de atribuição clara (para o tratamento); o uso de um grupo de comparação (ou controle); e um foco em causalidade (GROAT e WANG, 2013 p.316).

Para melhor compreensão sobre o desenvolvimento do experimento, e baseados em Groat e Wang (2013), esses pontos são apresentados a seguir:

- **O uso de um tratamento ou variáveis independentes:** As variáveis independentes se referem aos processos que serão controlados e manipulados pelos pesquisadores, sendo que o tratamento é a intervenção a que as amostras (ou objeto de estudo) serão submetidas.

No contexto desta pesquisa, o **tratamento** deverá ocorrer pelos pontos de similaridades nas etapas de Modelagem digital do objeto de estudo no RhinoCeros e do Uso do *plug-in* paramétrico Grasshopper e do *plug-in*, OpenNest. Ademais, as diretrizes projetuais sustentáveis já consolidadas (Rozenfeld et al., Ljungberg, Manzini e Vezzoli, e Maxwell e Vorst) irão subsidiar as etapas de análises e alterações das opções projetuais. O tratamento será aplicado sobre a amostra utilizada inicialmente para controle (primeiro teste, sem alteração; somente análise).

- **A medição do resultado:** refere-se à medição dos resultados da experiência relacionados a variável dependente, que diz respeito então, ao objeto escolhido para ser submetido ao processo de alteração nas variáveis independentes.

Em relação a esta pesquisa, a variável dependente se refere a amostra escolhida para o estudo.

- **A Designação de uma Unidade de Atribuição:** A unidade de atribuição se refere à qual elemento real a amostra representa; o que interpreta na sociedade, as similaridades da amostra no mundo real.

A amostra definida para o estudo é um objeto físico de pequena escala (ex. banco em painel), com formas complexas em sua estrutura, conforme dimensões definidas pelo projeto.

- **O uso de um grupo de comparação ou controle:** o controle se refere a amostra intacta que não passará pelo processo de tratamento. Essa etapa é necessária para comparar as amostras intactas e as amostras submetidas aos tratamentos.

Referente à pesquisa o controle é a amostra selecionada sem ter sido submetida por nenhum tratamento, passando apenas pelo processo convencional da fabricação (CAD), podendo ser classificada também como “modelo de massa”.

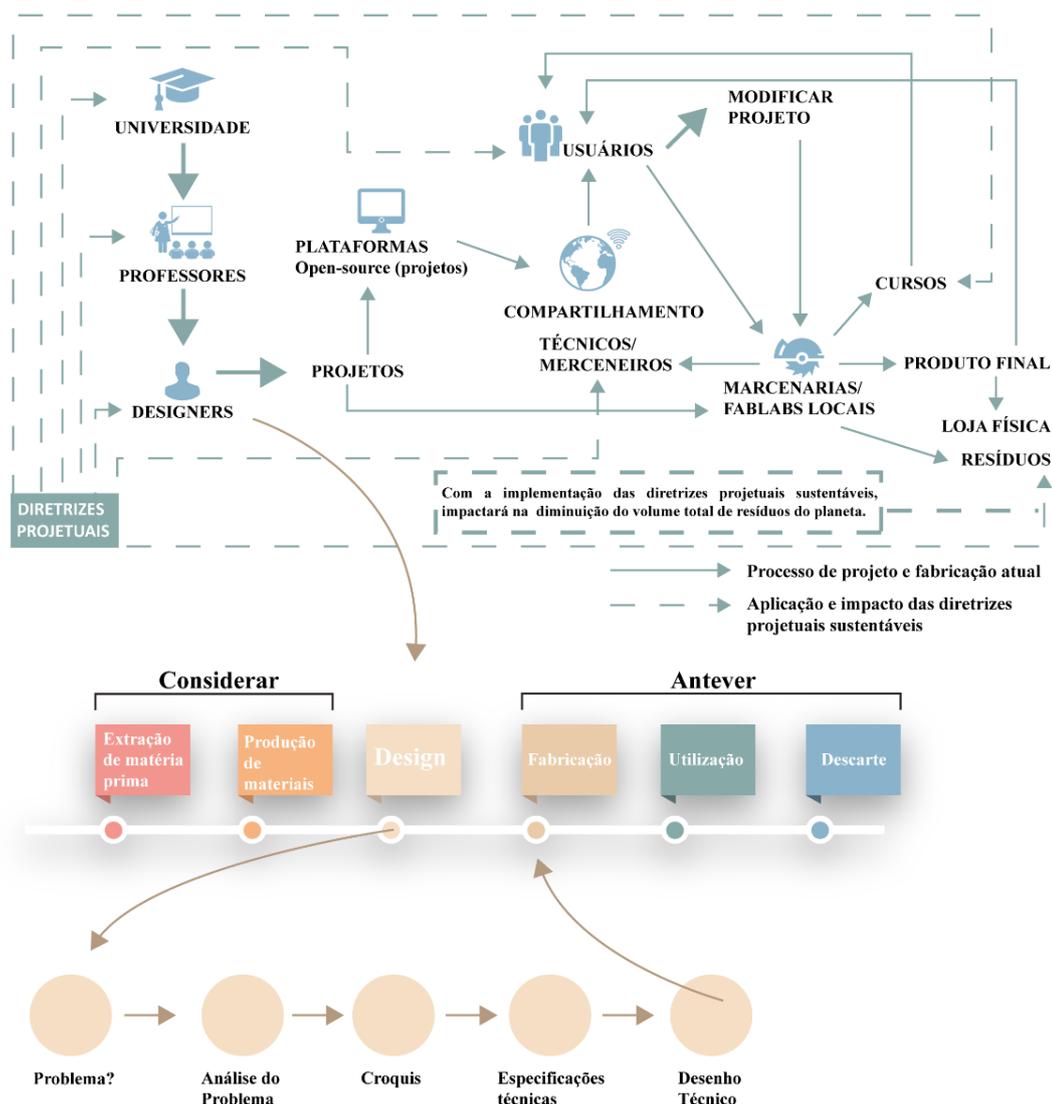
A etapa de controle - amostra - referente ao controle inicialmente passará pela etapa de preparação para a fabricação sem alterar nenhuma característica, sendo essa as amostras sem nenhum procedimento. Posterior uma segunda amostra será submetida a etapa de simulação (fase de tratamento), no qual os resultados desta fase irão ser comparado ao procedimento sem tratamento.

- **Um foco na causalidade:** a definição de todos esses pontos listados acima e a realização do experimento percorrido irá fornecer subsídios aos pesquisadores para traçar a relação de causa e efeito, através da interpretação dos resultados obtidos durante o experimento.

### **3.1. Processo de projeto e da experiência projetual**

O impacto ambiental ocasionado pela fabricação de projetos complexos poderá ser evitado/minimizado se o projetista estiver consciente dos possíveis danos causados pelas escolhas projetuais e capacitado para lidar com a nova lógica durante o desenvolvimento de projetos com geometrias complexas para a nova era digital. Conforme pode ser observado no mapa sistêmico (Fig. 32), é possível perceber as sub etapas existentes quando se propõe a elaboração de um projeto.

Figura 32: Mapa sistêmico com foco no processo produtivo do Designer



Fonte: Elaborado pelo autor

O projetista se encontra, portanto, “no meio do caminho” do ciclo de vida dos produtos e, por isso, é tão importante considerar as etapas de extração de matéria prima e da produção de seus respectivos materiais, antever as etapas de fabricação, utilização e descarte bem como a possibilidade de reuso, a logística reversa, a reciclagem, entre outros.

### 3.1.1. Critérios para a seleção da amostra

Para que seja possível uma comparação entre estratégias projetuais, foram determinados o controle e o tratamento da amostra para fazer o método comparativo (ciência). Partindo deste princípio, a escolha da amostra de estudo foi baseada nos **critérios de seleção da**

**amostra** estruturados a partir do objetivo principal da pesquisa e descritos a seguir. Para tanto, o objeto a ser utilizado como amostra, deverá:

- **Apresentar complexidade formal:** pois a investigação parte do pressuposto da complexidade das formas;
- **Ser passível “fatiamento” da forma:** para possível a realização de um planejamento de corte 2D;
- **Possuir função específica:** foco em produtos que fornece a função de apoio além da estética complexa;
- **Ser de média e pequena escala:** para facilitar permitir uma maior manipulação da amostra;
- **Ser realizado na fabricação subtrativa:** devido a preocupação com os impactos ambientais provenientes da alta produção de resíduos dos processos de manufatura subtrativa;
- **Ser passível de replicação:** pois a preocupação está relacionada, principalmente, aos resíduos provenientes dos processos de fabricação; assim, quanto mais reproduzido for o projeto, maior o volume dos resíduos.

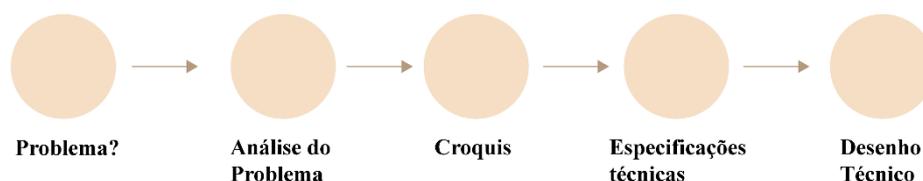
O projeto deverá responder aos critérios mencionados bem como considerar: **diferentes alturas humanas com foco na ergonomia; o uso de derivados de madeira (chapas) e ser um objeto de uso compartilhado.**

Importante lembrar que além da importância da etapa preliminar ao projeto considerando o ciclo de vida do produto, ou seja, a extração da matéria prima e a fabricação dos materiais é também fundamental que os projetistas antevejam as etapas de fabricação, consumo e descarte. Conforme se discute nesse trabalho, entende-se que essas últimas três etapas podem ocorrer por meio do uso dos softwares de projetos digitais durante o processo de projeto minimizando, com isso, o volume do descarte.

#### • **Etapas referentes ao experimento 1**

Para a definição da amostra, foi realizado um processo de desenvolvimento do projeto incluindo as seguintes etapas: [1] Definição do problema; [2] pesquisas e análises de referências projetuais; [3] croquis iniciais; [4] definição do projeto e [5] especificações técnicas, como demonstradas na figura 33.

**Figura 33: Etapas projetuais**

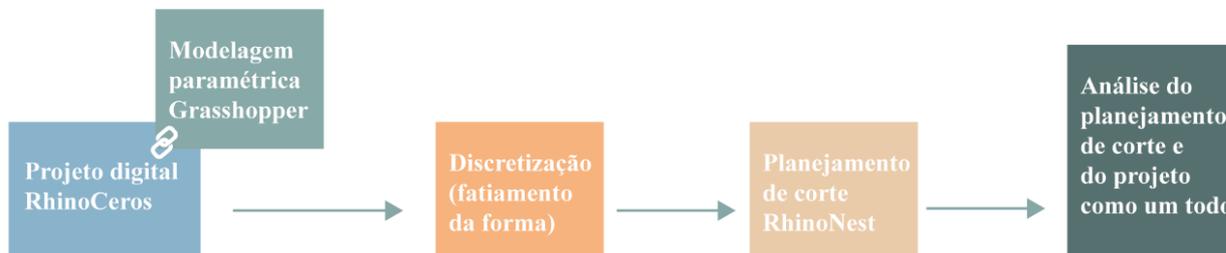


Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência, o estudo do modelo de massa passou pelo processo tradicional de preparação para a etapa de fabricação, que consistiu em três sub etapas, dentre elas: [1] modelagem digital paramétrica da amostra; [2] discretização (fatiamento da forma); [3] realização do planejamento de corte pelo OpenNest, como observado na figura 34. Por último foi realizada a análise dos resultados obtidos, com o intuito de estimar de forma qualitativa o impacto ambiental deste processo de projeto e de fabricação, e definir pontos projetuais a serem alterados na etapa de tratamento.

**Figura 34: Etapas de processo do controle**

### Controle



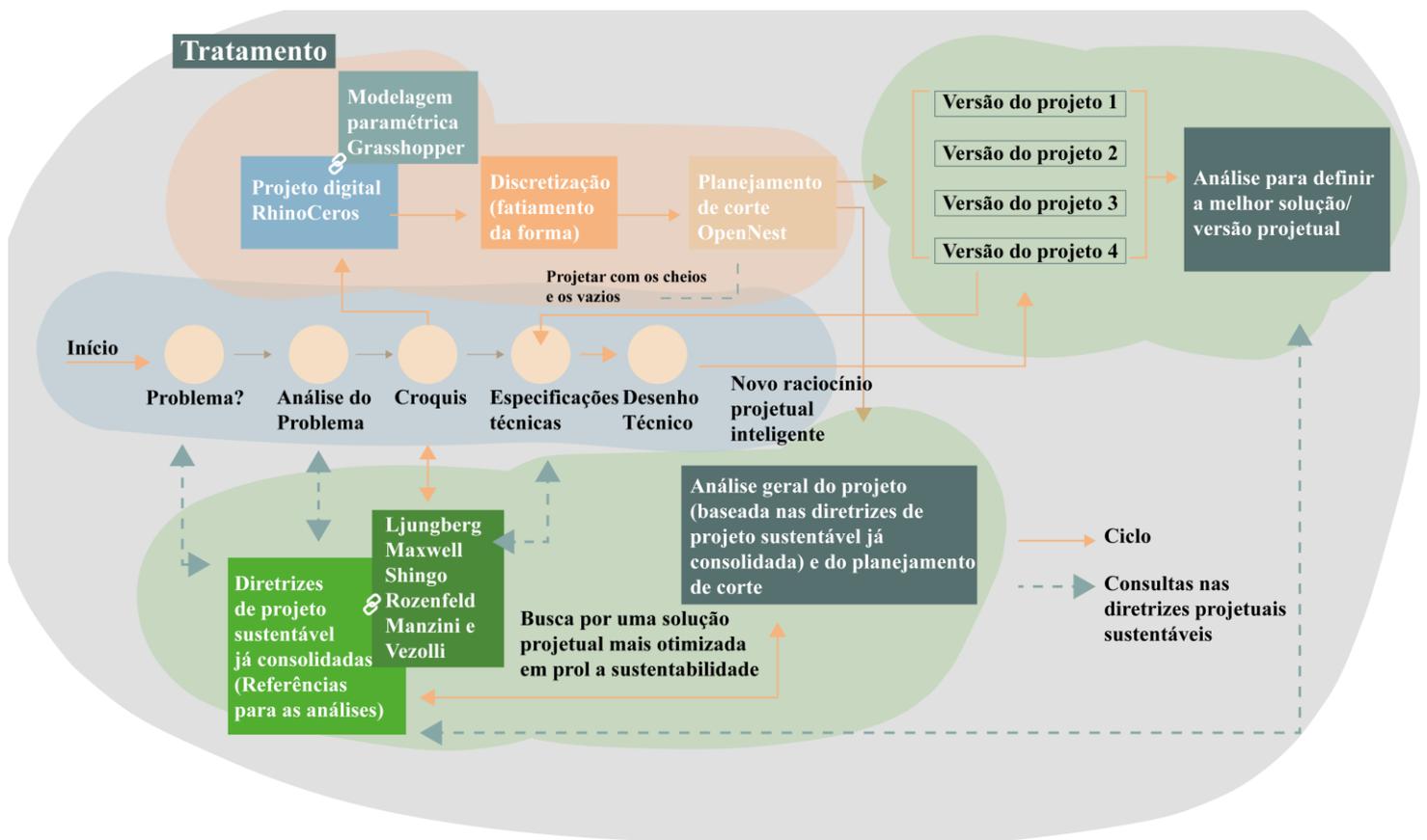
Fonte: Elaborado pelo autor

#### • Etapas referentes ao experimento 2

A segunda etapa da parte experimental (fig. 35) referente ao tratamento foi obtida seguindo o procedimento adotado na etapa de controle; porém, neste caso, a análise ocorreu fundamentada nas diretrizes projetuais sustentáveis já consolidadas, buscando alterações das variáveis não fixas e alterações de parâmetros de projeto (não interferindo na função inicial). Novamente, ocorreu a fase de discretização e do planejamento de corte da nova versão de projeto. Essa etapa foi reproduzida por diferentes vezes gerando variadas versões de projeto, com o intuito de identificar o modelo de projeto mais otimizado referente às questões ambientais.

O ciclo iterativo projetual<sup>11</sup> pode ser entendido por fases (fig. 35). Os elementos encontrados na mancha central azul se referem ao processo de projeto convencional. A parte encontrada na mancha rosa se refere a etapas digitais, e as encontradas nas manchas verdes faz referência às etapas de estudos e análises quanto às diretrizes projetuais já consolidadas.

**Figura 35:** ciclo de projeto iterativo



Fonte: Elaborado pelo autor

O ciclo de projeto iterativo engloba basicamente todo o conjunto de etapas apresentadas na figura 35 segue as setas contínuas (em salmão), enquanto as setas tracejadas (em azul) são relativas às análises baseadas nas diretrizes de projetos sustentáveis. O processo de projeto sustentável se inicia com um problema a ser resolvido. Para identificar o real problema e fazer, posteriormente, sua análise é necessário buscar embasamento projetual e ferramentas de suporte, baseado nos autores, como indicado pela delimitação do quadrado verde.

<sup>11</sup> A determinação pelo uso do software RhinoCeros e os *plug-ins* Grasshopper e OpenNest se deu pela similaridade do pesquisador e por questões de acessibilidade tanto de ensino, quanto de aquisição dos programas.

Na **fase do croqui**, surgem inúmeras propostas de projeto, mas apenas a proposta mais otimizada será modelada tridimensionalmente no Rhinoceros por meio do *plug-in* Grasshopper (modelagem paramétrica). O diferencial da modelagem paramétrica é que o processo é feito através de *inputs* de informações, no qual o projeto tridimensional é gerado simultaneamente na interface do *software* Rhinoceros. Essa modelagem é desenvolvida por meio de parâmetros, com uma sequência das etapas mais concretas de viabilização da forma, e sempre que for necessário alterar o projeto, o projetista realiza a alteração dos parâmetros, dispensando a necessidade da remodelagem.

Desta forma, as alterações projetuais ocorrem em um curto espaço de tempo, possibilitando que o processo de projeto iterativo seja mais veloz. Na **etapa de discretização** ocorre o fatiamento da forma, criando peças 2D (fatias) através do uso de um modelo 3D. Posteriormente, ocorre a **etapa de planejamento de corte** possibilitado pelo uso do *plug-in* OpenNest, na qual todas as peças do projeto são organizadas em um plano que representa as limitações da chapa do material a ser utilizado durante a usinagem. Uma das estratégias desse novo raciocínio projetual é a visualização dos cheios e os vazios do plano de corte, no qual o projetista antevê os resíduos que serão gerados e tem a possibilidade de criar um segundo produto com as futuras sobras ou reorganizar as peças, de forma a reduzir as sobras.

Quando o projeto está pronto para ser fabricado, é necessário que ocorra uma análise do planejamento de corte baseada nas diretrizes projetuais sustentáveis, em busca da identificação dos problemas futuros. Neste sentido, existe a possibilidade da realização de alterações projetuais, por meio de manipulações dos parâmetros de entrada, sem influenciar na funcionalidade do projeto. Novamente é gerada uma nova versão de projeto, que passará pelas etapas de discretização e planejamento de corte que resultará, conseqüentemente, em outra [nova] versão projetual e assim por diante. Essas versões seguirão para a etapa de especificações de materiais e detalhamento técnico. Assim, o projetista consegue obter em um curto espaço de tempo diversas versões de um projeto, e no final é possível identificar a versão de projeto mais otimizada seguindo as diretrizes projetuais sustentáveis.

### **3.2. Desenvolvimento da proposta de projeto**

Como mencionado, o processo de desenvolvimento da proposta de projeto seguiu as etapas de definição do problema, análise do problema/pesquisas até chegar à etapa dos

croquis das propostas. As etapas referentes às especificações técnicas e desenho técnico serão realizadas digitalmente em processo posterior a esse.

A seguir serão apresentados os elementos referentes ao objeto de estudo definido bem como as etapas do processo:

1. **Definição do problema:** *Criação de um mobiliário de uso coletivo, compreendendo uma complexidade formal e respeitando o critério ergonômico.*
2. **Painel Semântico:** a ferramenta de Painel Semântico permite um estudo amplo das variedades de projetos existentes auxiliando, assim, na construção de referências para o processo de projeto dos designers. A palavra-chave para a busca dessas referências foi “Parametric Design”, para explorar projetos com complexidade formal, visando à identificação de meios de fixações, encaixes, variedades de geometrias, materiais, funcionalidades, modos de exposição, diferentes magnitudes de dimensões e níveis de complexidade (figuras 36 e 37).

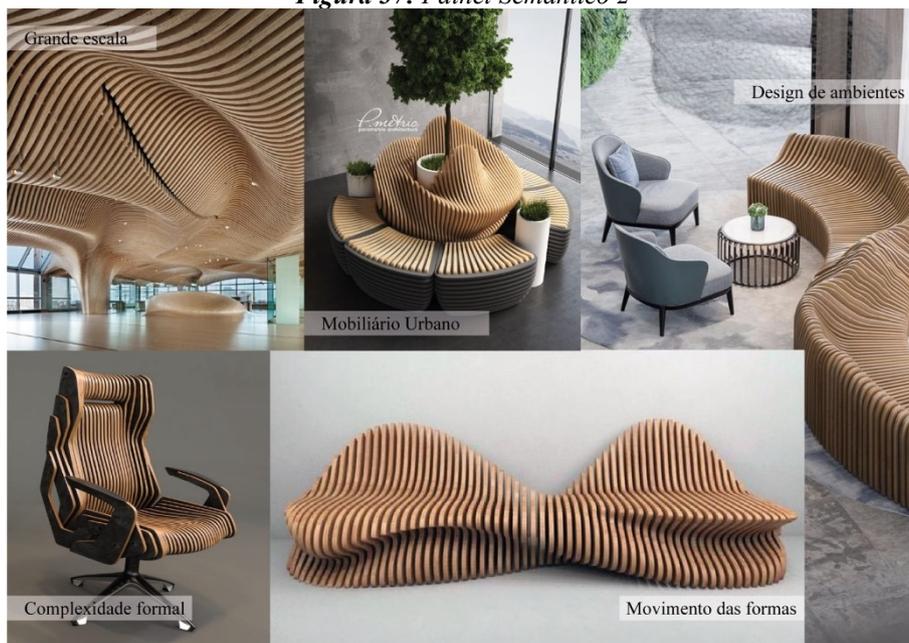
*Figura 36: Painel Semântico 1*



Fonte: Pinterest (2020).

Na sequência, a pesquisa buscou demonstrar a aplicação da estética curva e fatiada (Fig. 38), que utiliza a lógica da replicação de formas complexas, aplicada a diferentes escalas, desde ao mobiliário individual passando pelo mobiliário urbano de uso compartilhado, até a aplicação em projetos arquitetônicos.

**Figura 37: Painel Semântico 2**



Fonte: Pinterest (2020).

A partir das imagens coletadas é possível observar também o uso de formas vazadas e, ainda, que todos os projetos passaram pelo processo “*slicing*” (fatiamento) da forma tridimensional, sendo que vários modelos buscaram a representação de movimentos do desenho do mobiliário. Outro estudo importante e indispensável está relacionado à ergonomia, ou seja, considerar as dimensões e proporções ideais para um banco e as alturas do assento para cada público alvo, de forma a adequar o banco para duas versões de altura de assento e diferentes usos.

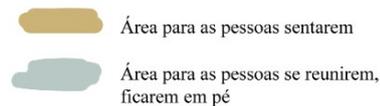
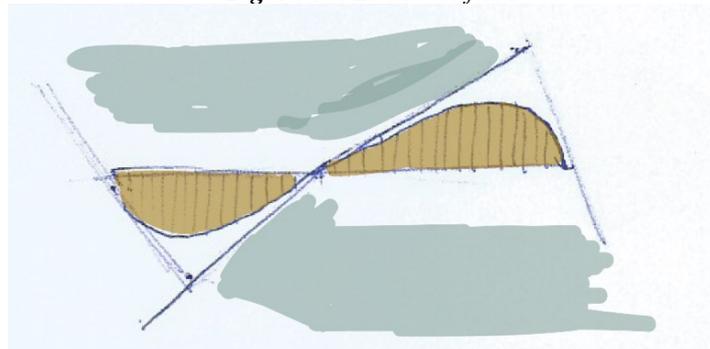
**Figura 38: Painel semântico 3**



Fonte: Pinterest (2020).

3. **Croquis:** O início do desenvolvimento do projeto ocorreu pelo método de croquis à mão (Fig. 39). A proposta foi trabalhar o fluxo e função de ambos os lados (frontal e posterior) do banco, respeitando-se certo distanciamento e considerando a utilização por um grupo de pessoas conhecidas, como em uma “roda de conversa”, por ex., onde a distribuição de pessoas não ocorre de forma paralela.

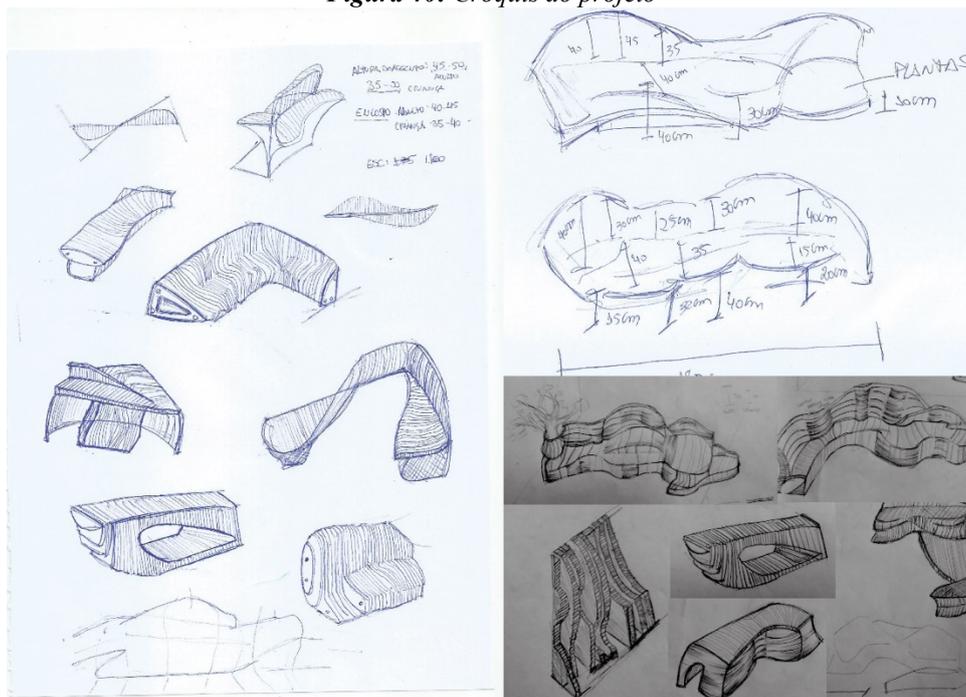
**Figura 39:** Estudo do fluxo



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A partir dessa ideia inicial, foi proposto um assento composto por uma área “vazia” para as pessoas se reunirem em pé, além de promover a acessibilidade (Fig. 40). Ademais, foi trabalhado as alturas dos assentos tanto para crianças (30-35 cm) e quanto para adultos (40-45 cm).

**Figura 40:** Croquis do projeto



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Durante a elaboração dos croquis, constatou-se uma elevada dificuldade relativa à idealização de uma forma tridimensional composta por curvas complexas e, ainda, a necessidade de se contemplar uma usabilidade para a forma. As possibilidades digitais de alcançar as inúmeras variações de forma, de certo modo, vão muito além da imaginação do projetista. Considerando essas questões, e para contribuir para a geração de uma ideia viável, o estudo das formas complexas também ocorreu por meio de modelagem de massa tridimensional<sup>12</sup> (Fig. 41).

**Figura 41:** Estudo/modelagem de massa tridimensional



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Esta etapa experimental contribuiu para a compreensão de três pontos essenciais da pesquisa: [1] conhecimento das formas através de uma modelagem em massa de modelar em busca de proporções, equilíbrio projetual e complexidade formal; [2] fatiamento da forma delineada e [3] organização das peças em um plano em sequência.

A realização desta etapa prática foi relevante, pois auxiliou na definição de formas com geometrias extremamente complexas, além de proporcionar uma simulação de corte semelhante à que ocorre digitalmente. O processo de estudo e modelagem de formas complexas herméticas ampliou ainda mais a percepção do projetista sobre o projeto e a fabricação.

Como conclusão desta etapa chegou-se a um modelo de forma tridimensional (figuras 42 a 45), o qual foi submetido a todas as etapas processuais, abrangendo o fatiamento e o planejamento do plano das peças projetuais.

---

<sup>12</sup> Embora este não tenha sido utilizado durante a modelagem física sugere-se, nessa etapa, o uso de um modelo articulado (em escala para análise de proporção do corpo humano) para facilitar a análise ergonômico do objeto projetado e suas proporções e ajustes necessários.

**Figura 42: Vista Posterior**



**Figura 43: Vista Superior**



**Fonte:** Elaborado pelo autor

**Figura 44: Vista Frontal**



**Fonte:** Elaborado pelo autor

**Figura 45: Vistas Lateral Esquerda e Direita**



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Após esta etapa de estudo da forma, ocorreu o *slicing* (fatiamento paralelo do objeto em 3D) (Fig. 46), o qual sucedeu a separação das peças e organização de forma sequencial (Fig. 47).

**Figura 46:** *Processo Slicing*



**Fonte:** Elaborado pelo autor

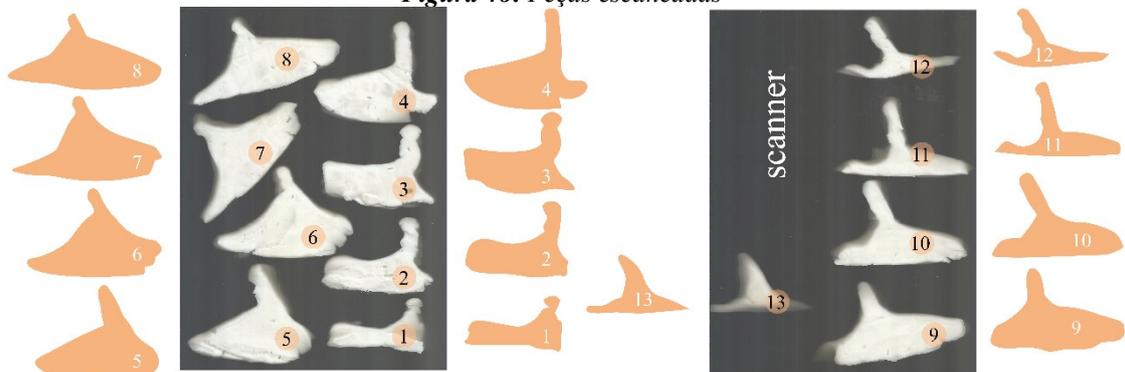
**Figura 47:** *Peças do modelo de massa organizadas na superfície*



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Após essa etapa, todas as peças do projeto foram selecionadas para serem digitalizadas e, assim, iniciar a etapa de modelagem e ensaios digitais nos softwares de modelagem tridimensional RhinoCeros e Grasshopper. Importante ressaltar que as formas foram digitalizadas pelo software CorelDraw (escolhido por ser rápido a dinâmica de curvas) e que possui saída para o arquivo ser aberto no RhinoCeros (Fig. 48) (Apêndice 1).

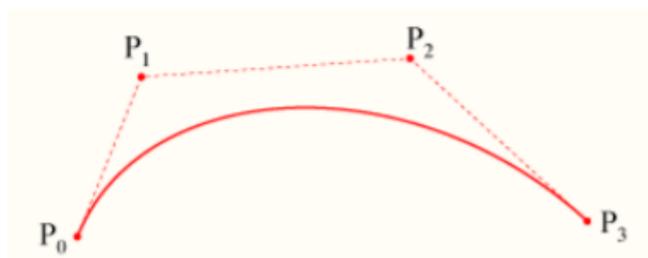
**Figura 48:** *Peças escaneadas*



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A justificativa para a utilização CorelDraw provém dos estudos desenvolvidos por Pierre Étienne Bézier, engenheiro que desenvolveu curvas e superfícies essenciais para a evolução da modelagem, as quais são conhecidas como “curva de Bezier”. Hoje essas ferramentas são consideradas uma subcategoria das NURBS, o que possibilita o desenvolvimento geometrias inimagináveis (ROGERS, 2002; NATIVIDADE, 2010). O software CorelDraw possui a ferramenta “curva Bezier” (ou curva polinomial) que possibilita o trabalho com linhas e curvas posicionando cada nó (representando o ponto) com o mouse. Da maneira que se posiciona cada nó (pontos de controle), eles são conectados por uma linha/curva (Fig. 49).

*Figura 49: Curva Bezier*



Fonte: Natividade (2010)

A ferramenta Bézier viabiliza a criação de formas complexas e irregulares com rapidez e facilidade, sendo encontrada também no software RhinoCeros. Assim, é possível ter o controle preciso sobre a posição e o número de nós que formam uma curva e também a sua rápida alteração (NATIVIDADE, 2010). Ademais, o uso do CorelDraw se tornou uma maneira mais viável economicamente para a etapa de escaneamento das peças, sendo muito utilizado na área gráfica do Design. Nessa pesquisa observa-se que ele também contribui na área de design de produtos.

### **3.3. Experiência 1 – Controle (Planejamento digital de um objeto complexo)**

- **Passo a passo do projeto no RhinoCeros e Grasshopper**

Após a realização das etapas de desenvolvimento do projeto do mobiliário por meio de uma massa de modelar, seguido pelo fatiamento da forma e escaneamento de suas peças (scanner convencional de gráficas), passou-se à etapa de modelagem digital pelo **software RhinoCeros** e o *plug-in* **Grasshopper**. Ambos foram trabalhados de forma simultânea em interfaces paralelas, sendo que as alterações realizadas no Grasshopper se refletiam no RhinoCeros.

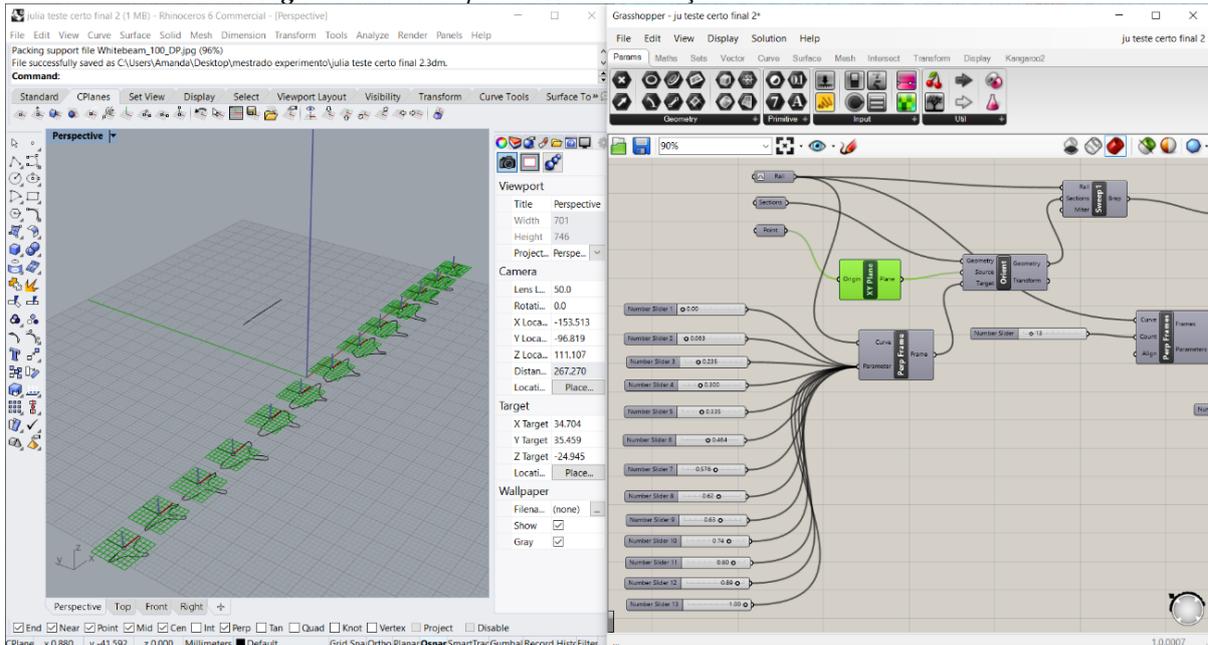
A princípio foi realizada uma reta na vista superior do RhinoCeros, na qual o banco paramétrico foi modelado no segmento da reta, tornando-se o “trilho das formas”. Treze (13) seções chaves foram responsáveis por estruturar o modelo, que se refere às formas escaneadas por uma impressora e vetorizadas pelo software **CorelDraw**. Essas curvas escaneadas foram inseridas no RhinoCeros e, em cada um, foi definido um ponto central para facilitar o comando de movimento da forma para a reta. A quantidade de peças (e conseqüentemente de formas) foi definida pelo processo de fatiamento do modelo artesanal. Entretanto, pode-se utilizar um número maior de elementos. Estas primeiras etapas ocorreram na interface do **RhinoCeros**. Simultaneamente o trabalho de modelagem também aconteceu no software paramétrico **Grasshopper**, o qual utiliza “baterias” que se conectam e alimentam as informações, gerando assim o projeto desejado.

Na interface do Grasshopper, foi utilizada a ferramenta Sweep Tools para produzir a superfície, além do emprego do Rail, o qual foi vinculado à reta desenhada na interface do RhinoCeros. As formas trilharam a reta desenhada, então, neste caso, utilizou-se uma ferramenta de orientação, conhecida como Orient tools, associando também a Sections (que foi alimentada com as formas no RhinoCeros). Essas formas do plano de origem foram encaminhadas para um plano de destino, sendo tal plano inicial definido por XY.

A escolha das formas no Grasshopper ocorre em ordem sequencial, de acordo com o projeto definido na etapa de modelagem artesanal. Assim, o comando Sections é alimentado com a escolha das curvas sequenciais no RhinoCeros. Outra ação que ocorreu no Grasshopper foi o uso do comando Point, que foi alimentado com os pontos centrais marcados anteriormente de cada forma. Cabe ressaltar que os pontos precisam ser selecionados na mesma ordem que as Sections.

O próximo passo foi o emprego do Plano XY que alimentou o comando Orient. A última entrada do comando Orient foi o Target, etapa em que foi necessária a utilização do Perp Frame, perpendicular ao plano curvo. O plano foi inserido perpendicular à reta desenhada no RhinoCeros. Esta seqüência está representada na figura 50.

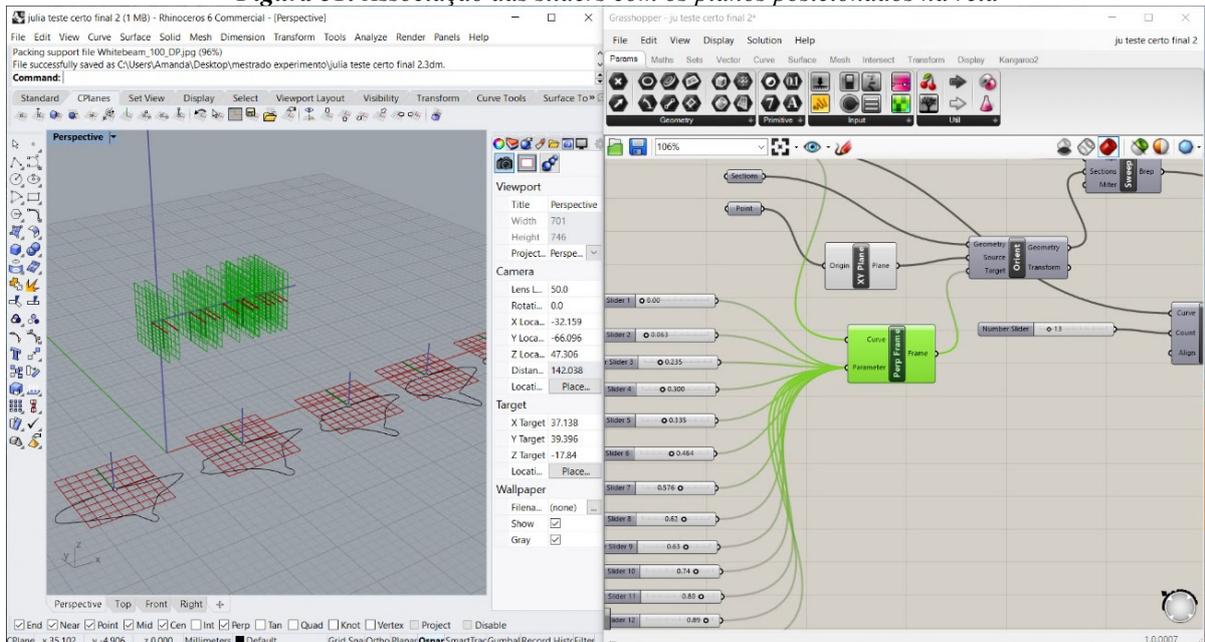
**Figura 50: Uso do plano XY e alimentação do comando Orient**



Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado, na interface do Grasshopper utilizou-se o comando *Perp Frame*; e para produzir resultados, o comando *Rail* foi conectado na entrada “curve” do *Perp Frame*. Para posicionar esses planos, foi empregada uma *Slider* de 0 a 100 vinculada a cada plano e, assim, determinou-se os locais de cada plano na reta, como observado na figura 51. Deve-se observar que cada forma foi associada a um plano e que está correlacionado a uma *Slider*.

**Figura 51: Associação das sliders com os planos posicionados na reta**



Fonte: Elaborado pelo autor

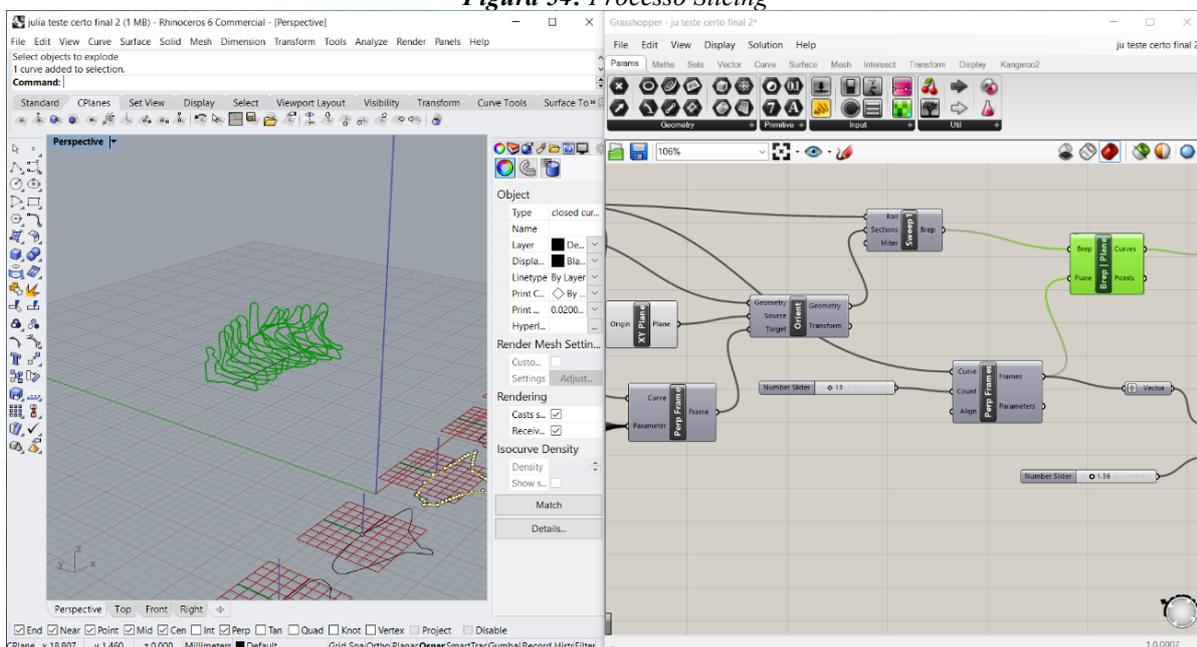
À vista disso, foi possível determinar os pontos de cada plano na reta, e alterá-lo seu posicionamento quando necessário. Esta etapa ocorreu sempre partindo do ponto inicial



Pode-se observar que, quando alteramos as *sliders* (fatias) no Grasshopper, simultaneamente altera-se o posicionamento dos planos com as formas na reta. E quando se alteram os pontos que estruturam as formas, conseguimos uma nova geometria. Até este ponto é possível gerar inúmeras formas complexas meramente alterando a malha de ponto das formas, sendo que as alterações ocorrem instantaneamente. E para gerar o sólido da geometria formada, basta dar um *Bake* no comando *B-Rep*, e assim terá a forma “sólida” no RhinoCeros.

No próximo passo, para que fosse possível o “fatiamento” da geometria, foi necessário usar no Grasshopper a ferramenta de *Intersection* e a ferramenta *B-Rep Plane tool*. Após se conectarem, foi utilizado também o comando *Perp Frames* o qual foi alimentado pelo *Rail* e por uma *Slider*. Essa *Slider* foi associada à quantidade de planos perpendiculares na curva, podendo variar de acordo com o valor programado. Quando conectado o “Frames” ao “Plane” do *B-Rep Plane tool* ocorreu o *slicing* (fatiamento) da geometria, como indicado na figura 54. Ressalta-se que é possível alterar a malha de pontos da forma que, simultaneamente, altera a geometria, mesmo que fatiada.

Figura 54: Processo Slicing



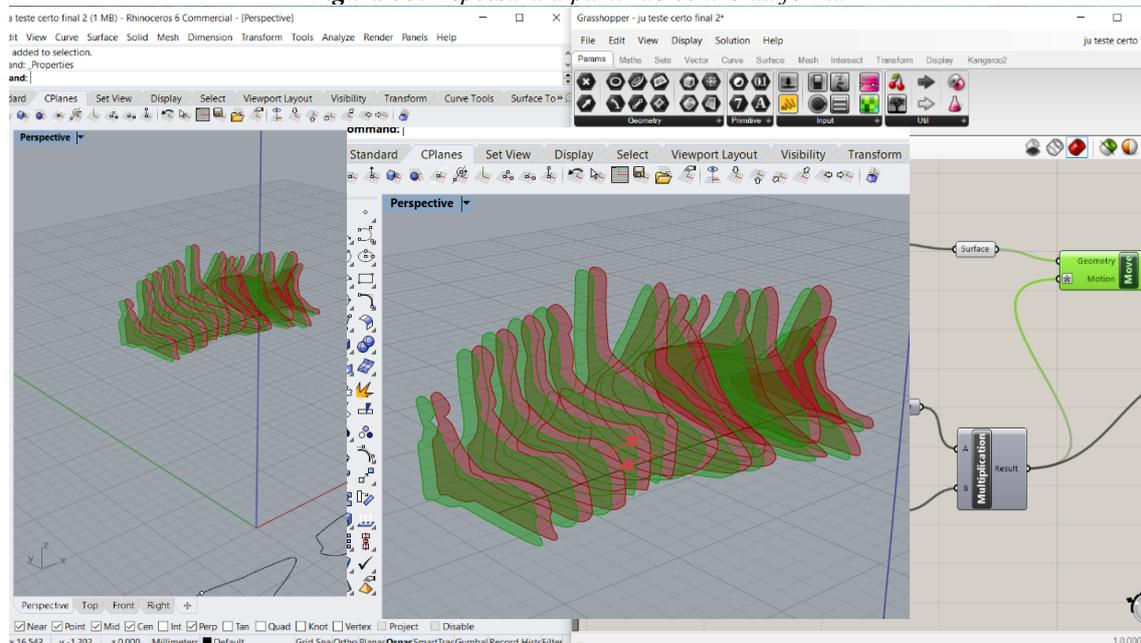
Fonte: Elaborado pelo autor

A próxima etapa consistiu na produção de sólidos, o qual foi indispensável determinar a espessura para cada forma gerada no processo de *slicing*. A partir da análise da figura 55, compreendemos que, para selecionar as espessuras das peças, é necessária uma movimentação na direção do **eixo Z**.

Para modelar a espessura das peças, partindo do centro da forma, foi utilizado o comando **Surface**, na interface do Grasshopper, para que as linhas das formas das peças se transformassem em uma superfície. Foi utilizado também o comando **Vector** conectado a um plano, o qual se refere à movimentação da extrusão. Então, para conseguir um vetor unitário, foi necessário colocar o comando **Multiplicação** alimentado por uma **slider** que representa as espessuras.

Essa ação foi conectada ao comando **Extrude**. Quando clicado com o botão direito em cima do comando **extrude** foi necessário alterar a **expressão** para  $-x/2$ . Assim, o comando utilizado foi o **Move** para produzir as espessuras. Novamente ocorreu a necessidade de alterar a expressão da entrada **Motion** do comando **Move** para  $-x/2$ , como representada na figura 55.

**Figura 55: Espessura a partir do centro da forma**

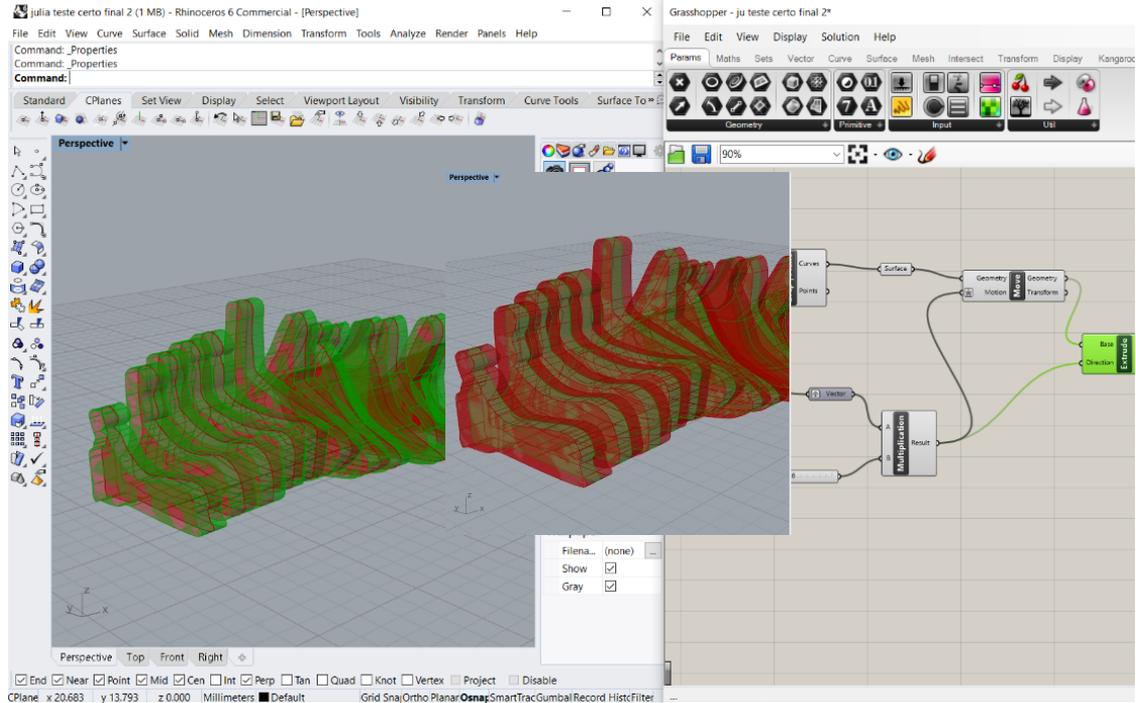


**Fonte:** Elaborado pelo autor

Posteriormente, utilizou-se o comando **Extrude**, sendo necessário alimentá-lo pelo comando **Move**, completando assim a formação da espessura a partir do centro da extrusão (Fig. 56). Cada lado do centro possui o mesmo valor do outro.

Toda essa metodologia pode ser sempre utilizada alterando-se a alimentação das formas desenhadas no RhinoCeros. Ademais, tem-se a possibilidade de alterar a espessura, a geometria e a quantidade das peças em um curto espaço de tempo.

**Figura 56: Processo de extrusão**



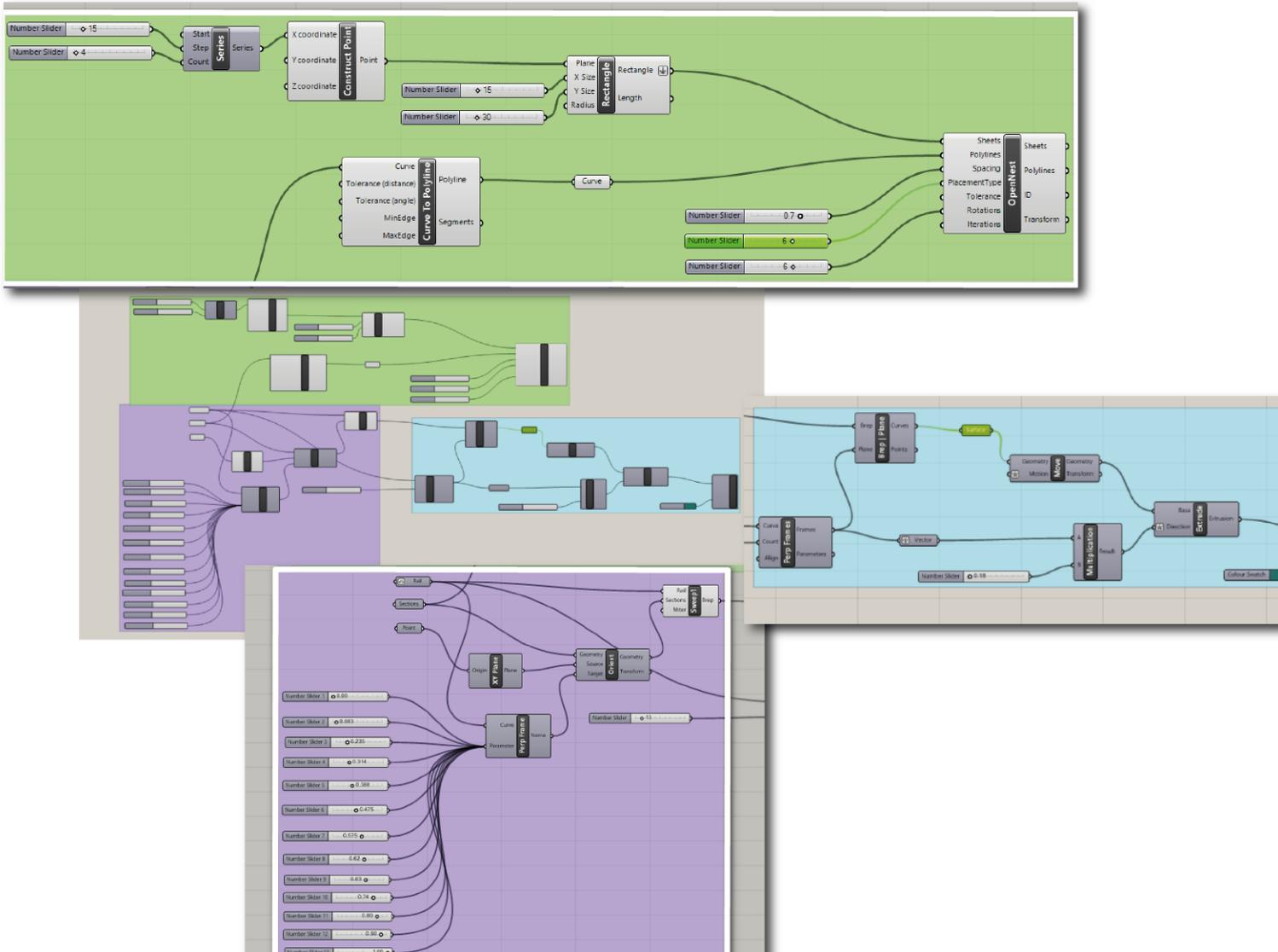
**Fonte:** Elaborado pelo autor

Para conseguir gerar o planejamento de corte foi utilizado o *plug-in* **OpenNest**, no qual uma curva foi alimentada pela área da chapa do material e a outra curva foi alimentada com as seleções de todas as formas. A chapa pode adequar suas dimensões sempre que necessário, apenas alterando os parâmetros.

É importante ressaltar que a organização das peças na chapa pode ser alterada apenas controlando os parâmetros relacionados à distância das peças, rotação e a maneira de posicionar na chapa, o qual possibilita gerar variação do planejamento de corte do mesmo projeto.

Destaca-se aqui que procedimentos adotados podem ser salvos no *plug-in* Grasshopper, e sempre poderão ser utilizados novamente, conforme mostra a figura 57.

Figura 57: Código da programação no Grasshopper



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.1. Resultado da análise da etapa de Controle

O processo de transferência da modelagem manual para o digital foi bastante trabalhoso em função da consistência da massa de modelagem. Assim, a partir do processo de fatiamento da forma, algumas peças foram danificadas, principalmente na altura do mobiliário, em razão da força utilizada para impulsionar a massa para baixo (e possibilitar o corte) que “achatou” partes do modelo. Essas alterações formais (Fig. 58) acarretaram implicações no quesito ergonômico do projeto, fazendo com o que o banco apresentasse desníveis em várias áreas dos assentos.

**Figura 58:** Resultado do controle



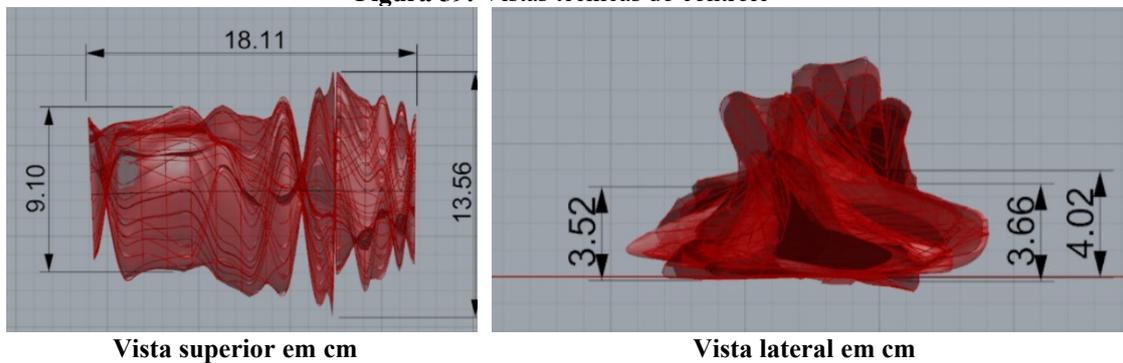
**Fonte:** Elaborado pelo autor

Entretanto na etapa de **Tratamento**, essa questão foi resolvida apenas alterando os pontos constituintes da forma, sendo possível trabalhar a geometria novamente quantas vezes fossem necessárias.

- **Vistas/desenhos técnico do controle**

Foi perceptível as alterações de alturas referentes ao acento e também as inúmeras variedades formais ao longo do banco (fig. 59).

**Figura 59:** Vistas técnicas do controle

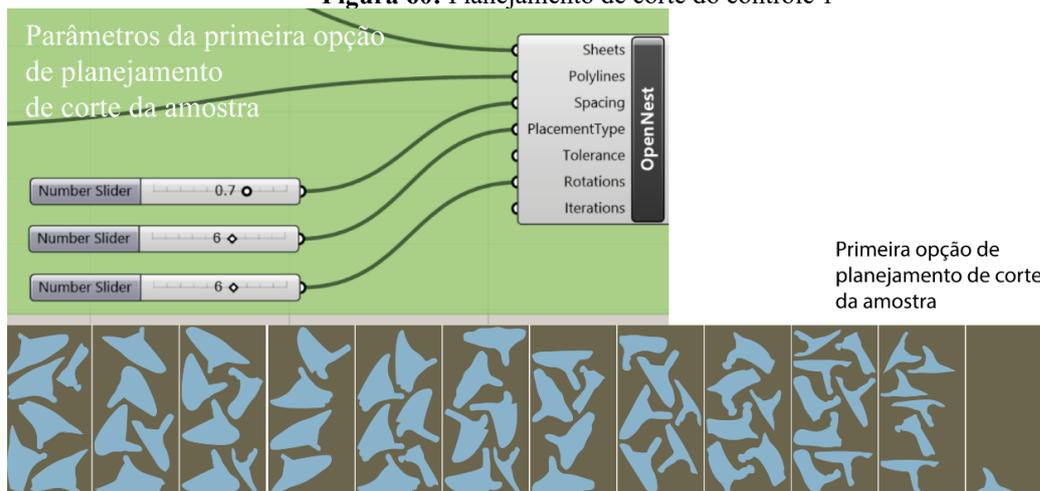


**Fonte:** Elaborado pelo autor

### 3.3.2. *Varição do planejamento de cortes do Controle*

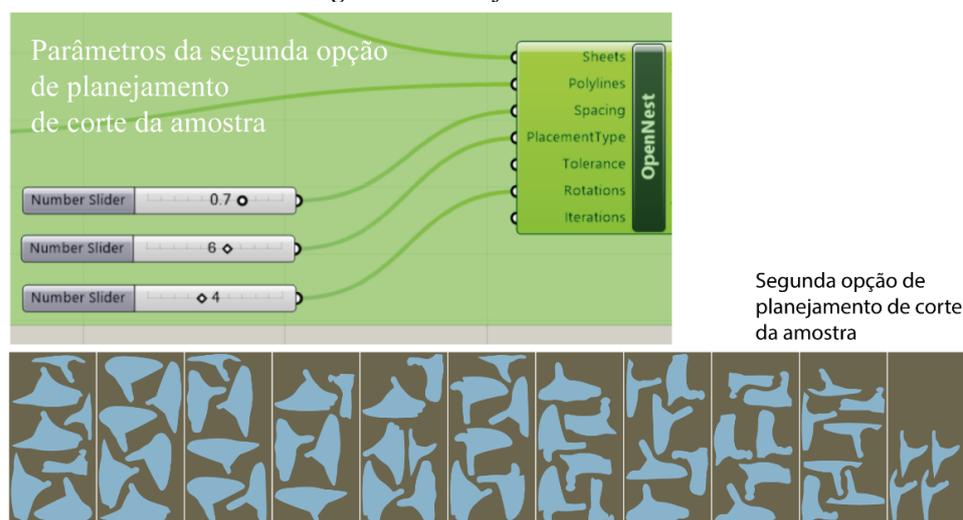
Como dito, é possível reorganizar o planejamento das peças nas chapas apenas alterando-se os parâmetros associados à distância das peças, rotação e a maneira de posicionar na chapa devido às interações entre formas. Nas figuras 60 e 61, é possível observar que apenas com a alteração do parâmetro de rotação foi possível reorganizar as peças, fazendo com o que diminuísse o uso de uma chapa, comportando todas as peças em apenas onze chapas.

**Figura 60:** Planejamento de corte do controle 1



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 61:** Planejamento de corte do controle 2



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.3. Planejamento de corte do Controle escolhido para a análise de resíduos

O planejamento de corte escolhido para os estudos foi a segunda opção (Fig. 61), utilizando-se onze chapas de MDF de dimensões 1,5 m (L) x 3 m (C) x 18 mm (E). Cabe ressaltar que, apesar da utilização do OpenNest para a distribuição das peças nas chapas, estas podem ser mais bem organizadas para otimizar ainda mais o consumo do material.

Outra questão importante foi a espessura das formas. Considerando que a modelagem artesanal ocorreu na escala 1:100, a maneira mais fácil de fatiar sem desestruturar a forma foi seccionar cada forma com 1cm=10 cm que corresponde a escala 1:1. Sendo assim, quando realizada a etapa de planejamento de corte cada peça foi multiplicada por cinco vezes, considerando que a espessura utilizada na hora da prototipagem fosse 18 mm. Considerando esta espessura, a fabricação deve ocorrer utilizando-se uma CNC fresadora,

tendo em vista que a máquina a laser corta, no máximo, 9 mm de espessura de MDF. Por fim, o estudo do planejamento de corte se realizou com fundamentação nas diretrizes de projeto sustentável já consolidadas e abordadas no capítulo anterior.

- **Observações sobre o planejamento de corte do Controle:**

Com o planejamento de corte foi possível observar as grandes dimensões dos componentes, motivo pelo qual o projeto ficará bastante pesado e será necessária uma enorme quantidade de material para fabricá-lo. Considerando isto, existirão implicações na logística e montagem do banco. Foi observado também que o banco foi projetado com apenas a função de sentar e se estrutura a partir de inúmeras peças, necessitando de um total de 11 chapas para produzi-lo.

### **3.4. Análises de possibilidades alterando os parâmetros variáveis**

A partir da experiência 1 referente ao Controle (amostra inicial sem interferências), foram analisadas inúmeras questões referentes aos resultados obtidos (planejamento de corte, formas das peças, desenho técnico, etc.) e, então, determinadas diretrizes para a alteração de parâmetros a serem utilizados na etapa de Tratamento da amostra.

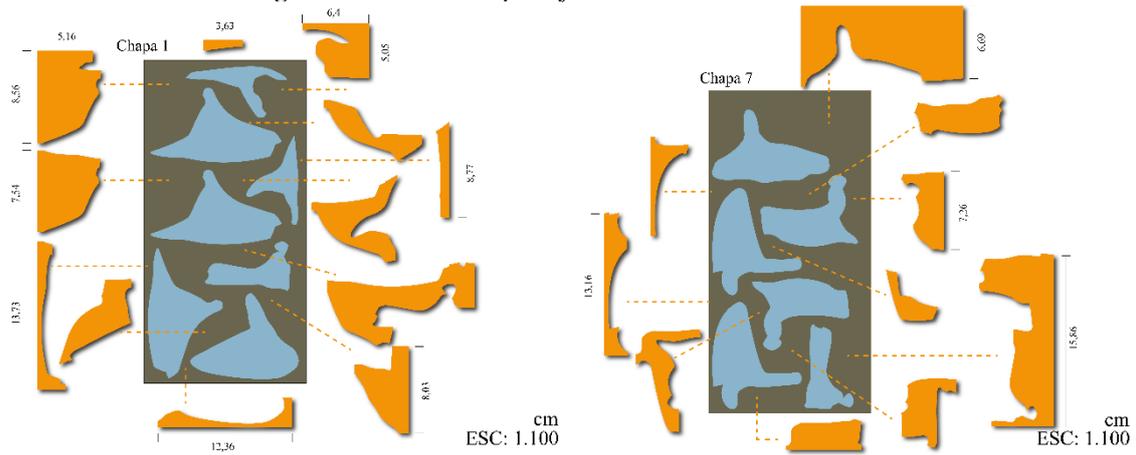
- **Estratégias projetuais consideradas na análise, relacionadas principalmente à minimização das perdas:**

- **Identificação dos Cheios e Vazios:** estudar os resíduos (vazios) e já antever o novo produto (ou subproduto) que poderá ser gerado a partir do uso dos resíduos.

Esse estudo foi realizado a partir do planejamento de corte escolhido (Fig. 62), sobressaindo às geometrias das “peças resíduos” e buscando identificar elementos que poderiam fazer parte da estrutura de um subproduto, o que levaria a maior minimização desse material a ser descartado. A seguir, serão apresentadas apenas duas chapas com a análise do planejamento de corte; para mais informações e visualização de toda a análise das chapas consultar apêndice 2.

Foi perceptível a grande variedade de dimensões das formas, no entanto muitas dessas possuem dimensões adequadas e viáveis para serem reutilizadas. Em média, as peças possuíam como dimensões 60 cm x 70 cm, o que já é o bastante para se pensar em assentos para bancos ou dimensões de profundidades de estantes de livros, como exemplo.

**Figura 62:** Estudos do planejamento de corte do controle



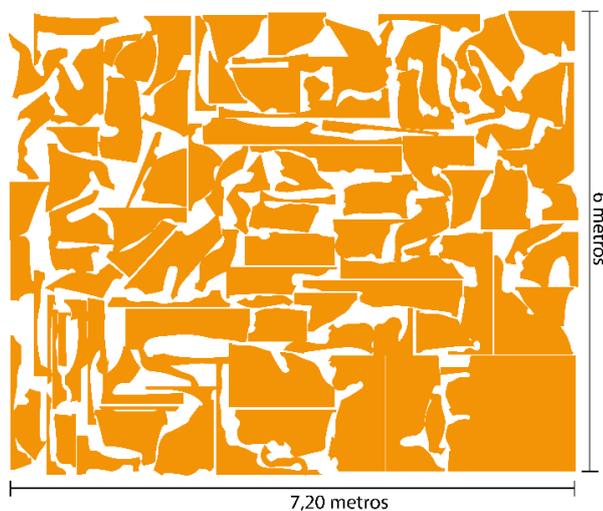
**Fonte:** Elaborado pelo autor

Buscar utilizar os resíduos como estão seria um desafio, pois vários possuem recortes minuciosos derivados dos detalhes das geometrias utilizadas no projeto. Porém, é possível a realização de usinagem em cada peça visando um melhor aproveitamento das peças. Uma das alternativas também seria utilizar essas peças como solução de encaixes chaves para a estruturação do projeto.

- **Visualização da etapa de destinação dos resíduos futuros:** observar o que será feito com os resíduos e como esse material pode ser revertido para a construção deste mesmo projeto;

A partir de uma estimativa de cálculo de resíduos gerados desta produção foi possível ter uma noção da magnitude do descarte dessas “peças resíduos”. Em uma experiência de simulação foi possível chegar que esses resíduos que seriam descartados juntos formam uma chapa com a estimativa de 6 m x 7,20 m, como apresentado na figura 63.

**Figura 63:** Estimativa do descarte dos resíduos provenientes do planejamento de corte



**Fonte:** Elaborado pelo autor

- **Visualização sistêmica e suas inter-relações:** buscar calcular o impacto quantitativo desses resíduos no meio ambiente e identificar o real problema.

Através deste estudo foi possível constatar que o impacto desses resíduos no meio ambiente seria em grande escala. Além disso, o material trabalhado para o projeto é o MDF de 18 mm, que libera gases tóxicos ao meio ambiente quando incinerado, prejudicando ainda mais a saúde dos seres vivos.

- **Organização das peças em grupos de dimensões semelhantes e depois opostos:** identificar quais as peças menores e buscar encaixá-las nos espaços vazios da chapa ou buscar identificar quais podem ser consideradas o “negativo” das peças maiores.

No processo de redesenho projetual, foram resgatadas as diretrizes de projeto já mencionadas pelos autores Maxwell e Vorst (2003), Rozenfeld et al., (2006), Ljungberg (2005) e Manzini e Vezzoli (2008), dentre as quais destacamos: 1) Minimizar o conteúdo material de um produto; 2) Minimizar as perdas e os refugos; 3) Adotar Design Multifuncional como estratégia de projeto otimizado; 4) Otimizar o uso do material; 5) Buscar minimizar o impacto ambiental; 6) Desenvolver ideias com o princípio de causa e efeito.

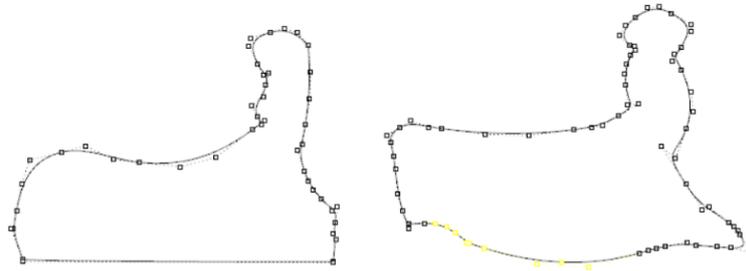
Nesse sentido, foram estudadas opções projetuais para otimizar os espaços úteis do produto desenvolvido, por exemplo, para armazenamentos de objetos menores (revistas, gibis, outros), buscando utilizar vazados, esses inclusive podendo ser realizados pelo negativo de outra peça do projeto. A área do móvel que não possui a função de sentar/acomodar as pessoas poderia ser utilizada para se trabalhar o paisagismo ou para estender o banco e acomodar um maior número de pessoas. Outro objetivo foi realizar alterações de pontos das geometrias sem danificar a função, porém remodelando pontos relacionados apenas à estética para minimizar geometrias excessivas.

### **3.5. Experiência 2 – Tratamento**

Durante o processo de estudo e reprojeção, dois aspectos principais foram levados em consideração: 1) uniformizar as curvas dos assentos promovendo uma melhor ergonomia para o usuário; 2) desenhar formas para se encaixarem melhor, minimizando assim pequenos retalhos resultantes das formas. Como mencionado, em função das alterações sofridas pelas peças no fatiamento do modelo artesanal, foi necessário (durante o

processo) redefinir algumas dimensões para se adequar as medidas padrões ergonômicas, como mostra a figura 64.

**Figura 64:** Alteração na malha de pontos das formas projetuais

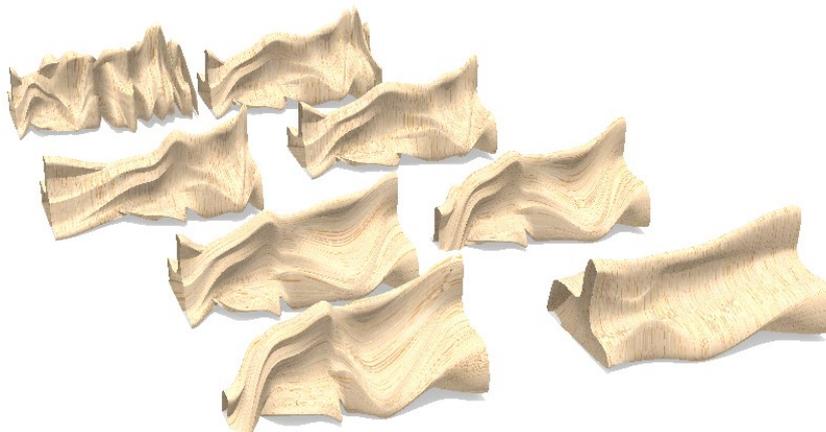


**Fonte:** Elaborado pelo autor

Devido à grande quantidade de formas constituintes no banco, observou-se que existiam diversas variações de altura, provocando rebaixos diversos no assento. Diante disso, e para conseguir gerar formas mais planas, a quantidade de formas foi reduzida, ocorrendo decréscimos de 13 para 8 formas apenas. Após os testes e novas análises, foi necessário reduzir ainda mais, chegando a apenas quatro formas.

As formas foram reduzidas para possibilitar mais espaços planos, distâncias entre formas, trabalhando em uma superfície mais plana e mais ergonômica. Importante ressaltar que durante este processo foi possível gerar diversas versões de geometrias alterando rapidamente apenas pontos das formas e *sliders* referentes ao posicionamento dos planos da forma na reta (Fig. 65).

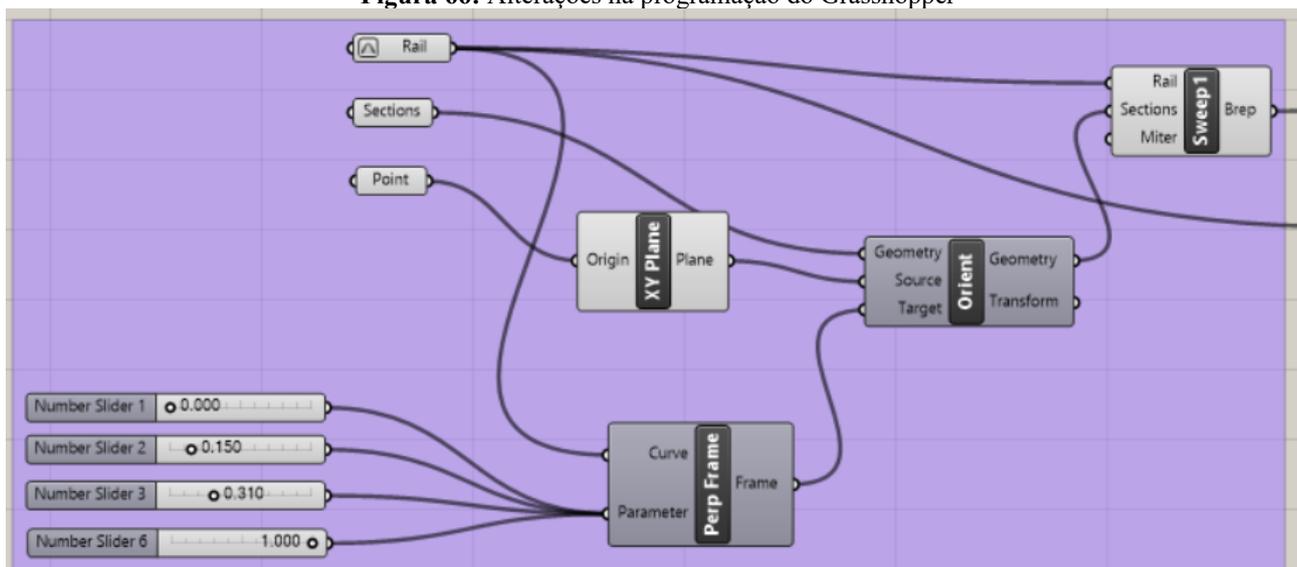
**Figura 65:** Versões do projeto



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Essa atividade ocorreu até chegar a uma versão (Fig. 66) que fosse uma solução viável a princípio. Para gerar essa nova proposta a única parte alterada no Grasshopper foi o número de *sliders* que representa os planos alimentados por cada forma trabalhada na interface do RhinoCeros.

**Figura 66:** Alterações na programação do Grasshopper



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5.1. Nova proposta com as diretrizes projetuais ambientais

A partir de inúmeras simulações digitais e estudos/análises das geometrias do projeto chegou-se a uma solução considerada viável, como indicado na figura 67.

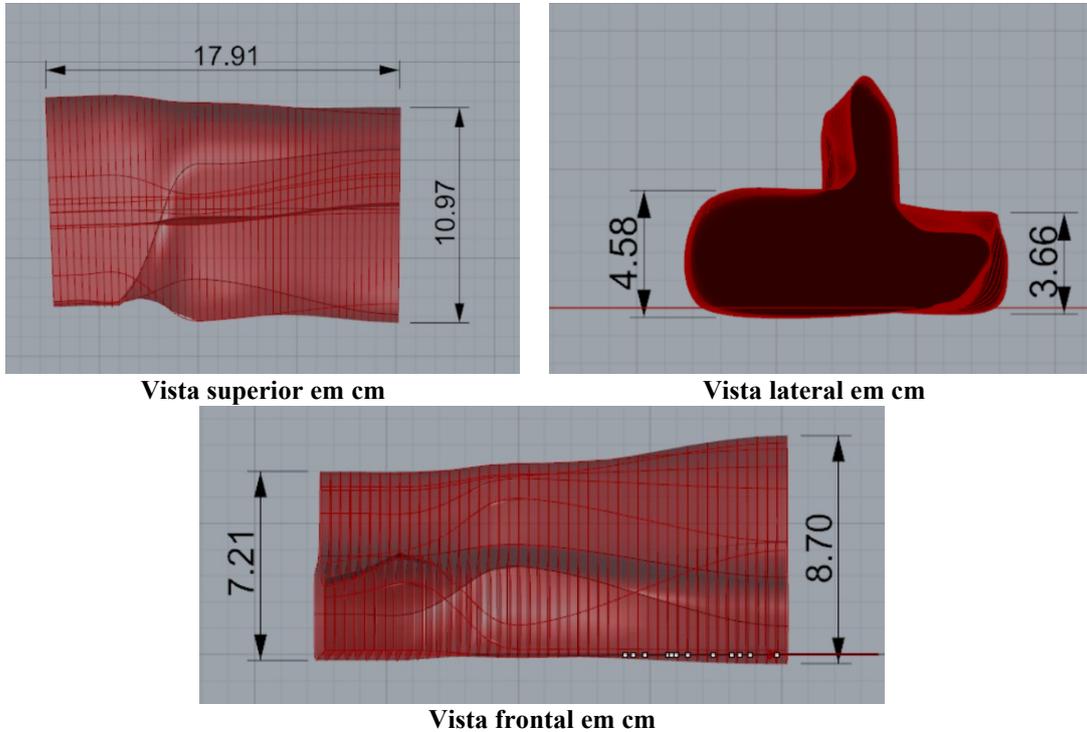
**Figura 67:** Solução Projetual final



Fonte: Elaborado pelo autor

O projeto constituído então por 52 peças foi trabalhado para permitir mais lugares para acomodação de pessoas, permanecendo a estética das formas complexas. As curvas representam a movimentação e trabalham as alturas dos assentos de 30 a 45 cm (Fig. 68).

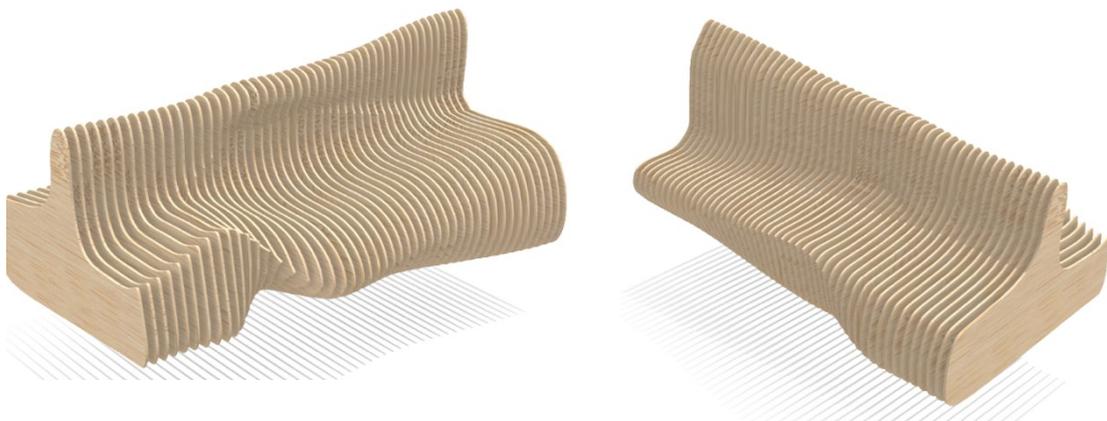
**Figura 68:** Vistas técnicas da Solução Projetual final



**Fonte:** Elaborado pelo autor

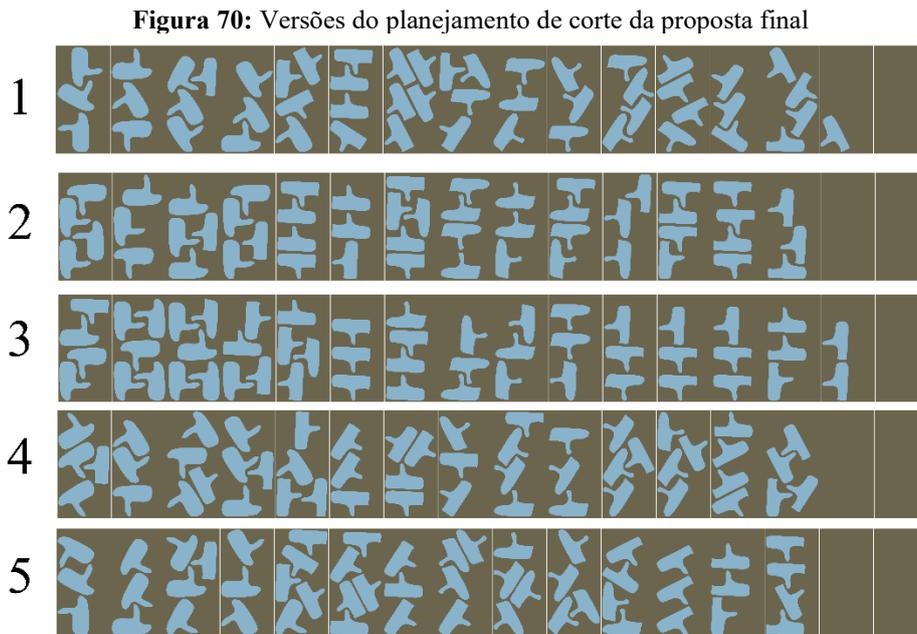
Além disso, as partes do projeto que estavam voltados apenas à área de vegetação foram reduzidas, ampliando os espaços destinados ao assento, sendo a utilização mais ampla de ambos os lados dos bancos. O centro é utilizado como encosto único, independente do lado do mobiliário, conforme mostra a figura 69.

**Figura 69:** Representação do projeto final após o processo de Slicing



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A complexidade formal (no qual o computador é a única ferramenta que permite cognição com essas formas) é considerada como símbolo do design paramétrico; porém, o redesenho do projeto buscou manter a complexidade da forma seguindo a função como princípio. Em relação ao planejamento de corte da versão de projeto 2 (v2), este foi definido a partir de cinco simulações pelo Grasshopper, as quais ocorreram alterando-se os parâmetros referentes a rotação, interação e distanciamento entre peças (Fig.70).



**Fonte:** Elaborado pelo autor

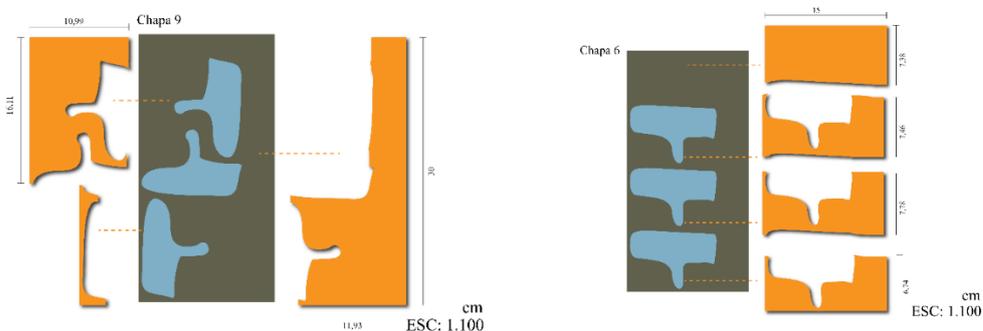
Para a simulação 1 (s1) foram determinados os parâmetros 0.7 de distanciamento das peças, 6 para a rotação e 6 para as interações; a simulação 2 seguiu este mesmo raciocínio foi utilizada 0.7, 4 e 4; a simulação 3 utilizou 0.7, 6 e 4; a simulação 4 alterou os parâmetros para 0.6, 6 e 4; e a simulação 5 foi executada com os parâmetros 0.5, 6 e 4. Importante ressaltar que as simulações proporcionam ao designer antever opções de planejamentos de corte e detectar quais utilizam uma maior quantidade de materiais/chapas, além de possibilitar a análise relativa à melhor otimização da organização das peças e formas dos resíduos que serão geradas no processo de fabricação.

### **3.5.2. Análise do planejamento de corte escolhido**

Como escolha foi selecionado a simulação 3 para análise pois, pela organização das peças nas chapas, será possível obter formas de resíduos com menor quantidade de recortes geométricos, gerando “peças resíduos” mais limpas e facilitando a estratégia de geração de um subproduto desses materiais (Fig. 71). A seguir são apresentadas apenas duas

chapas com simulação do planejamento de corte; para mais informações e visualização de toda a análise das chapas consultar apêndice 3.

**Figura 71:** Estudo dos resíduos do planejamento de corte



**Fonte:** Elaborado pelo autor

O projeto que foi condicionado ao Tratamento necessitou de 15 chapas para a sua realização, o qual após estudos do planejamento de corte apresentou uma estimativa de 10 m x 7 m de retalhos que serão descartados no processo de fabricação, porém ressaltando que os resíduos possuem dimensões maiores e sem muitos recortes geométricos (Fig. 72).

**Figura 72:** Estimativa do descarte dos resíduos provenientes do planejamento de corte da proposta final



**Fonte:** Elaborado pelo autor

### 3.6. Comparação entre projetos: Amostras de Controle e Tratamento

Por mais que o **Controle** tenha demonstrado a viabilidade da fabricação em apenas onze chapas e o **Tratamento** necessitou de quinze chapas, foi possível trabalhar uma ergonomia melhor neste último momento, permitindo seu uso como propósito inicial. Importante ressaltar que o Controle é condicionado a um processo de projeto convencional, sem o uso de softwares digitais, no qual não ocorrem simulações: após a realização do desenho técnico e especificações, o projeto é encaminhado para a prototipagem.

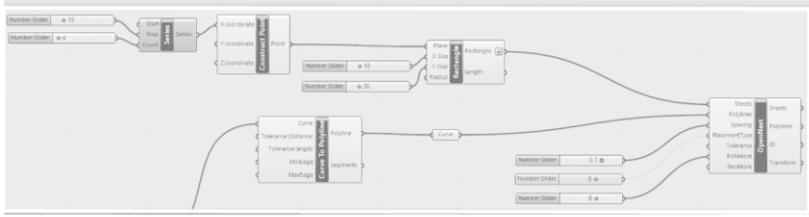
No projeto submetido ao **Tratamento** foi possível realizar inúmeras simulações, permitindo a detecção de problemas e a busca de soluções antes da etapa de prototipagem, o que já contribuiria para a minimização de resíduos e, conseqüentemente, dos impactos ambientais resultantes da fabricação.

Foi possível também observar que o planejamento de corte do Tratamento foi bem mais organizado em função de suas peças semelhantes/ou inversas (a partir de sua readequação formal), evitando assim a geração de resíduos pequenos na sua maioria difíceis de reutilizar e resultando em resíduos com maiores dimensões para o desenvolvimento de subprodutos.

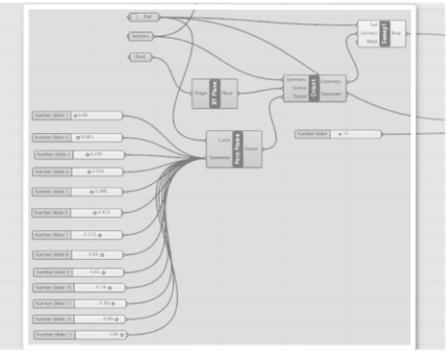
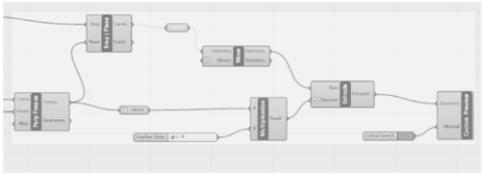
Devido à busca por um melhor acomodamento, o Tratamento apresenta também um número maior de espaços para utilização como função banco e ainda sim manteve suas geometrias complexas. Ademais, o quesito estético e equilíbrio visual foram bem mais favoráveis após o tratamento, sendo possível buscar alinhamentos projetuais, movimentação de formas mais sutis.

Ainda sobre o tratamento, a etapa possibilitou ao designer visualizar as futuras “formas dos resíduos”, permitindo assim a busca por soluções de utilização destes no projeto proposto. Além disso, apesar do projeto submetido ao Tratamento consumir 15 chapas de material, observou-se que o cálculo dos resíduos não sobressaiu muito ao da etapa de controle, resultando em aprox. uma “chapa” de 10 m x 7 m (formada por retalhos), porém com dimensões maiores, facilitando a geração de subprodutos.

O tratamento demonstrou a iteração entre o processo de projeto e os benefícios que os softwares digitais oferecem, possibilitando ao projetista simular inúmeras geometrias da forma, alterar dimensões ergonômicas e estéticas, determinar o número de peças que estruturam o projeto, definir a espessura de cada forma e possuem liberdade de executar inúmeros planejamentos de corte antes mesmo da fase de fabricação. Nessa iteração os designers anteveem inúmeras questões importantes no processo de projeto sustentável que não eram possíveis na maneira convencional, além das simulações proporcionadas pelos mesmos permitirem rápidas alterações projetuais sem necessidade de remodelagem formal.



# Capítulo 4



## 4 O PROJETO SUSTENTÁVEL PARA A FABRICAÇÃO DIGITAL

Este capítulo apresenta uma reflexão sobre os princípios do desenvolvimento de produtos sustentáveis e o uso dos softwares de modelagem como estratégia para a minimização dos impactos decorrentes da fabricação digital subtrativa.

Considerando o procedimento convencional do desenvolvimento dos projetos, em geral, os processos projetuais ocorrem pelas seguintes etapas: definição do problema, estudos e análises de similares, croquis, refinamento da ideia, modelagem pelo software Sketchup (em geral) e realização dos desenhos técnicos do produto final com especificações orientadas à produção.

Após a conclusão da etapa projetual, o produto é enviado à fabricação. Quando o projetista não se envolve no planejamento de corte (por desconhecimento ou qualquer outro motivo), a percepção sobre o impacto dos resíduos ocorrerá somente na fase da prototipagem. Nesse caso, existem duas possibilidades: 1) ignorar o impacto do projeto e continuar produzindo, mesmo com o grande volume de resíduos gerados ou 2) reprojeter o objeto, voltando ao início, para minimizar os danos.

“O custo de modificação de uma decisão anterior de projeto aumenta ao longo do ciclo de desenvolvimento, pois para se enfatizar uma mudança, as decisões já tomadas e as ações consequentes já realizadas podem ser invalidadas” (ROZENFELD et al., 2006 p.7).

Tendo em vista a impossibilidade de ignorar os impactos ambientais (e econômicos) decorrentes de escolhas projetuais equivocadas, é fundamental que o processo seja iterativo. Nesse contexto, o aprimoramento do projeto deve ocorrer até chegar a um modelo final de protótipo considerado “pronto” para ser produzido e inserido no mercado. No entanto, todos esses processos acarretarão, além de muito tempo, uso intenso e repetitivo das máquinas (contabilizando seu desgaste, uso, energia, manutenção mensal), além dos materiais dos inúmeros protótipos realizados e ainda a geração inimaginável de resíduos somados até a etapa da definição de projeto para o mercado.

O que se busca discutir é a importância do embasamento teórico relacionado ao processo de projeto de produto sustentável aliado ao conhecimento dos softwares digitais, que permitirão, de forma simultânea, realizar estudos e análises de simulações digitais, detectar problemas, e alterar parâmetros em busca da otimização da solução final. Esse processo demandará repetições em um ciclo de projeto (digital) até se obter a versão com

menor impacto ambiental e que será prototipada. Esse processo auxiliará o projetista a antever inúmeras problemáticas antes mesmo de prototipar o produto. *“Os segredos de um bom desenvolvimento de produtos é, assim, garantir que as incertezas sejam minimizadas por meio da qualidade das informações...”* (ROZENFELD et al., 2006 p.7). Embora entenda-se que o processo de prototipagem seja uma ferramenta importante de análise do resultado do projeto, o que se observa, atualmente, é que a prototipagem indiscriminada, possível a partir do acesso às tecnologias de fabricação digital, tem causado enorme impacto ambiental, e recebido pouca atenção.

Em meados dos anos 2000, Rozenfeld et al., (2006) já discorria, por exemplo, sobre a importância da simulação digital como recurso importante no processo de projeto ainda na fase conceitual, promovendo uma diversidade de testes antes mesmo da etapa de fabricação. Sobre a fase de planejamento estratégico, o autor menciona a importância das informações referentes à empresa e ao mercado, mas também das informações tecnológicas. Tais informações vão contribuir para a seleção das melhores soluções projetuais, consideradas mais viáveis e potenciais.

De maneira mais ampliada, os autores Manzini e Vezzoli (2008) também discutiram sobre a importância do uso de ferramentas auxiliares para a análise e desenvolvimento de produtos otimizados. Considerando o aumento gradativo da complexidade dos projetos, e a urgência de se atingir a sustentabilidade, os autores destacam a preocupação com a falta de experiência e conhecimento específico, bem como a falta de acesso a estas ferramentas. Manzini e Vezzoli (2008) reforçam ainda que os elementos mais importantes do projeto são definidos nas etapas iniciais. Nesse cenário, os projetistas devem se preparar e buscar o acesso às informações necessárias para projetar, assim como utilizar os métodos adequados, desde o início do projeto. Isso inclui informações sobre a origem dos materiais, seus processos e transformações, distribuição e até dados relacionados à saúde da sociedade.

Na mesma linha de raciocínio, a autora Ljungberg (2005) menciona o valor dos estudos e pesquisas sobre as ferramentas computacionais (novos métodos de fabricação, novos materiais e ferramentas digitais) que surgiram ao longo do tempo e que ainda estão sendo desenvolvidas pelos projetistas. Para lidar com esse cenário digital, será necessário maior conhecimento, experiências e técnicas novas, além de incorporar essa capacitação no design para a sustentabilidade.

Ljungberg (2005) também ressalta que o processo de concepção de produtos possui três principais fases, sendo: 1) a fase do conceito do que será desenvolvido; 2) a estruturação de todo o ciclo de vida do produto e sua análise quantitativa relacionada ao meio ambiente e; 3) a avaliação de cada etapa desse ciclo e sua etapa de realização para minimizar ao máximo os danos ambientais durante o ciclo de vida do produto. Para a autora, portanto, a aliança com a tecnologia digital em busca da otimização da sustentabilidade dos produtos é a chave para o futuro sustentável. Um produto mais integrado ao desenvolvimento com a ajuda de programas de computador avançados, incluindo avaliação avançada do ciclo de vida, provavelmente será mais comum (LJUNGBERG, 2005, p. 477)

Com relação às ferramentas de projetos digitais, ex.: CAD e CAM (Computer Aided Design e Computer Aided Manufacturing), para Manzini e Vezzoli (2008), a implementação dessas estratégias ainda na etapa de processo de criação do projeto é fundamental e, mais, tais estratégias devem ser inseridas em todas as etapas do ciclo de vida do produto. Em um contexto complexo, a sustentabilidade somente poderá ser alcançada quando for possível a inclusão de vários elementos e atores em um sistema integrado que permita inovação tecnológica associada à responsabilidade ambiental e social.

A ação ética do designer relacionada às escolhas ambientais deverá ocorrer, portanto, desde o início do processo de desenvolvimento do produto, para minimizar os danos e também reduzir os custos da produção. Resgatando algumas das diretrizes sustentáveis mencionadas no início do trabalho (LJUNGBERG, 2005; MANZINI e VEZZOLI, 2008), e ainda pertinentes ao projetar sustentável na era da fabricação digital, temos:

- **A minimização dos recursos:** considera a minimização dos materiais durante a produção, pré-produção, distribuição e uso, mas principalmente nas etapas de desenvolvimento de projeto e sua gestão. **Destaque para** a minimização das perdas e refugos e o consumo de recursos no desenvolvimento dos produtos, especialmente pelo uso das simulações digitais.
- **A escolha de recursos e processos de baixo impacto ambiental:** pressupõe a escolha adequada de materiais não tóxicos e processos menos poluentes, em todas as etapas de desenvolvimento do produto. **Destaque para** a escolha de recursos energéticos e processos de baixo impacto, especialmente considerando a redução das fases de prototipagem, possíveis pelo uso das simulações.

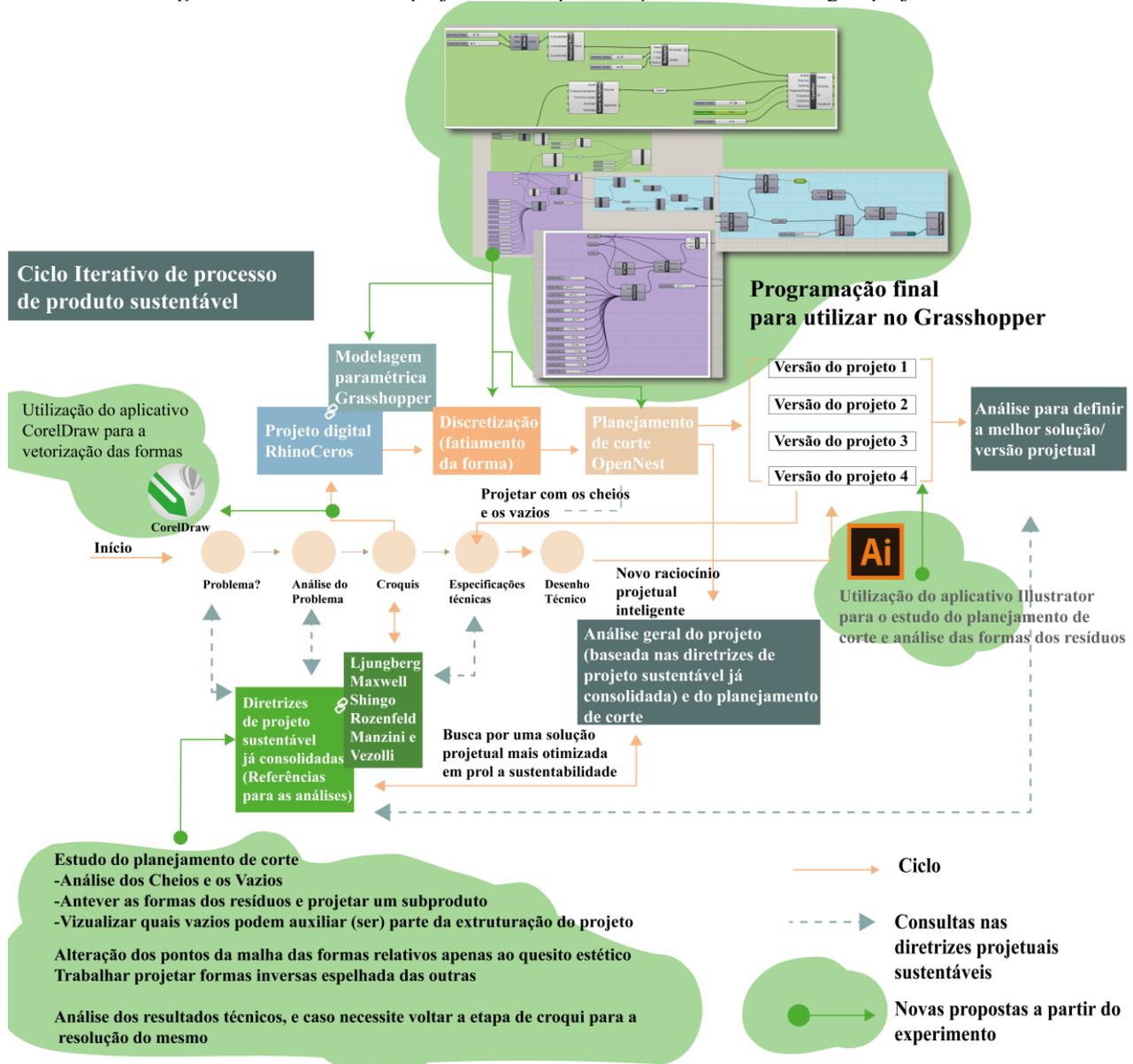
- **A extensão da vida dos materiais:** pressupõe o uso dos resíduos como novo material, derivado do primeiro. Demanda análise de viabilidade do impacto e custo dos processos. **Destaque para** as possibilidades de visualização de “cheios e vazios” durante a fase de projeto, identificando possíveis usos dos retalhos em subprodutos ou mesmo selecionando materiais compatíveis para reciclagem;
- **A facilidade na desmontagem:** pressupõe projetar produtos tendo em vista os procedimentos necessários para facilitar a sua desmontagem. **Destaque para** sistemas de junção especialmente adotados nos projetos de baixa e média complexidade discutidos no trabalho.

Como contribuição final sobre estrutura do ciclo iterativo projetual conforme discutido anteriormente (Fig. 73), acrescentamos algumas diretrizes sustentáveis identificadas a partir o processo de redesenho do projeto em busca de otimizações das soluções.

Baseado nos autores-chave que discutem o processo de projeto sustentável, e considerando os recursos digitais dos softwares de modelagem paramétricos explorados nos experimentos do capítulo 3, destacamos algumas estratégias projetuais que podem ser adotadas, principalmente relacionadas à minimização das perdas ainda durante o processo de projeto orientado à fabricação digital:

- **Identificar os Cheios e Vazios:** pressupõe o estudo dos resíduos (vazios), já antevendo o novo produto (ou subproduto) que poderá ser gerado a partir do uso das sobras, e que se relaciona com a estratégia seguinte;
- **Visualizar a etapa de destinação dos resíduos gerados:** observar o que será feito com os resíduos e definir como esse material poderá ser revertido para a construção do mesmo projeto;
- **Visualizar o sistema e suas inter-relações:** calcular o impacto quantitativo dos resíduos no meio ambiente e identificar o real problema, tanto com relação às dimensões possíveis de serem ajustadas quanto à própria (re)organização das peças nas chapas a serem cortadas (planejamento de corte), minimizando os retalhos;
- **Organizar as peças em grupos de dimensões semelhantes e depois opostos:** identificar peças menores e buscar encaixa-las nos espaços vazios da chapa ou buscar identificar quais podem ser consideradas o “negativo” das peças maiores.

**Figura 73:** Ciclo iterativo projetual com apresentação de novas estratégias projetuais



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Com relação às etapas de programação no Grasshopper, a pesquisa buscou apresentar e detalhar os procedimentos, facilitando o entendimento das etapas seguidas e a experimentação a todos os projetistas interessados no tema. A partir dela, com o código pronto, os projetistas precisarão compreender apenas o básico para a alimentação de suas formas, os pontos centrais e as possibilidades de alterações de parâmetros.

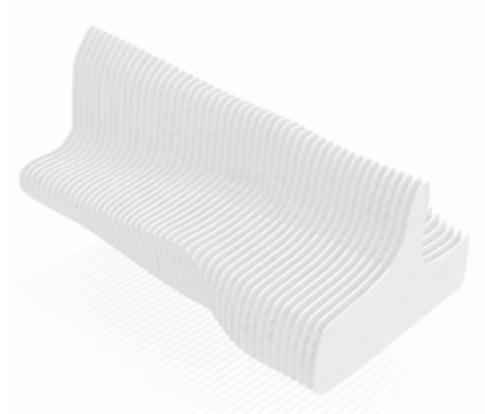
Importante ressaltar que esse material servirá como didática tanto para os alunos e professores do curso de design, mas também para profissionais, influenciando a educação do design, salvaguardadas as limitações e as reduções científicas dos experimentos aqui realizados. Ressalta-se que utilização do software Grasshopper aliado ao RhinoCeros é

imprescindível pois o processo realizado em sua interface pode ser considerado como uma sequência das etapas mais concretas de viabilização da forma que permanecerá em sua estrutura quando salvo. Nesse sentido, sempre que se for trabalhar nesse mesmo caminho, basta apenas alimentar novas formas e novos pontos centrais do novo projeto. De posse dessa “programação diagramática com parâmetro variável”, o designer consegue impulsionar seu projeto, antever inúmeras questões importantes relacionadas às etapas de fabricação, geração de resíduos, uso e descarte. Essa integração das ferramentas digitais com o processo de projeto sustentável é mais um passo rumo a uma futura produção mais limpa e menos danosa ao planeta.

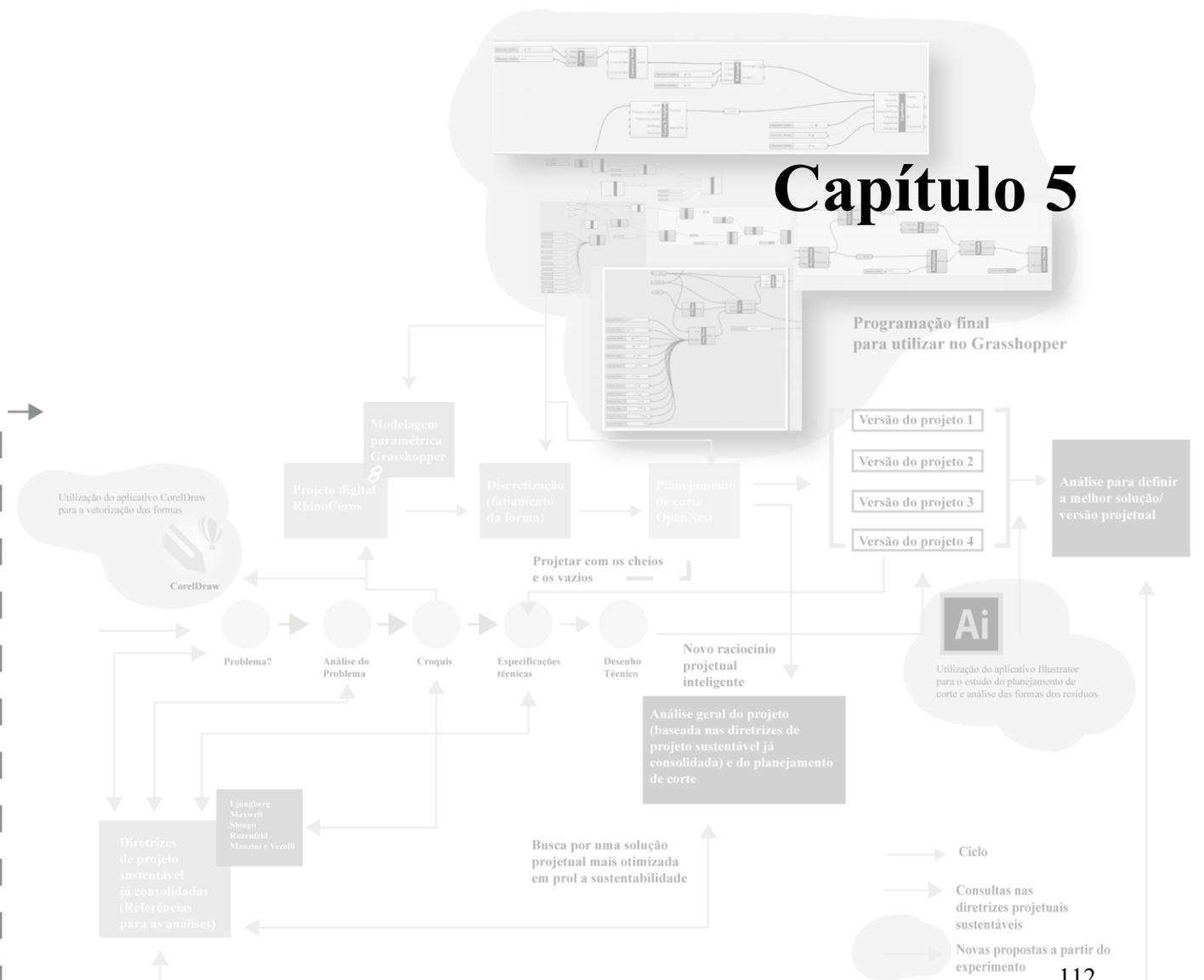
Pode-se observar que um dos temas mais importantes desta pesquisa é a gestão da informação desde o momento da concepção de um projeto. Processos como estes são determinados como projetos inteligentes, nos quais o projetista consegue gerir, controlar a informação ao longo do processo e antever as possibilidades (para isso serve a informação). O controle e o compartilhamento da informação estão associados ao impacto ambiental, pois quanto maior o controle da informação que o projetista possuir, melhor a decisão ambiental tomada.

A simulação (papel) e a informação (a carga informacional do projeto) são os pontos cruciais para o caminho do processo de projeto otimizado. Dessa forma, softwares, recursos tecnológicos que não privilegiam a informação de projeto estão fadados a desaparecer.

Diante disto, surge uma nova função ao designer, o qual passa a ser responsável por encontrar a relevância da informação que se torna, assim, um ponto crucial no processo de projeto. O ponto chave para a otimização é a informação. O designer necessitará, portanto, desenvolver a capacidade crítica de decidir qual informação vai suprimir e qual vai adotar para o projeto. Neste ponto ocorre um deslocamento da criação de artefatos para a criação e gestão da informação, remodelando o papel do projetista e suas responsabilidades perante a sociedade.



# Capítulo 5



## 5 CONCLUSÃO

Alcançar um processo de criação que avança nas questões culturais e sociais seguindo o viés sustentável, demanda dos designers sua desvinculação de quesitos somente estético-culturais. Depende das condições tecnológicas e econômicas da fabricação em série e de um retorno consciente ao modelo inicial do ofício, quando as questões éticas aplicadas aos processos de desenvolvimento e produção de artefatos eram mais presentes. Estas questões baseiam-se, essencialmente, em estudos dos fatores humanos, tecnológicos, econômicos, buscando a melhoria na qualidade de vida e a preservação ambiental (CASAGRANDE JR., 2004 apud SILVA; HEEMANN, 2007).

Cada vez mais, espera-se dos designers o compromisso com o projetar sustentável, com soluções que atendam às necessidades econômicas e sociais, e reduzam o máximo dos riscos ao meio ambiente (DIEGE et al., 2010). É necessário, portanto, que o projetista estabeleça uma leitura integrada do (impacto) de seus projetos considerando as inúmeras variáveis projetuais e seus respectivos processos e, com isso, determine as estratégias mais importantes para serem adotadas em cada caso (SAMPAIO et al. 2018).

Além disso, torna-se evidente a necessidade de uma visão sistêmica do designer e o entendimento de todos os impactos que suas ramificações causam, associando produtos e serviços, em busca de um equilíbrio ambiental (SAMPAIO et al. 2018). Em uma era fabricação digital, de produção ampla e distribuída, na qual o projetista está envolvido em vários processos, desde o planejamento, o projeto e a fabricação, é indispensável a presença da ética social e projetual destes profissionais em todas as suas ações (PAPANNEK, 2004).

Vale ressaltar que a preocupação da autora com as questões ambientais no processo de projeto já vem sendo foco de estudo há anos; porém, é necessário que essa inquietação ambiental e suas diretrizes projetuais sustentáveis busquem evoluir junto aos avanços tecnológicos. Em sintonia com esse raciocínio, Manzini e Vezzoli (2008) destacam:

“Não acreditamos que exista um instrumento informático único capaz de resolver todos os problemas de projeto de maneira eficaz. Mas, de forma realística, pensamos que, em um futuro próximo, poderá desenvolver-se um conjunto de instrumentos capazes de chegar à máxima eficácia para a solução de problemas de cunho específico... sendo uma integração de interfaces onde vários projetistas possam trabalhar de maneira cooperativa juntos no processo de desenvolvimentos de novos produtos” (MANZINI, VEZZOLI, 2008 p.288).

Não necessitamos rotular a tecnologia como boa ou ruim: devemos estudar seus potenciais e suas respectivas problemáticas, e só assim construir pontes de colaboração entre áreas, processos e projetos. Buscando ampliar o conhecimento tecnológico específico para lidar com questões projetuais, a pesquisa possibilitou a descoberta dos softwares CorelDraw e Illustrator, geralmente direcionados ao uso em disciplinas de Design Gráfico, como recursos na área de Design de produtos, interagindo com os softwares de modelagem e estudos tridimensionais.

Ao final foi perceptível que o uso responsável dessas ferramentas digitais contribuiu de forma significativa no processo de projeto, permitindo aos projetistas anteverem inúmeras problemáticas projetuais e buscar alternativas antes mesmo da fase de prototipagem. Ademais, esse ciclo iterativo pode ser utilizado também visando a manufatura aditiva, tendo possibilidade de avaliar o projeto e alterar parâmetros antes mesmo da impressão do modelo.

Com relação ao *plug-in* OpenNest, durante a experiência projetual voltada ao planejamento de corte, foi possível observar que a organização das peças para otimização do uso do material segue a programação conforme ordem de seleção pelos projetistas. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de um *plug-in* que possua como principal objetivo a minimização de resíduos por meio de um planejamento de corte otimizado, sem necessariamente se organizar conforme a ordem escolhida pelo projetista, e sim através de estratégias de otimização da placa. Pesquisas futuras também poderão indicar a necessidade de outros tipos de softwares possíveis de serem associados ao Grasshopper e com maior eficácia para o controle de resíduos.

Um aspecto percebido foi que a segmentação das etapas do ciclo de vida dos produtos pode dificultar sua eficiência, ou seja, é necessário entender que as etapas formam um conjunto que deve estar articulado visando responder a um processo completo de desenvolvimento de produtos sustentáveis, aliado às novas possibilidades tecnológicas.

Uma das futuras possibilidades de utilização é o software Inventor que propicia o controle da informação de forma meticulosa, a partir do qual o projetista obtém todas as informações/detalhamentos antes de produzir, principalmente informações ambientais. Com isso, o designer consegue simular impactos ambientais do produto enquanto trabalha, em paralelo, na simulação projetual e decisão de escolhas.

Por fim, a proposta de um ciclo de projeto iterativo busca consolidar o conhecimento que já vem sendo construído sobre processo de projeto sustentável e as novas ferramentas computacionais projetuais. É, ainda, a maneira encontrada para continuar trilhando o caminho já percorrido há anos pelos pesquisadores apresentados, fortalecendo a integração projetual, a cooperação, a otimização das soluções, a ética profissional ambiental, a tecnologia, a lógica computacional e a interdisciplinaridade. Entendemos que todos esses aspectos, juntos, serão necessários para minimizar, de forma efetiva, os danos ambientais resultantes de escolhas projetuais e produtivas equivocadas.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, Sajid; MARASINI, Ramesh; AHMAD, Munir. An Analysis of the Applications of Rapid Prototyping in Architecture. In: The Second International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design, 2., 2006, Sharjah. Anais... . Sharjah: Ascaad, 2006. p. 108 - 123.
- ABRÃO, Júlia Souza. Design, estratégia e colaboração: criação de um sistema como alternativa para o reaproveitamento de resíduos no setor moveleiro sob medida. 2017. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Design) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- AITAMURTO, Tanja; HOLLAND, Dónal; HUSSAIN, Sofia. The Open Paradigm in Design Research. Design Issues, [s.l.], v. 31, n. 4, p.17-29, out. 2015. MIT Press - Journals. [https://doi.org/10.1162/DESI\\_a\\_00348](https://doi.org/10.1162/DESI_a_00348)
- ALMEIDA, Cristian Machado de (Org.). CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. 2013. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3347#.XUXUI\\_JKgdU](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3347#.XUXUI_JKgdU)>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- ALVES, Gilfranco & Pratschke, Anja. (2013). Processos de Projeto Cibersemióticos: procedimentos de Observação, Representação e Performance aplicados ao Design Paramétrico. - Cybersemiotic Design Processes: Observation, Representation and Performance proceedings applied on Parametric Design. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2013-0048>
- ASANOWICZ, Aleksander. "Evolution of Computer Aided Design: Three Generations of CAD." In Architectural Computing from Turing to 2000: 17th eCAADe Conference Proceedings, 94-100. eCAADe: Conferences. University of Liverpool, UK: University of Liverpool, 1999.
- AVITAL, M. The Generative Bedrock of Open Design. In: B. Van Abel; R. Klaassen; L. Evers; P. Troxler (Eds.); Open Design Now: Why Design Cannot Remain Exclusive, 2011. Amsterdam: BIS Publishers. Disponível em: <<http://opendesignnow.org/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- BALDO, D. Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica. 2013. 99f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei.
- BALLERINI, Flávia. FABRICAÇÃO DIGITAL: UMA ANÁLISE CRÍTICA – FORTALECENDO A COOPERAÇÃO POR MEIO DA FABRICAÇÃO DIGITAL. 2017. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- BARBOSA NETO, W. et al. Samba reception desk: Compromising aesthetics, fabrication and structural performance with the use of virtual and physical models in the design process. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Paulo, v. 9, n. 2, p.53-69, jul./dez. 2014. <https://doi.org/10.11606/gtp.v9i2.83913>
- BARROS, Alexandre Monteiro de. Fabricação digital: sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BASSI, Alberto, Design contemporaneo. Istruzioni per l'uso, Bologna, Il Mulino, 2017, pp. 136.

BLIKSTEIN, P. (2013). Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention. In: J. Walter-Herrmann & C. Büching (Eds.), FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors. Bielefeld: Transcript Publishers.

BORGES, Marina Ferreira; Fakury, Ricardo Hallal; "Processo iterativo de design paramétrico e análise estrutural aplicado ao desenvolvimento de estrutura de torre eólica", p. 35-38. In: Proceedings of the XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics: Design in Freedom [=Blucher Design Proceedings, v.1, n.8]. São Paulo: Blucher, 2014. ISSN 2318-6968, <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2014-0002>

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018. Brasília: SNS/MDR, 2019. 247 p. : il

BRUNDTLAND, G.H., 1987. Our Common Future. Oxford University Press, Oxford.

CACCERE, João Paulo Amaral. Fabricação digital como abordagem para a produção e design distribuídos. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. 267 f. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2017.v3.n2.162-162>

ÇALĐŞKAN, Olgu. Parametric Design in Urbanism: A Critical Reflection. Planning Practice & Research, [s.l.], v. 32, n. 4, p.417-443, 8 ago. 2017. Informa UK Limited. <https://doi.org/10.1080/02697459.2017.1378862>

CAMPBELL, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B., 2011. Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Strategic Foresight Initiative. Atlantic Council.

CAPRA, Fritjof. A TEIA DA VIDA - Uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. Tradução: Newton Roberval Eicheberg. Editora Cultrix: São Paulo, 2006.

CAVALCANTI, J. E. A década de 90 é dos resíduos sólidos. Revista Saneamento Ambiental – nº 54, p. 16-24, nov./dez. 1998. Acesso em 05 jan. 2005. GROSZEK, F. A deficiência na fiscalização. Revista Saneamento Ambiental – nº 54, p. 16- 24, nov./dez. 1998. Acesso em 15 jan. 2018.

CHEN, Danfang et al. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. Journal Of Cleaner Production. p. 615-625. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.009>

CLEMENTINO, Thamyres Oliveira; ARRUDA, Amilton José Vieira. A influência dos requisitos projetuais sustentáveis na estética das embalagens ecologicamente orientadas. In: 13º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 13., 2018, Joinville. Anais... . Joinville: Univille, 2018. p. 1 - 13. <https://doi.org/10.5151/ped2018-https://estudosemdesign.emnuvens.com.br/design/article/view/594/319>

COLTRO, Leda. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV. In: COLTRO, Leda; QUEIROZ, Guilherme de Castilho; GATTI, Jozeti Barbutti; JAIME, Sandra Balan Mendoza (org.). Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: Cetea/ita, 2007. Cap. 8. p. 1-75.

DAVIS, D. (2013) Modelled on software engineering: flexible parametric models in the practice of architecture, PhD dissertation, RMIT University, Melbourne, <http://www.danieldavis.com/thesis/> (acessado 31 Julho 2019).

- DESIGN Q & A. Interview with Charles Eames. [s. L.]: Musée Arts Decoratifs, 1972. P&B. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=3xYi2rd1QCg>>. Acesso em: 02 jan. 2019.
- DIEGEL, O.; SINGAMNENI, S.; REAY, S.; WITHELL, A. Tools for sustainable product design: additive manufacturing. *Journal of Sustainable Development*, v. 3, i. 3, p. 68-75. 2010. <https://doi.org/10.3139/124.100304>
- ELTAWHEEL, Ahmad; SU, Yuehong. Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 73, p.1086-1103, jun. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>
- FISCHER, Thomas & Herr, Christiane. (2001). Teaching Generative Design. International Conference on Generative Art.
- FLORES, Nilton Cesar; TERRIBILE, Daniele Regina. Ética ocupacional sustentável numa sociedade globalizada. *Revista do Direito Público*, [s.l.], v. 10, n. 2, p.89-110, 1 set. 2015. Universidade Estadual de Londrina. <https://doi.org/10.5433/1980-511X.2015v10n2p89>
- FRAZER J. Parametric computation: history and future. *Archit Des* 2016; 86(2):18–23.
- FONSECA, J. J. S. Metodologia da Pesquisa Científica. Fortaleza. 11 maio 2002. Apostila. Universidade Estadual do Ceará.
- FREEMAN, Rachel. A Theory on the Future of the Rebound Effect in a Resource-Constrained World. *Frontiers In Energy Research*, [s.l.], v. 6, p.1 13, 17 ago. 2018. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2018.00081>. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00081>
- FROGHERI, Daniela; ESTÉVEZ, Alberto T. Entre el pensar y el hacer avanzados: Between the advanced thinking and the advanced making. In: XX CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 20., 2016, Buenos Aires. Anais...Buenos Aires: ESARQ, 206. p. 219 - 226. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-654>
- GIL, Antônio Carlos, 1946- Como elaborar projetos de pesquisa/Antônio Carlos Gil. - 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2002
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (Org.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: Ufrgs, 2009. 120 p.
- GERSHENFELD, Neil. How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign affairs*, p. 43-57, 2012.
- GOMES, Atos et al. Processo de fabricação Fresamento. São Paulo: Iftm, 2014. 33 slides, color.
- GONÇALVES, Jennifer Sumar; HENKES, Jairo Afonso. PRODUÇÃO DE COSMÉTICOS DE FORMA MAIS SUSTENTÁVEL. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 5, n. 1, p.473-488, abr. 2016. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e12016473-488>
- GRISA, Daniela Cristina; CAPANEMA, Luciana Xavier de Lemos. Resíduos sólidos = Municipal solid waste. In: PUGA, Fernando Pimentel; CASTRO, Lavínia Barros de (Org.). *Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta*. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018. p. 415-438.
- GROAT, Linda, & Wang, David. (2002). *Architectural research Methods*. New York: John Wiley & sons.

- LJUNGBERG, L., 2005. Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials and Design. Science Direct*, Volume 28, pp. 466-479. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.006>
- HAUSCHILD, Moritz; KARZEL, Rudiger. *Digital Processes*. Munich: Detail, 2011. 111 p. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614351>
- HENKES, Jairo Afonso. ÉTICA AMBIENTAL E TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Gestão Sustentável Ambiental*, Florianópolis, v. 5, n. 1, p.1-4, 2016. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e120161-4>
- HOPKINSON, N.; HAGUE, R. J. M.; DICKENS, P. M. *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. <https://doi.org/10.1002/0470033991>
- IIVARI, J.; VENABLE, J. Action Research and Design Science Research – Seemingly Similar but Decisively Dissimilar. In: EUROPEAN CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS, 17., 2009, Verona. Proceedings... Verona, 2009. p. 1- 13.
- KAZAZIAN, Thierry. *Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável*. 2 ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2009.
- KOHTALA, C. Addressing sustainability in research on distributed production: an integrated literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 92.2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.039>
- KOLAREVIC, Branko (Ed.). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York: Taylor e Francis, 2005. 314 p. <https://doi.org/10.4324/9780203634561>
- KOLAREVIC, Branko, 2005, “Computing the performative”, in *Performative Architecture: Beyond Instrumentality* Eds Kolarevic, B, Malkawi, A M (Spon Press, London) pp 195–202
- LACERDA, Daniel Pacheco; DRESCH, Aline; PROENÇA, Adriano e ANTUNES JUNIOR, José Antonio Valle. *Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção*. *Gest. Prod.* [online]. 2013, vol.20, n.4 [cited 2020-12-29], pp.741-761. Available from: Epub Nov 26, 2013. ISSN 0104-530X. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014>
- LEPRE, Priscilla Ramalho. *DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS POKA-YOKE NO DESIGN DE MOBILIÁRIO: Uma Estratégia para o Design Sustentável*. 2008. 226 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Blucher, 2009. 191 p.
- MAGALHÃES, José Luiz Quadros de. *Capitalismo Guerra e Meio Ambiente*. In: *Juris Poiesis. Revista do Curso de Direito da Universidade Estácio de Sá*. Rio de Janeiro, Ano 15, nº 15.
- MANZINI, E. *Cenários da Matéria*. In CALÇADA, A.; MENDES, F.; BARATA, M. (coords.) *Design em Aberto: uma antologia*. Porto: Bloco Gráfico Ltda. 1993. p.139-143.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. *O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais*. São Paulo: EDUSP. 2008.
- MANZINI, Ezio. *Design para a inovação social e sustentabilidade: Comunidades criativas, organizações colaborativas e novas redes projetuais*. Rio de Janeiro: E-papers, 2008. 103 p. Tradução de Carla Cipolla.

- MENICHINELLI, Massimo (2017) A data-driven approach for understanding Open Design. Mapping social interactions in collaborative processes on GitHub, *The Design Journal*, 20:sup1, S3643-S3658, <https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352869>
- MAXWELL, D. & van der Vorst, R., 2003. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*, Volume 11, pp. 883-895. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00164-6)
- MCGRATH, A. (2002) *The Reenchantment of Nature*, Doubleday/Galilee, New York, 124-125
- MEREDITH, Michael. *From control to design: parametric/algorithmic architecture*. New York: Actar, 2008. 239 p.
- MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). Site oficial do Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso: Abril de 2020.
- MORAIS, Rafael Diogo Vasconcellos. Utilização de um algoritmo com representação gráfica para o problema de corte bidimensional: estudo de caso para uma marcenaria. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, USP, São Carlos, 2011. Cap. 6
- MOURA, Leila Elisabeth Rodrigues. *A IMPORTÂNCIA DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL RESÍDUOS SÓLIDOS EM SÃO JOÃO DEL REI-MG*. 2018. 41 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão Pública, Gestão Pública, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2018.
- MYNAYO, Maria Cecília de Souza (Org.). *Pesquisa social: Teoria, método e criatividade*. Petrópolis: Vozes, 2002. 80 p.
- NATIVIDADE, Verônica Gomes. *Fraturas metodológicas nas arquiteturas digitais*. 2010. 302 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Cap. 4.
- NEVES, Heloisa; MAZZILLI, Clíce de Toledo Sanjar. Open Design – a map of contemporary Open Design structures and practices. In: *CRAFTING THE FUTURE*, 10., 2013, Gothenburg. Proceedings... Gothenburg: Crafting The Future, 2013. v. 10, p. 1 - 19.
- NOGUEIRA, Lúcio José Martins. *Melhoria da Qualidade através de Sistemas Poka-Yoke*. 2010. 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- NOJIMOTO, Cynthia; TRAMONTANO, Marcelo; ANELLI, Renato Luiz Sobral. Design Paramétrico: Experiência Didática. In: 15° CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GRÁFICOS DIGITAIS, 15., 2011, Santa Fé. Proceedings [...] . Santa Fé: Argentina, 2011. p. 456-460.
- NUNES, Viviane G. A. Design sustentável: [im] possível?. In CASTRO, M.L.; NUNES, Viviane G.A. (orgs). *Os desafios projetuais na construção da sustentabilidade: Desafios projetuais: ecologia e sustentabilidade*. Uberlândia: JT Soluções Gráficas Ltda/UFU, 2008. 110 p.
- NUNES, Viviane G. A. *Design Pilot Project as a Boundary Object: a strategy to foster sustainable design policies for Brazilian MSEs*. Milan, Italy: PhD Thesis in Design. INDACO Department, Polytechnic of Milan. 2013, 556p.
- OLIVEIRA, P., ALVARENGA, A., PAES, F., FEITOSA, F., & SILVA, J. *Cadeia produtiva da movelaria: o polo moveleiro do Triângulo Mineiro*. Viçosa/MG: EPAMIG. 2012, 44p.

- OOSTERHUIS, K. File to Factory and Real Time Behavior in ONL-Architecture. 2005. Disponível em: <[http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia04\\_294.content.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia04_294.content.pdf)> Acesso em: 20 outubro 2018.
- OPENNEST. 2020. Disponível em: <https://www.food4rhino.com/app/opennest>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- ORCIUOLI, Affonso. Marcenaria Digital: design e fabricação sustentável. In: SIGRADI 2012 | FORMA (IN) FORMAÇÃO, 1., 2012, Fortaleza. Proceedings.... Fortaleza: Sigradi, 212. p. 653 - 656.
- OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. Design Studies, v. 27, n.3, p.229-265, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- PAPANEK, Victor. DISEÑAR PARA EL MUNDO REAL: ecología humana y cambio social. 2. ed. Nova York: Pollen, 2004. 370 p.
- PEARCE, J. M.; BLAIR, C. M.; LACIAK, K. J., ANDREWS, R.; NOSRAT, A.; ZELENKA-ZOVKO, L. 3D printing of open source appropriate Technologies for self-directed sustainable development. Journal of Sustainable Development, v. 3, p. 17-29. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2009.12.002>
- PINTEREST. 2019. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- POTTMAN, H., et al. Architectural Geometry. Exton: Bentley Institute Press, 2007.
- PUPO, RegianeTrevisan. Inserção da PROTOTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura. 2009. 259 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- RHINO. 2020. Disponível em: <<https://www.rhino3d.com/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- RHINONEST. 2020. Disponível em: [www.tdmsolutions.com/rhinonest/](http://www.tdmsolutions.com/rhinonest/). Acesso em: 20 jun. 2020.
- ROGERS, D.F.. (2002). Pierre Etienne Bezier (1910-1999), in memoriam. Computer-Aided Design. 34. 10.1016/088922200415009. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00120-8)
- ROZENFELD, H., Forcellini, F. A., Amaral, D. C., Toledo, J. C., Silva, S. L., Alliprandini, D. H., Scalice, R. K. (2006). Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva
- SALONITIS, K., Ball, P., 2013. Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems. Procedia CIRP 7, 634e639. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.045>
- SAMPAIO, Claudio P de. et al. Aguinaldo dos Santos, Camila S. D. Lopes, Fabiano A. Trein, Liliane I. Chaves, Lisiane I. Librelotto, Paulo Cesar M. Ferroli, Priscilla R. Lepre, Rita C. Engler, Suzana B. Martins, Viviane G. A. Nunes. Design para a Sustentabilidade: Dimensão Ambiental. Curitiba: Insight, 2018. 186 p.
- SCHWITTER, Craig, 2005, “Engineering Complexity: performance-based design in use”, in Performative Architecture: Beyond Instrumentality Eds Kolarevic, B, Malkawi, A M (Spon Press, London) pp 111–122
- SEELY, Jennifer Ck. DIGITAL FABRICATION IN THE ARCHITECTURAL DESIGN PROCESS. 2004. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2004.

SHINGO, S. Sistema toyota de produção: do ponto-de-vista de engenharia de produção. Porto Alegre: Bookmann, 1996.

SILVA, Jucelia S. Giacomini da; HEEMANN, Ademar. ECO-CONCEPÇÃO: DESIGN, ÉTICA E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL. In: I ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO DO VALE DO ITAJAÍ, 1., 2007, Vale do Itajaí. Anais... . Vale do Itajaí: Ensus, 2008. p. 1 – 18

SILVA, Luís Henrique Stocoda. ABORDAGEM PARA INSTALAÇÃO DE POKA-YOKE EM LINHAS DE PRODUÇÃO COM DEFICIENTES AUDITIVOS NO SETOR AUTOMOTIVO. 2010. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUSA, A.G. Estudo e análise dos métodos de avaliação da montabilidade de produtos industriais no processo de projeto. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 1998. Dissertação de Mestrado.

STEFFEN, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., and Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *Anthr. Rev.* 2, 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>

THIOLLENT, Michel. Metodologia da Pesquisa-Ação. São Paulo: Cortez, 1985.

VANNINI, Virgínia Czarnobay; Martino, Jarryer Andrade De; Lima, Alessandro; Bruscatto, Underléa Miotto; "Desenho Paramétrico e Performance Associados ao Processo Projetual", p. 134-137. In: Proceedings of the XVIII Conference of the Ibero american Society of Digital Graphics: Design in Freedom [=Blucher Design Proceedings, v.1, n.8]. São Paulo: Blucher, 2014. ISSN 2318-6968, <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2014-0023>

VASCO, Luis Augusto Panchi. DE ÉTICA ECONÓMICA A ECONOMÍA Y ÉTICA: FUNDAMENTOS A PARTIR DE UNA RACIONALIDAD ÉTICO INTERPRETATIVA, CON UNA APLICACIÓN AL CASO ECUATORIANO. Quito: Abyayala, 2004. 481 p.

XU, Ke; LUO, Ming; TANG, Kai. Machine based energy-saving tool path generation for five-axis end milling of freeform surfaces. *Journal Of Cleaner Production*, Delft, v. 139, n. 1, p.1207-1223, 30 ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.140>

WACKER, J. A definition of theory: research guidelines for different theory-building research methods in operations management. *Journal of Operations Management*, v. 16, n. 4, p. 361–385, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00019-9)

WALKER, Stuart. Desmascarando o objeto: reestruturando o design para sustentabilidade. *Revista Design em Foco*, Salvador, v. 2, n. 2, p.47-62, 2 jul. 2005. Trimestral.

WOODBURY, R. 2010. Elements of parametric design. New York: Routledge

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

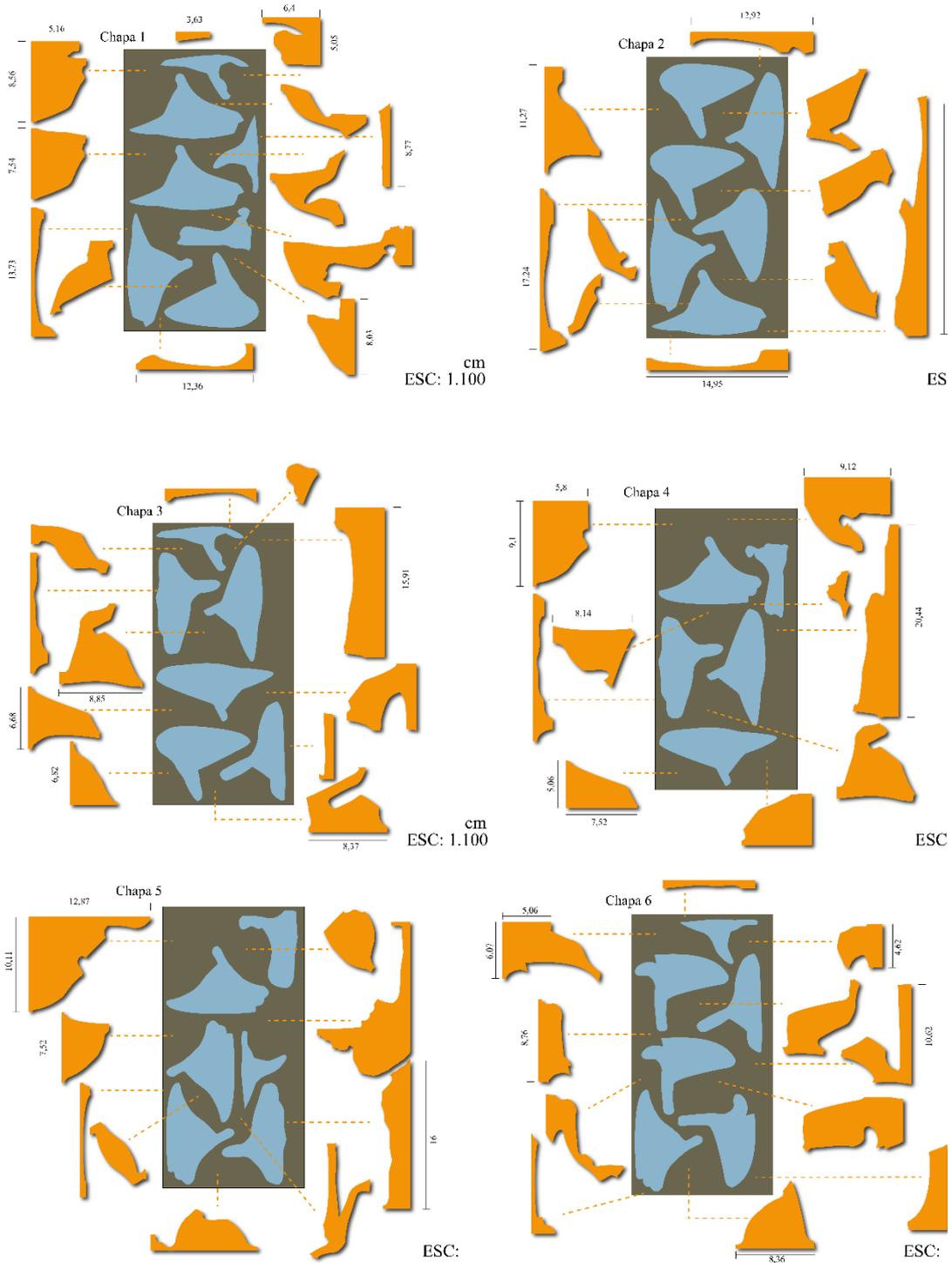
## Apêndice 01 – Scanner das peças

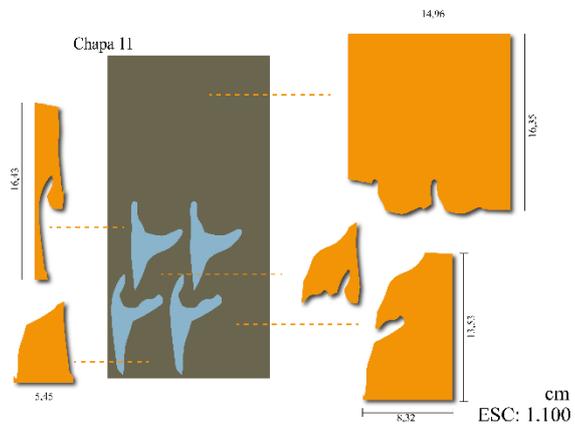
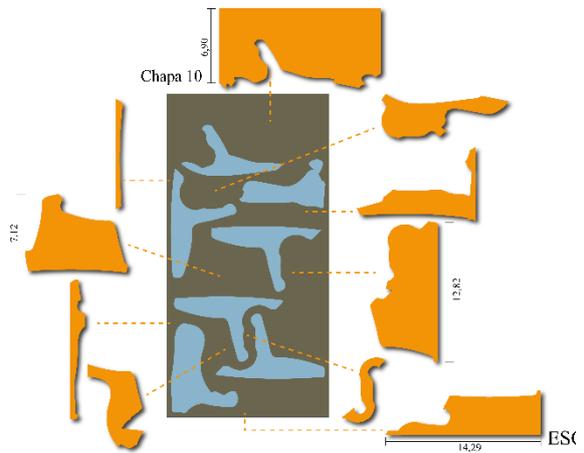
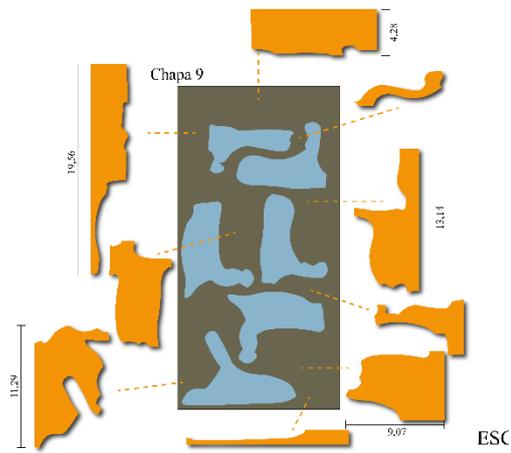
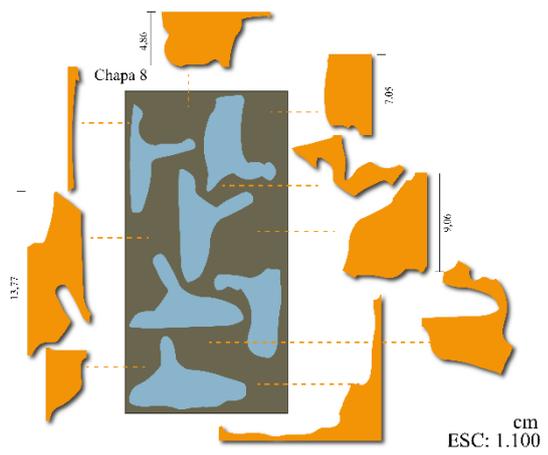
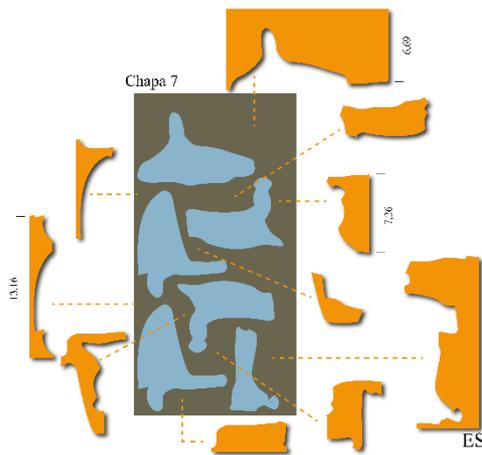
Este apêndice se refere ao arquivo originado no processo de escaneamento das peças provenientes do modelo em massa do projeto.



## Apêndice 02 – Análise do planejamento de corte do controle

Os apêndices a seguir apresentam os estudos das formas dos resíduos, realizados em cada chapa do material que seria usinado para a fase de prototipagem.





### Apêndice 03 – Análise do planejamento de corte do tratamento

